

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



ШМАКОВА Марина Валентиновна

МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ,
СВЯЗАННЫХ С ОЦЕНКОЙ ТВЕРДОГО СТОКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Специальность 25.00.36 – Геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора географических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт озераедения Российской академии наук

Научный консультант: Поздняков Шамиль Рауфович
доктор географических наук, директор ФГБУН
Институт озераедения Российской академии наук

Официальные оппоненты: Калинин Виталий Германович
Доктор географических наук, профессор,
заведующего кафедрой гидрологии и охраны водных
ресурсов ФГБОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет», г.
Пермь

Ясинский Сергей Владимирович
Доктор географических наук, ведущий научный
сотрудник Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт географии Российской
академии наук, г. Москва

Зиновьев Александр Тимофеевич
Доктор технических наук, заведующий лабораторией
гидрологии и геоинформатики Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения Российской академии наук, г.
Барнаул

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», географический факультет, г.
Москва

Защита диссертации состоится «12» мая 2020 г. в 15³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Металлистов, 3, тел. (812) 633–01–82, 372–50–92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета.

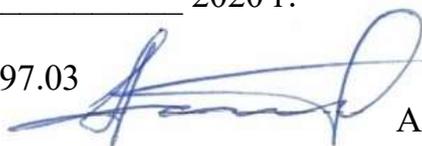
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу 192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, дом 79. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д 212.197.03, Ученому секретарю.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.197.03

к.в.н., доцент



А.Г. Соколов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Оценка, прогноз и моделирование последствий неблагоприятных внешних воздействий на природные системы являются одной из важнейших прикладных задач геоэкологии. Моделирование в геоэкологии – это инструмент количественной оценки переменных состояния природных систем, определяющих среду обитания живых организмов. Применительно к водным объектам встают вопросы, связанные с негативным влиянием повышенной мутности воды и заиления водоемов на функционирование водных экосистем. Успешное решение проблем оценки и прогноза экстремального поступления наносов в водные объекты в приложении к рекреационным, рыбохозяйственным и водохозяйственным задачам зависит от организации научно обоснованного мониторинга и развития современных методов расчета стока наносов, их транспорта и пространственно-временного распределения в водных объектах.

Наиболее актуальны расчеты твердого стока и мутности воды при решении следующих водохозяйственных и геоэкологических задач:

- заиление водохранилищ;
- нормирование сбросов сточных вод при оценке фоновой мутности водоприемника;
- проектирование водозаборов (здесь актуальны вопросы как размещения оголовков в пределах водного объекта, так и определение технических характеристик очистных фильтров водозабора);
- при оценке ущербов планируемых гидротехнических мероприятий в пределах водного объекта или на его водосборе (например, выемка донного грунта, приводящая к увеличению мутности водного объекта и, как следствие, формирование неблагоприятной среды обитания для гидробионтов);
- при планировании или ведении рекреационной или рыбохозяйственной деятельности на водном объекте

– при оценке вероятности наступления (опасного) неблагоприятного геоэкологического явления, связанного с повышенным твердым стоком.

При этом наиболее востребованы расчеты интенсивности заиления водохранилищ, оценка статистических параметров распределения мутности воды, пространственно-временного распределения мутности в акватории, динамики переформирования дна водного объекта и так далее.

Существующая в настоящее время сеть наблюдений за гидрологическим режимом и показателями качества воды, а также система проведения наблюдений на отдельных водных объектах не могут в полной мере обеспечить достоверный для последующих обработки и анализа материал. Причина этого состоит в редких и нерегулярных отборах проб, а также недостаточном количестве наблюдательных пунктов.

Ввиду этого в последнее время нашли свое развитие методы обобщения гидрохимической информации и данных о мутности для года, что дает относительно приемлемую основу для последующей статистической оценки среднегодовых показателей качества воды и режима твердого стока (В.А. Шелутко, Е.С. Смыжова).

В условиях редких и неэквидистантных наблюдений невозможно полноценно проработать вопрос статистической оценки вариационных рядов суточных данных. Этому вопросу также посвящено достаточно много работ как у нас, так и за рубежом (А.П. Лепихин, Е.С. Смыжова, В.А. Шелутко, US EPA). Проблемы начинаются на этапе идентификации закона распределения, которому подчиняется вариационный ряд. Часто при статистическом анализе рядов гидрохимических показателей останавливаются лишь на оценке медианы и квартильного размаха. Таким образом, вопрос оценки экстремальных значений показателей качества воды редкой обеспеченности остается открытым. Редкость и нерегулярность наблюдений также не позволяет достоверно выявить выбросы иного от естественного формирования генезиса. Все это приводит к смещению в параметрических и непараметрических оценках вариационного ряда.

Принципиально решить эту проблему возможно лишь организацией достойного мониторинга за показателями качества воды – регулярным с малой дискретностью отбором проб на взвешенные вещества.

Однако на текущем этапе состояния наблюдательной базы при достаточно изученных процессах формирования физических и гидрохимических потоков и общего массопереноса в системе «водосбор – водный объект» крайне эффективными остаются методы математического моделирования. Как в России, так и за рубежом разработаны модели и расчетные методы для количественной оценки пространственно-временных закономерностей распространения потоков вещества в указанной системе разного масштаба – от мгновенных (секундных) до среднегодовых. Причем в зависимости от назначения модели, выделяют детерминированные и стохастические подходы. Расчеты массопереноса в системе «водосбор – водный объект» должны быть представлены комплексом математических моделей, последовательно описывающим основные взаимосвязанные природные процессы – погодная (климатическая или метеорологическая) модель, модель эрозии почвы, модель формирования стока на водосборе, гидродинамическая модель двухфазного речного потока и модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме. В последнее время набирают популярность детерминированно-стохастические системы, позволяющие существенно расширить возможности детерминированного моделирования особенно в части недостаточности или отсутствия наблюдений за одной из переменных состояния системы или при реализации различных численных экспериментов.

Развитие детерминировано-стохастических методов в оценке стока наносов в водном объекте предполагает наличие надежных детерминированных расчетных схем, достоверно описывающих физику процессов массопереноса. Транспорт наносов в речном потоке, мутность воды, переформирование дна – это процессы, в основе которых лежит принцип пространственно-временного перераспределения твердого вещества в водном объекте. К настоящему времени сформировано достаточное количество формул расхода наносов, которые

являются основой дальнейших балансовых расчетов массопереноса в водном объекте. Наибольший вклад в развитие расчетных балансовых методов транспорта наносов в речных потоках внесли М.А. Великанов, А.В. Караушев, И.Ф. Карасев, В.Н. Гончаров, К.В. Гришанин, L.C. VanRijn, R.A. Bagnold, M.F. Karim, J.F. Kennedy, P. Ackers, W.R. White, F. Engelund, E. Hansen, J.L. Bogardi, C.T. Yang, S.Q. Yang и многие другие. Исследования этих ученых, разработанные ими концепции и подходы, сформировали основные положения в изучении закономерностей транспорта твердого вещества и в их математическом приложении – балансовый подход, взаимосвязь гидравлических переменных состояния потока и его энергетический вклад в процесс перераспределения твердого вещества в русле. Несомненным и обязательным дополнением этих положений должны служить требования к расчетным формулам и методам – достаточная простота и физическая обоснованность расчетов, стандартные данные гидрометрических наблюдений в качестве аргументов, отсутствие эмпирических коэффициентов и универсальность расчетных методов.

Актуальность работы определена необходимостью создания комплекса сопряженных и взаимоопределяющих моделей и методов оценки твердого стока в водном объекте для практической реализации важных геоэкологических задач, решение которых лежит в основе рекомендаций по обеспечению ряда аспектов водопользования и сохранения водных экосистем.

Цель исследования

Создание методологии решения актуальных геоэкологических задач, связанных с оценкой твердого стока водных объектов, которая представлена универсальной физически обоснованной системой детерминированных и стохастических методов и моделей, определяющих и дополняющих друг друга. Эта система должна обеспечивать оценку статистических параметров концентрации взвешенных веществ речного потока при недостаточности и отсутствии данных наблюдений, вычисление пространственно-временных закономерностей распространения мутности в водоемах, расчеты интенсивности переформирования дна водных объектов, а также решение прочих

геоэкологических задач, сопряженных с количественной оценкой транспорта и переотложения твердого вещества в водных объектах.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели двухфазного речного потока.
2. Общая процедура вывода аналитической формулы общего расхода наносов.
3. Общая процедура вывода формулы транспортирующей способности потока – максимального расхода наносов, который способен переносить поток при заданном расходе воды.
4. Разработка стохастической модели годового твердого стока.
5. Оценка распространения загрязняющих примесей от точечных источников в русле реки на основе модели движения воды и твердого вещества.
6. Оценка пространственно-временной закономерности распространения мутности воды и расчеты интенсивности переформирования дна в разные фазы водности водоемов, оценка эффективности возможных гидротехнических мероприятий, направленных на оздоровление озера в режиме численного эксперимента на основе 2D модели гидродинамики и транспорта наносов в водоеме.
7. Формирование детерминировано-стохастической (ДС) моделирующей системы «погода – водосбор – сток – наносы» на основе стохастической модели погоды, модели формирования стока, модели годового твердого стока и модели гидродинамики и транспорта наносов в водоеме.
8. Оценка параметров распределения мутности воды водного объекта в условиях возможных климатических изменений на основе модели годового твердого стока и ДС моделирующей системы.

Теоретико-методологической базой построения схемы расчета транспорта и перераспределения твердого вещества в водном объекте является анализ основных компонент системы «водный поток – донные отложения – наносы» соответствующего масштаба обобщения и их сведение в общий энергетический баланс системы. На основании опыта предшествующих

исследований, оптимальным для написания балансового соотношения осредненного массопереноса в водном потоке являются осредненные по поперечному сечению гидравлические переменные состояния потока. Такой подход позволяет избежать недостаточно изученных и нерегистрируемых при стандартных данных наблюдений на речных потоках процессы турбулентного обмена, ввода в расчетные выражения сомнительных эмпирических коэффициентов, связанных с этим процессом, а также крайне детализированного задания морфометрических характеристик русла. Также важно принимать во внимание необходимость построения взаимосвязанного расчета взвесенесущего потока. В середине прошлого века как опытным (В.А. Ванони) так и расчетным (Г.И. Баренблатт) путем были показаны несомненная взаимосвязь и взаимовлияние взвесей на скоростную структуру двухфазного потока. Таким образом, основным положением в теоретико-методологической основе настоящего исследования является взаимосвязанное балансовое представление основных сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы» обозначенного масштаба обобщения.

Объектами исследования являются водные объекты, характеризующиеся наличием в таковых взвешенных веществ, либо транспортируемых за счет поступательного движения речного потока, аккумулирующихся на дне или вымываемых со дна, либо перераспределяемых в акватории водоема за счет ветровых и стоковых течений.

Предметом исследования являются процессы массопереноса, происходящие в водном объекте и определяющие взаимодействие основных переменных состояния системы «водный поток – донные отложения – наносы». Это взаимодействие построено на динамике твердого и жидкого вещества в этой системе, которое инициируется силами, действующими на систему – сдвигающая проекция силы тяжести, ветровое воздействие и так далее.

Методы исследования, которые были приняты за основу настоящей работы, представлены гидродинамическими уравнениями, положениями теории вероятностей и статистических расчетов, основными принципами построения

связей в системе «водный поток – донные отложения – наносы».

Научная новизна

1. Впервые разработана методология решения геоэкологических задач, связанных с оценкой твердого стока водных объектов, основанная на принципах взаимодействия и взаимовлияния гидравлических переменных состояния и твердого вещества в водном объекте. Следствием этих принципов являются взаимосвязанный расчет гидравлических переменных состояния потока и твердого вещества, динамическое в отношении донного грунта представление взаимодействия потока и дна, концепция фазового гидравлического пространства. На этих принципах основаны разработанные взаимосвязанные детерминированные и стохастические методы и модели. Система этих методов и моделей характеризуется физически обоснованными параметрами и пригодна для водных объектов разной физико-географической принадлежности с любой формой транспорта твердого вещества (взвешенной или влекомой).

2. Впервые разработана модель движения воды и твердого вещества (сопряженная русловая модель двухфазного потока) с физически обоснованным представлением взаимодействия потока и дна.

3. Впервые выведены формулы для расчета мутности воды (расхода наносов) и транспортирующей способности потока (максимальной взвешенной нагрузки потока) для водотоков с разными гидравлическими и морфометрическими характеристиками.

4. Впервые построена стохастическая модель годового твердого стока. Модель позволяет оценить параметры распределения мутности воды и расхода наносов при отсутствии и недостаточности данных наблюдений.

5. С использованием разработанных методов и моделей впервые получены пространственные карты мутности и расхода наносов в разные фазы водности озера Неро и Сестрорецкого Разлива. Впервые построены карты циркуляции твердого вещества в акватории при ветрах доминирующих направлений. Выявлены пространственно-временные закономерности заиления этих водных объектов речными наносами.

6. Впервые построены карты переформирования дна приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища для разных фаз водности.

7. Впервые получена карта распространения максимально возможной мутности воды Куйбышевского водохранилища в меженный период при возможных мероприятиях по изъятию донного грунта в пределах водохранилища (гидродинамический потенциал максимального содержания взвешенных веществ в водной массе).

8. Впервые практически реализована (ДС) моделирующая система «погода – водосбор – сток – наносы» применительно к прогнозным оценкам (численная реализация климатических сценариев) характеристик твердого стока водных объектов в различных приложениях – параметров распределения мутности воды, пространственно-временного распространения в акватории, годового твердого стока.

Теоретическая значимость состоит в создании методологической основы и разработки комплекса моделей и методов оценки различных характеристик твердого вещества в водном объекте, которую отличает физическая обоснованность, относительно простая структура, доступные аргументы – стандартные данные гидрометрических наблюдений, а также хорошая точность расчетов.

Защищаемые положения

1. Комплекс методов и моделей для оценки стока наносов и мутности воды в водных объектах:

– Модель движения воды и твердого вещества в речном потоке. Позволяет оценить гидравлические переменные состояния потока, расход наносов, а также интенсивность распространения примеси и мутности воды в речном потоке, в том числе и в режиме численного эксперимента.

– Метод расчета расхода наносов, основанный на аналитической формуле расхода наносов. Позволяет оценить мутность воды и общий расход наносов в водотоках, лежащих в различных физико-географических зонах и характеризующихся разными гидравлико-морфометрическими параметрами.

– Метод расчета транспортирующей способности потока, основанный на формуле транспортирующей способности потока. Позволяет оценить максимально возможную взвесенесущую нагрузку стока при заданном расходе воды.

– Стохастическая модель годового твердого стока. Позволяет оценить статистические параметры суточных расходов наносов или мутности воды для рек с преимущественным стоком взвешенных наносов при недостаточности или отсутствии данных наблюдений за мутностью воды в речном потоке.

2. Текущая и прогнозная оценка пространственно-временной динамики распространения загрязняющего вещества, мутности воды и твердого стока, а также интенсивности переформирования дна и, как следствие, заиления для ряда водных объектах, расположенных на европейской территории России:

– эффективность возможных гидротехнических мероприятий по оздоровлению озера Неро;

– пространственно-временной вклад речных наносов притоков в процессы заиления акваторий Сестрорецкого Разлива и озера Неро;

– кратность разбавления и скорость распространения токсичного вещества в русле реки Нева в сторону водозаборных станций водоканала Санкт-Петербурга;

– интенсивность заиления приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища;

– гидродинамический потенциал максимального содержания взвешенных веществ в водной массе Куйбышевского водохранилища;

– прогноз изменения параметров распределения мутности воды реки Нарва при численной реализации климатического сценария.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в создании комплекса моделей и методов оценки твердого стока водных объектов и внедрении его в практику геоэкологического моделирования для решения прикладных задач, связанных с оценкой стока наносов и мутности воды в различных приложениях, в том числе и при недостаточности или отсутствии

данных наблюдений. Также **практическая значимость результатов диссертационной работы** состоит в успешном использовании разработанных методов в ходе выполнения государственных контрактов и договоров:

– дополнительное соглашение № 1 к Договору № 892/08 от 22.09.2008 на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка математической модели формирования качества воды реки Нева для принятия превентивных мер защиты водозабора»;

– государственный контракт № 19 от 22.06.2017 (по 01.11.2017) «Комплекс мероприятий по анализу состояния озера Неро и необходимости проведения работ по его комплексной экологической реабилитации»;

– государственный контракт № 173-15 от 31.07.2015 г. на оказание услуг по комплексному обследованию водохранилища Сестрорецкий Разлив для разработки мероприятий по улучшению его экологического состояния;

– приоритетный проект "Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги", темы Плана НИР ИНОЗ РАН № 0154-2018-0006 (на 2018 г.), № 0133-2019-0006 (на 2019 г.) «Разработка методики расчета выноса биогенных веществ от источников различного происхождения (в том числе диффузных) для неоднородных водосборов бассейна Куйбышевского водохранилища».

Изложенные в данной работе новые научно обоснованные решения по оценке твердого стока водных объектов в разных приложениях основаны на выполненных исследованиях и созданном комплексе методов и моделей. Детерминированно-стохастический подход к моделированию твердого стока совместно с разработанными аналитическими методами расчета расхода наносов и мутности воды позволяют получать достоверные статистические оценки этих величин при существенном дефиците данных наблюдений за твердым стоком. Практическая реализация разработанных методов на конкретных водных объектах позволила получить актуальные решения важных водохозяйственных задач как на региональном, так и на федеральном уровне.

Данная диссертационная работа соответствует пунктам 1.13 «Динамика, механизм, факторы и закономерности развития опасных природных и

техноприродных процессов, прогноз их развития, оценка опасности и риска, управление риском, превентивные мероприятия по снижению последствий катастрофических процессов, инженерная защита территорий, зданий и сооружений», 1.14 «Моделирование геоэкологических процессов»; 1.16. «Геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов» Паспорта научной специальности 25.00.36 – геоэкология (Науки о Земле).

Степень достоверности полученных результатов и обоснованность научных выводов

Достоверность и научная обоснованность полученных результатов обеспечивались использованием современных методов исследований, адекватных поставленным задачам, воспроизводимостью полученных результатов, их непротиворечивостью имеющимся данным наблюдений за твердым стоком и мутностью воды, развитием на их базе знаний, лежащих в рамках современных представлений о процессах перераспределения наносов в водном объекте, а также многократной апробацией результатов на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах и в научных публикациях.

Личный вклад соискателя заключается в определении цели и формулировке задач, выборе способов решения и методов исследования, создании комплекса моделей и методов, их программной и численной реализации, а также в обработке, анализе и интерпретации полученных результатов, в написании научных статей, подготовке и представлении докладов на конференциях, симпозиумах и семинарах. Автором внесен вклад в развитие методологии решения геоэкологических задач, связанных с оценкой твердого стока водных объектов.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях, среди которых NATO Advanced Research Workshop. Stochastic Models of hydrological processes and their applications to problems of environmental preservation (Moscow, 1998); International Workshop: River runoff minima and maxima. Delft University

of Technology (St. Petersburg, 2001); VI Всероссийский гидрологический съезд (СПб, 2004); 25 – 35 Пленарные межвузовские координационные совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Астрахань, 2010; Арзамас, 2011; Ижевск, 2012; Пермь, 2013; Ульяновск, 2014; Набережные Челны, 2015; Архангельск, 2016; Уфа, 2017; Нижневартовск, 2018; Москва 2019); XXXI Пленум Геоморфологической комиссии РАН (Астрахань, 2011); Всероссийская научная конференция «Процессы самоорганизации в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин Fluvial–2012» (Томск, 2012); II Всероссийская конференция с международным участием «Малые реки: экологическое состояние и перспективы развития» (Чебоксары, 2012); VII Всероссийский гидрологический съезд (СПб, 2013); XXXIV Пленум Геоморфологической Комиссии РАН (Волгоград, 2014); II Всероссийская школа-конференция с международным участием «Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана» (Борок, 2014); Международная научная конференция «Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата» (Минск, 2015); Четвертая всероссийская научная конференция с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Москва, 2015); XXXV Пленум Геоморфологической комиссии РАН (Симферополь, 2016); Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам. V Ладожский симпозиум (СПб, 2016); IV – VII Международные научно-практические конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2013 – 2019); Всероссийская научная конференция «Современные водные ресурсы: новые вызовы и пути решения» (Сочи, 2017); Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития» (СПб, 2017); Международные научно-практические конференции Герценовские чтения (СПб, 2014 – 2019); Всероссийская научно-практическая конференция «Водные ресурсы России: современное состояние и управление» (Сочи, 2018); Международная научно-практическая конференция «Почвы и земельные ресурсы: современное

состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование» (Минск, 2018); Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития» (СПб, 2017, 2018, 2019); Всероссийская научно-практическая конференция «Водохранилища РФ: современные экологические проблемы, состояние, управление» (Сочи, 2019), а также на семинарах МГУ, РГГМУ, ТГУ и ИНОЗ РАН.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в четырех монографиях и 27 статьях, в том числе 22 статьи опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК для изложения основных научных результатов докторской диссертации. Расчеты выполнены с использованием 5 разработанных автором сертифицированных программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Данная работа состоит из пяти глав, введения и заключения, а также одного приложения. Объем работы составляет 312 страниц, включая 71 рисунок и 32 таблицы. Библиографический список содержит 293 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит постановку задачи, основные цели исследования, обоснование актуальности решаемых задач и научную новизну предлагаемых методов решения.

Глава 1. Географические аспекты распространения мутности воды и наносов в водных объектах.

В главе рассматривается понятие стока наносов и мутности воды водных объектов и их основные источники – почвенная эрозия, русловые процессы, переработка берегов водохранилищ, гидродинамические процессы, происходящие в водных объектах, хозяйственная деятельность на водосборе и в пределах водного объекта и так далее. Рассматриваются вопросы актуальности расчетов твердого стока и мутности воды при решении ряда водохозяйственных и геоэкологических задач: заиление водохранилищ; нормирование сбросов

сточных вод при оценке фоновой мутности водоприемника; проектирование водозаборов (здесь актуальны вопросы как размещения оголовков в пределах водного объекта, так и определение технических характеристик очистных фильтров водозабора); при оценке рисков планируемых гидротехнических мероприятий в пределах водного объекта или на его водосборе (например, выемка донного грунта, приводящая к увеличению мутности водного объекта и, как следствие, формирование неблагоприятной среды обитания для гидробионтов); при планировании или ведении рекреационной или рыбохозяйственной деятельности на водном объекте. Также в главе представлены данные о физико-географическом распределении твердого стока по территории Земного шара и приводится географический обзор некоторых геоэкологических задач, связанных с транспортом наносов.

Глава 2. Расчеты твердого стока водных объектов при решении геоэкологических и водохозяйственных задач

Основной задачей геоэкологии является оценка текущего и прогнозного (как результат влияния природных и антропогенных факторов) состояния геосферных оболочек как среды обитания человека и других организмов. Можно выделить следующие важные прикладные задачи геоэкологии применительно к водным объектам в части расчета твердого стока: оценка возможных последствий хозяйственной деятельности в пределах водного объекта и на водосборе; поиск технических решений, направленных на оздоровление водного объекта; оценка характеристик стока наносов и мутности воды в качестве информационной основы региональных нормативов, направленных на регламентирование антропогенных воздействий на водные объекты; оценка пространственно-временных закономерностей распределения мутности в пределах водного объекта и расчеты интенсивности заиления водоемов в водохозяйственных задачах.

В первом разделе главы рассматриваются вопросы количественной оценки интенсивности заиления водохранилищ речными наносами. Основными причинами заиления являются наносы, поступающие вместе с речным стоком с

территории водосбора, ветровой перенос летучих песков с суши, выпадение в осадок химических соединений, биомасса водной растительности, абразия берегов (Шамов, 1939).

Во втором разделе главы рассматриваются проблемы оценки статистических параметров мутности воды. В основе любого статистического анализа всегда должно лежать понимание закона распределения, которому соответствует распределение случайной величины и последующая несмещенная оценка параметров распределения. Однако некачественные, редкие и нерегулярные данные наблюдений за мутностью воды и расходом наносов приводят к недостоверным статистическим оценкам, что чревато заданием ошибочных качественных и количественных ориентиров для различных сфер водопользования.

Третий раздел второй главы посвящен вопросам нормирования сбросов сточных вод по мутности воды. Для нормирования допустимых воздействий на водный объект необходимо располагать данными о фоновой концентрации взвешенных веществ (СанПиН 2.1.5.980-00; Приказ Минсельхоз России..., 2016). При этом, как уже обсуждалось в предшествующем разделе, точность оценки мутности воды является крайне невысокой, а связь с водностью водного объекта не всегда однозначной.

Последний раздел главы посвящен вопросам количественной оценки характеристик полей повышенной мутности воды при дноуглублении или дампинге. Гидротехническое строительство, дноуглубительные работы с целью улучшения судоходных путей и водообмена между протоками, добыча нерудных материалов и дампинг приводят к возрастанию мутности воды в пределах гидродинамического источника взмучивания и последующего распространения шлейфов мутных вод в акватории. Повышенная концентрация взвешенных веществ в реке или водоеме может привести к отрицательным последствиям, таким как ухудшение качества воды, нежелательным изменениям глубин, нарушением экологического режима водного объекта.

Глава 3. Методы расчета твердого стока водных объектов

Моделирование в геоэкологии является инструментом количественной оценки переменных состояния природной системы, определяющей среду обитания живых организмов. Для водных экосистем основным фактором благополучного существования гидробионтов является качество воды. Мутность воды относят к одному из показателей качества воды. Этот показатель регламентирован в нормативах по сбросу сточных вод и санитарных нормах и правилах. Мутность водного объекта в пересчете на сток наносов определяет интенсивность переформирования дна (размыв или заиление) водных объектов. Интенсивное заиление приводит к обмелению водоемов и нарушению функционирования биоценозов, изменения условий жизнедеятельности гидробионтов, изменению трофического статуса водного объекта. При решении различных геоэкологических задач расчеты твердого стока водных объектов и его различных приложений (мутности воды, заиления водоемов, переформирования дна водных объектов) могут быть представлены простыми балансовыми соотношениями прихода/расхода стока наносов в водный объект с притоками и стоками, гидродинамическими уравнениями двухфазного речного потока, формулами расхода наносов и мутности воды. В зависимости от поставленной задачи и имеющихся средств для ее решения используют упрощенные (оценочные) варианты расчетов либо строят математические моделирующие системы с заданной точностью описания процесса и получают детализированный результат. Часто в условиях недостаточности наблюдений за стоком наносов и мутностью воды водных объектов, расчетные методы остаются единственным способом оценки характеристик твердого стока и пространственно-временных закономерностей его распределения в акватории.

Модель движения воды и твердого вещества в открытом русле. В первой части главы приведены обзор моделей речных потоков и их классификация, сформулированы основные требования к модели руслового потока: взаимосвязанный расчет переменных состояния потока – его жидкой и твердой фазы, физически обоснованные параметры модели, вопросы информационного обеспечения модели.

Математическая модель движения воды и твердого вещества (Свидетельство о государственной регистрации 2016612803 от 10.03.2016) разработана в Институте озероведения РАН. Модель основана на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы» (Шмакова, Кондратьев, 2008; Шмакова, 2011; 2013 b; 2018). Сила трения в модели представлена по аналогии с известной в грунтоведении зависимостью сопротивления грунта сдвигу от давления со стороны потока (Бабков и др., 1950). Для расчета переноса растворенных примесей русловым потоком модель дополняется уравнением турбулентной диффузии (Методические..., 1987). Модель позволяет оценить вертикальные деформации русла (переотложение твердого вещества в потоке); распространение растворенных примесей в речном потоке, поступающих от различных точечных и рассредоточенных источников загрязнения; траектории движения примесей и условия их попадания в важные для водопользования объекты (например, водозаборы).

Аналитическая формула расхода наносов. Во второй части третьей главы приведен обзор некоторых существующих формул расхода взвешенных, влекомых расходов наносов, а также формул общего расхода наносов. Далее представлен вывод аналитической формулы расхода наносов как следствия основного уравнения двухфазного руслового потока.

Апробация аналитической формулы общего расхода наносов проводится на материалах наблюдений за совместным стоком влекомых и взвешенных наносов. Также расчеты по формуле проводились для водотоков с преимущественным стоком только взвешенных или только влекомых наносов, что дало основание использовать формулу общего расхода наносов для соответствующих вычислений. Среднее относительное отклонение между рассчитанными и наблюдаемыми расходами наносов для исследуемых рек составило около 50 %.

В третьей части третьей главы рассматривается максимальная взвесенесущая нагрузка потока при заданном расходе воды и понятие фазового

гидравлического пространства потока (пространство состояний системы). Это понятие основано на том, что каждому сочетанию глубины и скорости будет соответствовать определенное значение расхода наносов. Значение расхода наносов для каждого сочетания определяется транспортирующим потенциалом потока. То есть, транспортирующий потенциал потока представляет собой массу твердого вещества, переносимого за единицу времени через поперечное сечение потока при постоянном расходе воды и определяется соотношением скорости и глубины потока. Транспортирующий потенциал потока меньше или равен транспортирующей способности потока (при постоянном расходе воды).

За основу при выводе формулы транспортирующей способности потока была принята аналитическая формула общего расхода наносов и формула заиляющей скорости, при которой смесь в потоке либо осаждается, либо меняется качественное состояние потока – поток становится вязким, можно использовать, например, выражение (Лямаев, 1988). Таким образом, полученная аналитическая формула транспортирующей способности потока основана на балансе сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы» (Шмакова, 2013), формуле сопротивления грунта сдвигу (Бабков и др., 1950) и формуле граничной скорости осаждения частиц в потоке воды (Лямаев, 1988).

Двумерная модель гидродинамики и транспорта наносов в мелководном водоеме. В четвертом разделе третьей главы приведен обзор моделей, описывающих внутриводоемные процессы, и представлена двумерная модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме, разработанная в ИНОЗ РАН (Свидетельство о государственной регистрации №2018615451 от 08.05.2018). Эта модель основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке и интегрированной в нее аналитической формуле расхода наносов, что позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища, а также пространственное распределение мутности воды и расхода наносов в акватории.

Модель годового твердого стока. Модель годового твердого стока разработана в Институте озероведения РАН (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014). Модель стохастическая, предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой годового твердого стока и основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов (Шмакова М.В., 2018). Модель позволяет оценить статистические параметры мутности воды, а также годовые значения твердого стока при отсутствии данных наблюдений за расходами наносов и для рек, неосвещенных данными наблюдений за расходами воды и наносов (параметры распределения расходов воды оцениваются по картам нормы стока или рекам-аналогам).

ДС моделирующая система «Погода – Сток – Наносы». В заключительном разделе третьей главы приводится обзор детерминировано-стохастических (ДС) моделей в гидрологии и разработанная в ИНОЗ РАН ДС моделирующая система «Погода – Сток – Наносы». При решении задач, связанных с оценкой текущего и прогнозного состояния переменных состояния системы «водосбор – водный объект», ДС подход позволяет выполнять требуемые расчеты при недостаточности или отсутствии данных натурных наблюдений.

ДС моделирующая система *IL_DSM (Institute of Limnology Deterministic and Stochastic Modeling system)* позволяет оценить переменные состояния системы «водосбор – водный объект» при недостаточности или отсутствии данных наблюдений за стоком воды и наносов, а также при реализации различных сценариев воздействия на систему антропогенных и климатических факторов. Компонентами системы являются: стохастическая модель погоды, модель формирования стока на водосборе, модель стока наносов, модель массопереноса в открытом русле, модель массопереноса в акватории мелководного водоема. Итогом ДС моделирования являются параметры распределения расхода воды, твердого стока, а также схемы распространения

мутности в акватории водоема, как в современных условиях, так и в случае реализации заданных сценариев климатических изменений.

Таким образом, методология решения геоэкологических задач, связанных с расчетами твердого стока водных объектов (Рисунок 1) представлена принципами исследования (взаимосопряжение и взаимоопределение твердого стока и гидравлических переменных состояния) и основанным на этих принципах комплексом методов и моделей.

Глава 4. Геоэкологические задачи, связанные с оценкой пространственно-временного распределения мутности воды и расхода наносов и переформирования дна в водоемах

4.1. Оценка интенсивности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами

Замедленный водообмен, заиление водохранилища Сестрорецкий Разлив органическим веществом и речными наносами, высокое содержание биогенных элементов в воде притоков приводят к интенсификации процессов эвтрофирования водоема. В 2015 году были проведены комплексные исследования водохранилища Сестрорецкий Разлив для разработки мероприятий по улучшению его экологического состояния. Одной из задач проекта стояла оценка вклада поступающих в акваторию речных наносов в общие процессы заиления Разлива.

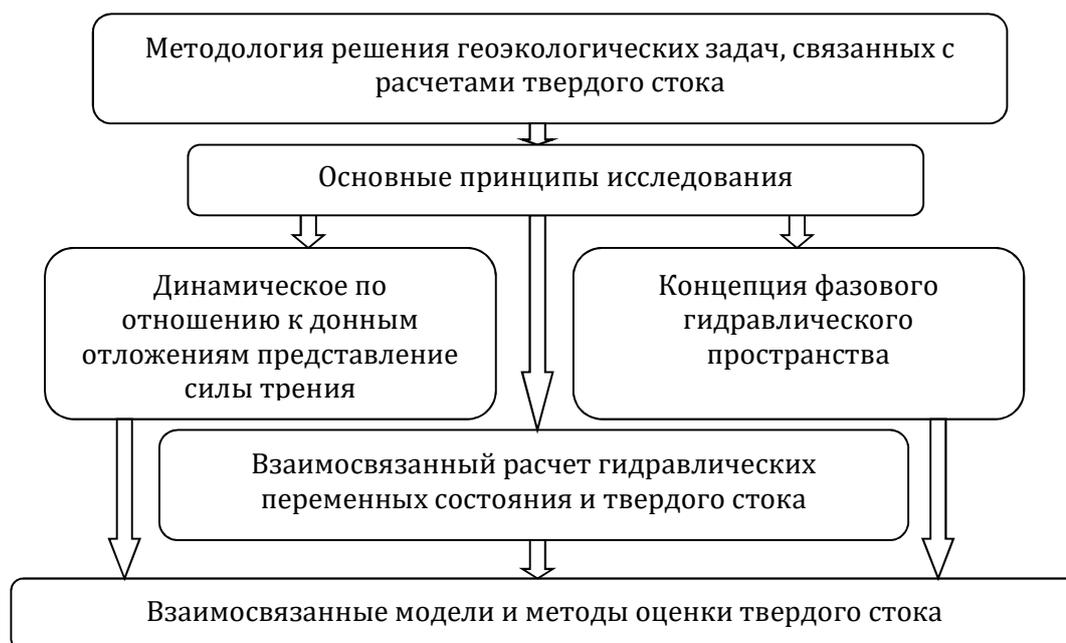


Рисунок 1 – Общая схема методологии решения геоэкологических задач, связанных с оценкой твердого стока водных объектов

Первая часть данного раздела посвящена расчетам годового твердого стока притоков по стохастической модели годового твердого стока. Данные о годовом твердом стоке притоков лежат в основе интегрального условно равномерного расчета периода заиления мелководных водоемов и водохранилищ речными наносами

По данным наблюдений за расходами наносов твердый сток рек Черная и Сестра составил около 3.5 тыс. т/год (Водные объекты..., 2000; Природа..., 2011). Причем, на р. Сестра приходится около 2.4 тыс. т/год, на р. Черная – 1.1 тыс. т/год. Это составляет около 85 % от общей массы поступивших в водохранилище веществ, при этом свыше 60 % наносов остается в водоеме в виде донных отложений, остальное выносится. По некоторым данным, средняя скорость осадконакопления (органического и грунтового) сейчас составляет около 3 см/год (Природа..., 2011). При небольших глубинах основной части Сестрорецкого Разлива (1–2 м) такая интенсивность осадконакопления приводит к быстрому сокращению объема и площади водоема (Природа..., 2011). Периоды заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива, полученные по наблюдаемым и рассчитанным данным за расходами наносов, отличаются не

более чем на 10 % и в среднем для водоема не превышают несколько десятых мм в год. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что речные наносы не являются основной причиной заиления Сестрорецкого Разлива. По-видимому, одной из главных экологической проблемой Разлива является высокая скорость органического осадконакопления (Природа..., 2011). Возможными причинами этого являются, прежде всего, неорганизованный сброс неочищенных сточных вод. Замедленный водообмен Сестрорецкого Разлива, его мелководность и наличие застойных зон приводят к накоплению загрязняющих веществ в акватории водохранилища помимо поступления взвешенных частиц со стоком притоков.

Во второй части раздела приведены результаты моделирования переформирования дна Сестрорецкого Разлива речными наносами. В основу моделирования пространственно-временных закономерностей распространения твердого вещества в акватории Разлива легла 2D модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме.

На Рисунке 2 представлено рассчитанное пространственное распределение расхода наносов (на поперечное сечение расчетной ячейки) на акватории Сестрорецкого Разлива в меженный период и период половодья. Распределение расхода наносов в целом повторяет распределение скорости течения на акватории. Наибольшие значения расхода наносов приходятся на участки повышенной скорости воды (впадения рек Сестры и Черной и место руслового сужения – водосливной канал), а также участок транзитного переноса твердого вещества через акваторию от устья впадающих рек до мест русловых сужений и участок мелководья в западной части Разлива. Значения расхода наносов в межень не превышают нескольких грамм в секунду, что объясняется невысокими скоростями течения.

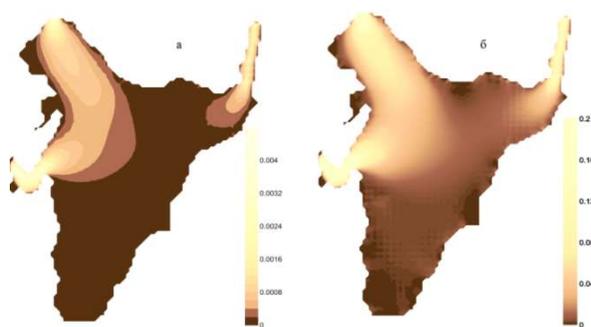


Рисунок 2 – Рассчитанное распределение расхода наносов (кг/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в межень (а) и половодье (б)

На Рисунке 3 представлена схема осадконакопления на дне Сестрорецкого Разлива для периода спада половодья для среднего по водности года. Продолжительность расчета составила 10 суток. Наибольшая интенсивность донных переотложений приходится, как и на предыдущих рисунках, на места русловых сужений и участки транзитного переноса наносов. На спаде половодья скорости течения начинают снижаться, транспортирующий потенциал потока уменьшается, что приводит к осаждению наносов. Максимальные значения намыва в этот период в северной части водоема составляют 6 – 9 мм за декаду. Однако в среднем по водохранилищу эта величина составит около 1 мм, что хорошо согласуется с результатами расчетов, полученными в (Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002).

Обобщая результаты моделирования для различных внутригодовых фаз водности (летняя межень, подъем и спад половодья), можно сделать вывод, что интенсивность намыва дна речными наносами в северной части акватории составляет около 3 – 4 мм/год.

В третьей части раздела приведены результаты ДС моделирования пространственно-временных закономерностей переформирования дна Сестрорецкого Разлива речными наносами при реализации некоторых климатических сценариев. Для прогнозных оценок годового твердого стока притоков и интенсивности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив использовались представленная выше ДС моделирующая система.

Региональные изменения климата в Балтийском регионе в 21 столетии представлены как «вырезка» региона из глобального прогноза, полученного по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (Карлин, 2010). Вырезка из глобальных решений осуществляется для сценарных расчетов по сценариям А2 (максимальная эмиссия CO₂ в атмосферу) и В1 (минимальная эмиссия CO₂ в атмосферу). Расчеты выполнялись по немецкой модели ЕСНАМ5/МРІ-ОМ.

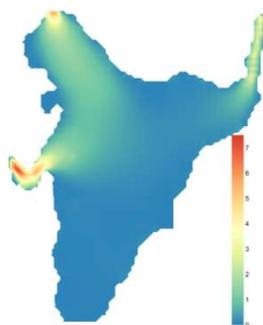


Рисунок 3 – Рассчитанное переформирование дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) для периода спада половодья – намыв

Как показали результаты расчетов, реализация рассмотренных климатических сценариев может привести к существенному снижению стока с водосбора Сестрорецкого Разлива – на 47 % для ЕСНАМА2 и 35 % для ЕСНАМ В1 по отношению к современному уровню.

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что как в настоящее время, так и при условии реализации рассмотренных климатических сценариев распределение речных наносов в Разливе в среднем составляет доли мм/год. Однако интенсивность заиления северных областей в местах впадения притоков и стока может достигать нескольких сантиметров в год.

4.2. Моделирование распространения наносов в озере Неро

Озеро Неро крупнейшее в Ярославской области, имеет большое средообразующее, оздоровительное, рекреационное и градостроительное значение для региона. В настоящее время отмечено, что заилены устьевые участки рек питающих озеро водой, замедлен озерный водообмен, увеличены концентрации азота и фосфора, ухудшены органолептические свойства и

качественные характеристики водных ресурсов, увеличены количественные характеристики фитопланктона озера.

В связи с этим были разработаны мероприятия, направленные на экологическую реабилитацию водоема. В 2017 году ИНОЗ РАН была поставлена задача оценки вклада речных наносов в процессы заиления озера и оценка эффективности возможных гидротехнических мероприятий, направленных на оздоровление озера в режиме численного эксперимента.

В результате моделирования выявлено, что значения скорости течений воды в акватории крайне незначительны и не превышают несколько миллиметров в секунду. Максимальные значения скорости (несколько сантиметров в секунду) приходятся на места впадения основных притоков и исток реки Векса, а также участок транзитного движения водных масс между притоками и рекой Векса. Очевидно, что водность притоков оказывает непосредственное воздействие на распределение и значения скорости течений, расходов наносов в акватории и переформирование дна озера. Более интенсивная циркуляция водных масс и твердого вещества приходится на весеннее половодье. В этот период увеличиваются как значения средней скорости течения и расхода наносов в акватории, так и территории охвата водоема этой циркуляцией. Наибольшие значения расхода наносов приходятся на участки повышенной скорости воды (впадения рек Сара и Ишня и место руслового сужения – река Векса) и участок транзитного переноса твердого вещества через акваторию от устья впадающих рек до истока Вексы. Значения расхода наносов незначительны и не превышают нескольких грамм в секунду. Это объясняется крайне малыми скоростями течения.

Для оценки эффективности проектов, направленных на экологическое оздоровление озера Неро, были проведены численные эксперименты. *Первое проектное решение* (Комплексная экологическая..., 2014) предполагало расчистку дна озера в черте города Ростов и выемку донного грунта на глубину 0.5 м. При выполнении расчетов исходные глубины были скорректированы согласно проекту. На Рисунке 4 приведены значения глубин, распределение

скоростей течения и распределение разности расходов наносов (расход наносов, полученный при численном эксперименте, за вычетом расхода наносов при естественном режиме ($G_{ч.э.} - G$)) в акватории озера Неро.

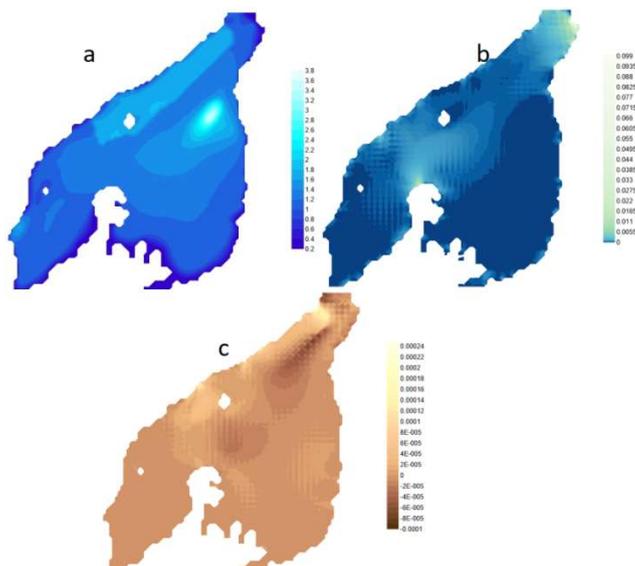


Рисунок 4 – Карта глубин озера Неро для численного эксперимента, м (a); распределение скоростей течения в акватории озера Неро, м/с (b); распределение разности расходов наносов ($G_{ч.э.} - G$), кг/с (c)

Как и следовало ожидать, для участка акватории с углубленным дном скорости течения уменьшаются в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений). Расход наносов же за счет увеличения площади поперечного сечения незначительно вырастет непосредственно на участке углубления. Тогда как на продольной границе этого участка с нетронутой областью значения расхода наносов уменьшатся. Это вызвано уменьшением скоростей течения на этом участке.

Второе проектное предложение направлено на увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья реки Сары до истока реки Вексы. Таким образом, для второго численного эксперимента на указанном участке был назначен канал с соответствующим увеличением глубины на всем протяжении на 0.5 м. На Рисунке 5 приведены глубины, распределение скоростей течения и распределение разности расходов наносов (расход наносов,

полученный при численном эксперименте, за вычетом расхода наносов при естественном режиме ($G_{ч.э.} - G$) в акватории озера Неро.

Очевидно, что увеличение глубины при сохранении переносимого количества водных масс приведет к уменьшению скорости, что иллюстрирует распределение течений на Рисунке 5. Уменьшение скорости определит и незначительное уменьшение значения расхода наносов (Рисунок 5) на несколько грамм в секунду.

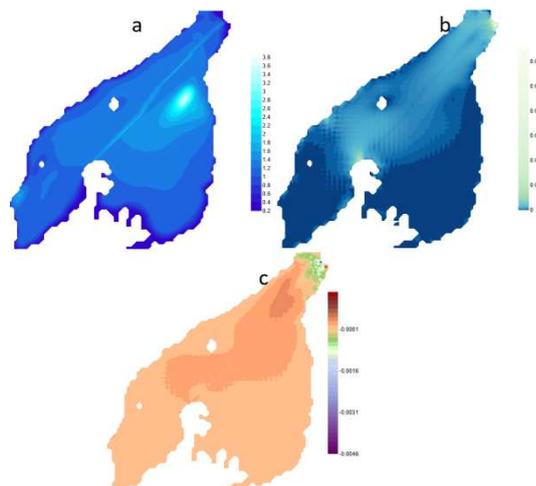


Рисунок 5 – Карта глубин озера Неро для численного эксперимента, м (a);
распределение скоростей течения в акватории озера Неро, м/с (b);
распределение разности расходов наносов ($G_{ч.э.} - G$), кг/с (c)

На основании проведенного моделирования, можно сделать вывод, что практические реализации представленных проектных решений не только не приведут к улучшению водообмена в озере, но и наоборот, будут способствовать образованию застойных зон (особенно для первого проектного решения).

4.3. Моделирование переформирования дна и пространственного распространения мутности воды в Куйбышевском водохранилище

Куйбышевское водохранилище является источником промышленного и питьевого водоснабжения большого количества населенных пунктов, расположенных в пределах его береговой зоны, среди которых Казань, Тольятти, Ульяновск, Тетюши, Зеленодольск, Чистополь, Волжск, Новоульяновск. При этом гидротехническое строительство, дноуглубительные работы с целью улучшения судоходных путей и водообмена между протоками, добыча нерудных

материалов приводит к возрастанию мутности воды в пределах гидродинамического источника взмучивания и последующего распространения шлейфов мутных вод в акватории. Повышенная мутность воды водного объекта, как уже было отмечено в Главе 2 настоящей работы оказывают негативное воздействие на экосистему водного объекта, на его гидрологические, биологические, гидрохимические характеристики, на состояние кормовой базы рыб, условия их нереста и т. д. (Кондратьева и др., 2012), а также осложняет систему водопользования. Как было отмечено в Главе 3, транспортирующая способность потока или его максимальная взвешенная нагрузка определяет гидравлические переменные состояния потока. В связи с этим особенный интерес представляет оценка полей максимального насыщения водных масс взвешенными веществами при гипотетической инициации процессов взмучивания донного грунта в акватории. Особенную ценность такие построения представляют для межлетнего периода, характеризующегося наименьшей глубиной потока, а значит наибольшими значениями мутности. Полученные карты позволят оценить области акватории с наиболее неблагоприятными гидродинамическими условиями, что может стать основой для последующих рекомендаций по мероприятиям, связанным с дноуглубительными работами.

Расчет заиления приплотинной части Куйбышевского водохранилища основан на совместном решении системы гидродинамических уравнений "мелкой воды" (разработанной к.т.н. Рахубой А.В. гидродинамической модели водохранилища) и интегрированной в нее аналитической формулы расхода наносов. Вычисления проводились по данным наблюдений за расходом воды в створе плотины Куйбышевского водохранилища в период с 15 апреля по 7 августа 2001 г.

Анализ полученных результатов показал, что интенсивность процесса заиления Куйбышевского водохранилища носит ритмичный характер и зависит от сезонного регулирования стока на ГЭС. Согласно результатам расчета, размыв дна в основном происходит в период подъема воды, а его аккумуляция –

в период спада. Для летне-осеннего периода характерен переходный озеровидный режим с наименьшей скоростью стокового течения и благоприятными условиями для осаждения на дно взвешенных наносов.

Во второй части данного раздела представлены результаты расчетов поля максимальной мутности воды в акватории Куйбышевского водохранилища, т.е. гидродинамический потенциал максимального содержания взвешенных веществ в водной массе. Расчет поля максимальной мутности воды (максимальной взвесенесущей способности потока, транспортирующей способности потока) всей акватории Куйбышевского водохранилища также основан на совместном решении системы гидродинамических уравнений "мелкой воды" (разработанной А.В. Рахубой гидродинамической модели водохранилища) и интегрированной в нее формулы транспортирующей способности потока. На Рисунке 6 приведена карта распространения максимальной мутности воды в акватории всего Куйбышевского водохранилища. Как видно из Рисунка 6 наибольшие значения мутности приходятся на области наименьших глубин в северной части водохранилища (камская ветка) и на юге в области подпора реки Б. Черемшан и превышают 300 г/м^3 . Наименьшие значения мутности приходятся на глубоководную южную и центральную часть водохранилища, приплотинный плес и составляют $100 - 200 \text{ г/м}^3$.

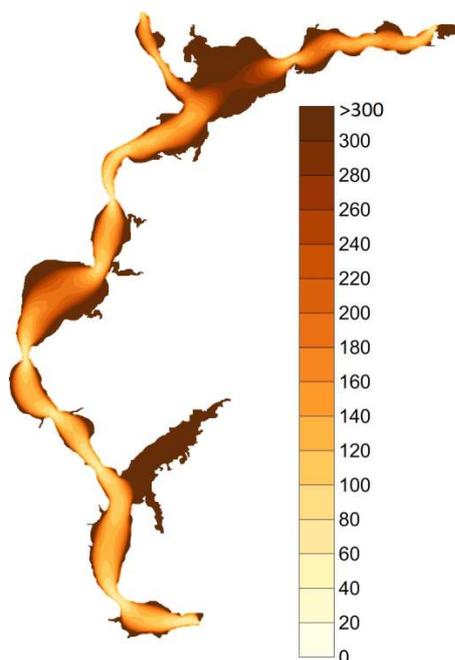


Рисунок 6 – Карта распространения максимальной мутности воды в акватории Куйбышевского водохранилища, г/м³

Глава 5. Геоэкологические задачи, связанные с оценкой мутности воды и транспорта наносов в водотоках

5.1. Оценка распространения загрязнения в русле реки Невы в результате возможной аварийной ситуации на полигоне «Красный Бор»

Река Нева — протока между Ладожским озером и Финским заливом длиной 74 км, имеет большое водохозяйственное и градообразующее значение. На водосборе реки Ижоры, одного из крупных левобережных притоков Невы, расположен полигон обезвреживания и захоронения токсичных отходов «Красный Бор». Полигон является одним из наиболее опасных источников возможного загрязнения вод Невы, Невской губы и восточной части Финского залива. Полигон расположен на расстоянии 15 км от основного русла на водосборе реки Ижоры. В настоящее время на полигоне находится более 1.8 млн. тонн ядовитых отходов (Румянцев и др., 2010). Наихудшим сценарием аварийного сброса является одновременный сброс загрязняющих веществ с карт 64 и 68 в течение 50 часов с расходом 0.08 м³/с (Румянцев и др., 2010). В основу оценки распространения загрязняющих примесей от точечных источников в русле реки Невы и возможного попадания твердых частиц с адсорбированными токсичными соединениями и растворенной примеси в водозаборы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» (Румянцев и др., 2010) при гипотетической аварийной ситуации на полигоне легла математическая модель движения воды и твердого вещества. Расчеты распространения твердых частиц–адсорбентов, транспортирующих токсичные вещества и переноса примеси в реке Нева выполнялись при среднем многолетнем значении расхода воды (2500 м³/с), а также при его экстремальных значениях 1000 м³/с и 4000 м³/с. Концентрация консервативной примеси при впадении реки Ижоры в реку Неву принималась равной 1, что позволяет провести последующий пересчет результатов моделирования на любое конкретное значение концентрации. Фоновое значение концентрации примеси в Неве принималось равным нулю. В результате расчетов

распространения примеси в поверхностном слое реки через 5 часов после начала поступления сброшенных загрязнений в Неву выявлено, что примесь, поступившая в русло Невы из Ижоры, распространяется вдоль левого берега. Турбулентная диффузия не обеспечивает полного перемешивания потока в поперечном сечении. Более детальная оценка попадания растворенной примеси в водозаборы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» может быть сделана после уточнения их расположения по ширине и глубине. В решении задачи распространения твердых частиц–адсорбентов при допущении о среднем размере частиц 0.1 мм с соответствующей гидравлической крупностью (8 мм/с), расчеты показали, что частицы не достигнут первого по пути следования оголовка водоканала и осядут приблизительно в 0.5 км от устья Ижоры.

5.2. Моделирование мутности воды реки Нарва

Река Нарва, трансграничный водоток, относится к водным объектам, подлежащих Федеральному государственному контролю и надзору за использованием и охраной водных объектов. С российской стороны осуществляется забор технической воды (около 14659 тыс. м³/год) (Схема комплексного использования..., 2014). Со стороны Эстонии вода реки Нарвы используется как охлаждающая вода для теплоэлектростанций, в качестве источника питьевого и промышленного водоснабжения.

Таким образом, актуальность оценки статистических параметров мутности воды реки Нарвы определяется ее интенсивным хозяйственным использованием. Полноценный мониторинг за гидрологическим режимом и качеством воды реки Нарва обеспечивает достаточно достоверную информацию о характеристиках стока и мутности, необходимых для полноценной организации водопользования реки различными водохозяйственными предприятиями. В связи с этим особенный интерес представляет оценка режима твердого стока реки Нарва и связанных с ним параметров распределения мутности воды в условиях возможных климатических изменений.

В работе использовались среднесуточные данные наблюдений за расходами воды и мутностью, произведенными в период с 2004 по 2017 годы

(Bobrovitskaya, Kokorev, 2003; 2004). Эти данные уникальны тем, что наблюдения за мутностью воды на гидрометрическом створе проводились ежепентадно в течение 12 лет. Автор данной работы выражает глубокую благодарность руководителю Отдела мониторинга поверхностных вод и экспедиционных исследований ФГБУ «ГГИ» д.г.н. Н.Н. Бобровицкой и и.о. зав. лаборатории наносов и эрозии Т. В. Турутиной за предоставленные данные.

Для расчетного створа р. Нарва были построены кривые распределения суточных значений расхода воды и мутности и оценены параметры этих кривых. Соответствие эмпирического распределения суточных значений расхода воды и суточной мутности воды аналитическими кривыми трехпараметрического гамма-распределения проверялось критерием согласия χ^2 (Пирсона) (Борщ С.В. и др., 2018). Гипотеза соответствия эмпирической и аналитической кривых распределения при уровне значимости $\alpha=2.5\%$ не опровергается.

Следующий этап расчетов состоял в генерировании ряда суточных расходов воды продолжительностью 100 лет заданного закона распределения. Для каждого сгенерированного значения расхода воды были рассчитаны средняя глубина потока и мутность воды. Соответствие рядов наблюдаемых и моделированных значений мутности проводилось по критерию Смирнова об однородности двух независимых выборок (Борщ С.В., 2018). Согласно проведенной оценки на соответствие двух независимых рядов следует, что сравниваемые выборки соответствуют одному закону распределения для 5% уровня значимости.

ДС моделирование мутности воды реки Нарва. В качестве климатического сценария был принят сценарий ЕСНАМ А2, описание которого было приведено в Главе 4. Параметры распределения наблюдаемых рядов метеорологических величин были откорректированы с учетом климатического прогноза. Далее были сгенерированы ряды с прогнозными значениями метеорологических элементов продолжительностью 100 лет. Эти ряды обеспечили вход в модель формирования стока согласно схеме ДС моделирующей системы, представленной в Главе 3. Согласно полученным результатам, изменение

климата приведет к уменьшению стока и увеличению мутности воды. При численной реализации прогноза ЕСНАМА2, среднее значение мутности в расчетном створе увеличится на 79 %, а медиана на 124 %. Полученные результаты могут явиться основой для задания новых ориентиров планирования водопользования с учетом возможного изменения водности р. Нарва.

ВЫВОДЫ

В основу методологии решения геоэкологических задач, связанных с оценками стока наносов, легли принципы взаимодействия и взаимовлияния гидравлических переменных состояния и твердого вещества в водном объекте. Следствием этих принципов являются взаимосвязанный расчет гидравлических переменных состояния потока и твердого вещества, динамическое в отношении донного грунта представление взаимодействия потока и дна, концепция фазового гидравлического пространства. На основе этих принципов разработан комплекс моделей и методов оценки твердого стока – математическая модель движения воды и твердого вещества, методы оценки расхода наносов и мутности воды, транспортирующей способности потока, стохастическая модель годового твердого стока, методы оценки переформирования дна водных объектов, пространственно-временных закономерностей распространения мутности воды в акватории и статистических параметров распределения мутности воды водотоков. На основе разработанных методов решены пять прикладных геоэкологических задач.

Разработанные методы и модели крайне важны, поскольку существующая в настоящее время сеть наблюдений за расходами наносов и показателями качества воды и система проведения наблюдений на отдельных водных объектах не может в полной мере обеспечить достоверный для последующих обработки и анализа материал и не представляет возможным полноценно проработать вопрос статистической оценки вариационных рядов суточных значений мутности воды. При этом развитие детерминировано-стохастических методов оценки твердого вещества в водном объекте предполагает наличие надежных детерминированных расчетных схем, достоверно описывающих физику

процессов массопереноса, что и обеспечивается разработанным комплексом моделей и методов оценки расхода наносов и мутности воды, в том числе и при отсутствии и недостаточности данных наблюдений.

Получены следующие основные результаты.

1. Разработана система уравнений двухфазного речного потока с физически обоснованными параметрами на основании сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы». Модель позволяет оценить гидравлические переменные состояния потока, расход наносов, а также интенсивность распространения примеси и твердого вещества в речном потоке. Впервые в моделях подобного типа реализовано динамическое по отношению к донному грунту сопряжение движущегося потока и дна.

2. Как следствие уравнения движения воды и твердого вещества выведена аналитическая формула общего расхода наносов. Проведенная апробация аналитической формулы расхода наносов на данных наблюдений на водотоках, лежащих в различных физико-географических зонах и характеризующихся разными гидравлично-морфометрическими параметрами, показала хорошие результаты.

3. Разработана концепция фазового гидравлического пространства, в пределах которого в условиях стационарного и равномерного режима происходит взаимосопряжение гидравлических переменных состояния потока – глубины, скорости и концентрации твердого вещества в потоке. Введено новое понятие «транспортирующий потенциал потока», которое означает массу твердого вещества, которое переносится потоком при фиксированном соотношении средней глубины и скорости речного потока (при постоянном расходе воды) в данном расчетном створе.

4. На основе концепции фазового гидравлического пространства и аналитической формулы расхода наносов выведена формула транспортирующей способности потока – максимального расхода наносов, который способен переносить поток при заданном расходе воды. Апробация концепции фазового гидравлического пространства и полученной формулы на примере данных

наблюдений на некоторых североамериканских водотоков показала хорошие результаты.

5. Разработана стохастическая модель годового твердого стока на основе композиционного метода теории вероятности и аналитической формулы расхода наносов.

6. На основе уравнений мелкой воды и аналитической формулы расхода наносов разработана модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме.

7. Проведена оценка распространения загрязнений, попавших в реку Неву из реки Ижоры при гипотетической аварийной ситуации на полигоне захоронения токсичных отходов «Красный Бор» (на основе модели двухфазного речного потока). В результате вычислений получены следующие результаты:

– Выявлен вдольбереговой характер распространения примеси, поступившей в русло Невы со стоком боковых притоков.

– Показано, что с увеличением водности увеличивается и зона распространения загрязнения, однако при этом увеличивается и кратность разбавления.

– Показано, что минимальное разбавление наблюдается у ближайшего водозабора в межень через 5 часов после поступления примеси в основное русло. Кратность разбавления в этом случае будет равна 7.

– Показано, что твердые частицы-адсорбенты с транспортируемыми токсичными соединениями не достигнут первого от устья Ижоры водозабора водоканала и будут осаждаться в 0.5 км вниз по течению р. Невы от места впадения р. Ижоры.

Полученные результаты легли в основу оценки рисков попадания загрязняющих веществ в водозаборы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

8. Впервые получена карта максимальной мутности воды Куйбышевского водохранилища, построенная при гипотетической инициации процессов взмучивания донного грунта в акватории (например, в результате гидротехнических мероприятий). Расчеты проведены на основании интегрированной в модель «Волна» (автор модели к.т.н. Рахуба А.В.) формулы транспортирующей способности потока. Особенную ценность этот результат представляет для меженного периода, характеризующегося наименьшей

глубиной потока, а значит наибольшими значениями мутности. Полученная карта позволяет оценить области акватории с наиболее неблагоприятными гидродинамическими условиями, что может стать основой для последующих рекомендаций по проведению мероприятий, связанных с дноуглубительными работами.

9. Для трансграничной реки Нарва с большой водохозяйственной нагрузкой проведена оценка параметров распределения концентрации взвешенных веществ, результаты которой хорошо согласуются с данными наблюдений. Также для реки Нарва впервые дана прогнозная оценка изменения мутности воды при реализации одного из климатических сценариев.

10. Впервые решены задачи заиления водоемов речными наносами и оценки пространственно–временного распространения наносов в акватории для водохранилища Сестрорецкий Разлив, озера Неро, приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища.

10.1. Озеро Неро. С использованием модели гидродинамики и транспорта наносов в водоеме были проведены численные эксперименты с целью оценки полей течений при реализации двух вариантов возможных гидротехнических мероприятий, направленных на улучшение водообмена и оздоровление озера Неро. Согласно первому варианту планировалась выемка донных отложений в пределах городской черты города Ростова с целью увеличения глубин в прибрежной зоне озера. Как и следовало ожидать, расчеты показали, что для участка акватории с углубленным дном скорости течения уменьшаются в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений). Расход наносов же за счет увеличения площади поперечного сечения потока незначительно вырастет непосредственно на участке углубления. Второй вариант направлен на увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья основного притока реки Сары до истока реки Вексы. Расчеты показали, что увеличение глубины на указанной траектории при сохранении переносимого количества водных масс также приведет к уменьшению скорости течений. На основании полученных результатов, были сделаны выводы: практическая

реализация этих проектов не только не приведет к улучшению водообмена в озере, но и наоборот, будет способствовать образованию застойных зон.

10.2. Сестрорецкий Разлив. Обобщая результаты гидродинамического моделирования для различных внутригодовых фаз водности (летняя межень, подъем и спад половодья), можно сделать вывод, что интенсивность намыва дна речными наносами в северной части акватории составляет $\approx 3-4$ миллиметра в год. Однако в среднем по водохранилищу значение этой величины будет на порядок меньше, что хорошо согласуется с результатами расчета среднего по акватории заиления. Ветровое перемешивание приводит к перераспределению донных отложений в акватории. При преимущественных ветрах западных направлений в процессы переформирования дна включается северная и центральная части Сестрорецкого Разлива. Наибольшая интенсивность переформирования дна приходится на места впадения притоков и стока и может составлять до 1 см в декаду на спаде половодья.

10.3. Куйбышевское водохранилище. На основе гидродинамической моделирующей системы «Волна» (автор модели к.т.н. Рахуба А.В.) и интегрированных в нее алгоритмов расчета перераспределения твердого вещества в акватории, основанных на аналитической формуле расхода наносов и формулы транспортирующей способности потока, впервые рассчитаны интенсивность переформирования дна приплотинного плеса для нестационарного режима расчета.

Выявлено, что большое значение в переформировании дна имеет гидродинамическая активность водных масс, которая связана с неустановившимся режимом стока. Наиболее интенсивно процессы переформирования дна протекают в местах руслового сужения, что объясняется резким изменением пропускной способности русла. Полученные результаты свидетельствуют, что наибольшая интенсивность размыва дна и аккумуляции наносов приходится на периоды подъема и спада половодья.

11. Впервые сформирована детерминировано-стохастическая (ДС) моделирующая система «погода – водосбор – сток – наносы» на основе

стохастической модели погоды, модели формирования стока, модели годового твердого стока и модели гидродинамики и транспорта наносов в водоеме.

12. Для водохранилища Сестрорецкий Разлив практически реализована ДС моделирующая система в режиме численного эксперимента при реализации двух сценариев изменения климата. Выявлены возможные изменения скорости заиления и перераспределения наносов по акватории в различных климатических ситуациях.

Изложенные в данной работе новые научно обоснованные решения по оценке твердого стока водных объектов в разных приложениях основаны на выполненных исследованиях и созданном комплексе методов и моделей. Детерминированно-стохастический подход к моделированию твердого стока совместно с разработанными аналитическими методами расчета расхода наносов и мутности воды позволяют получать достоверные статистические оценки этих величин при существенном дефиците данных наблюдений за твердым стоком. Практическая реализация разработанных методов на конкретных водных объектах позволила получить актуальные решения важных водохозяйственных задач как на региональном, так и на федеральном уровне.

Успешное решение поставленных геоэкологических задач, связанных с расчетами твердого стока для ряда водотоков и водоемов, расположенных в разных физико-географических зонах, дает основание применять разработанные методы и модели и на других водных объектах. Перспективы развития данной методологии направлены в первую очередь на совершенствование и расширение методов оценки твердого стока. В том числе, в качестве одного из ориентиров дальнейшего развития – разработка концепции и методов расчета вторичного загрязнения водных объектов через инициацию процессов взмучивания и транспорта донных отложений (в рамках созданной методологии).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Шмакова М.В. Математическое моделирование речных потоков. СПб: Издательство Лема, 2011. 76 с.
2. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб: Издательство Лема, 2013. 142 с.
3. Шмакова М.В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб: ВВМ, 2018. 149 с.
4. Кондратьев С.А., **Шмакова М.В.** Математическое моделирование в системе водосбор – водоток – водоем. СПб: Нестор-История, 2019. 248 с.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

5. Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Коноплев В.Н., Поздняков Ш.Р., **Шмакова М.В.** Оценка воздействия ливневых сбросов очистных сооружений Санкт-Петербурга на качество воды Невской губы (по данным математического моделирования) // Известия РГО. – 2006. – Т. 138. № 4. – С. 47 – 54.
6. Кондратьев С.А., **Шмакова М.В.** Гидродинамический режим мелководного водоема: опыт математического моделирования // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 52. – С. 88 – 102.
7. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Детерминированно-стохастическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоем // **Фундаментальная гидрофизика.** – 2018. – Т. 11. № 4. – С. 55 – 65.*
8. Кондратьев С.А., **Шмакова М.В.** Математическое моделирование как основа планирования рационального использования водных ресурсов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 48. – С. 85 – 93.
9. Кондратьев С.А., **Шмакова М.В.** Опыт создания математических моделей, описывающих процессы стока и выноса примесей с водосбора // Общество. Среда. Развитие. – 2017. – № 1 (42). – С. 80 – 84.
10. Поздняков Ш.Р., **Шмакова М.В.** Расчет расхода влекомых наносов на реках с крупнофракционными донными отложениями) // Ученые записки Российского

государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 45. – С. 20 – 27.

11. Рахуба А.В., **Шмакова М.В.** Математическое моделирование динамики заиления как фактора эвтрофирования водных масс Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. № 4. – С. 189 – 193.

12. *Рахуба А.В., Шмакова М.В. Численное моделирование заиления приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами // Метеорология и гидрология. – 2018. – №11. – С. 35 – 48.*

13. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рыбакин В.Н., Крючков А.М., Моисеенков А. И., **Шмакова М.В.**, Ершова А.А. Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева // Известия РГО. – 2010. – Т.142. – С. 24 – 31.

14. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рябченко В.А., Басова С.Л., **Шмакова М.В.** Основные факторы, определяющие функционирование водной системы Ладожское озеро – река Нева – Невская губа – восточная часть Финского залива в современных условиях // Известия РГО. – 2012. – Т. 144. № 2. – С. 55 – 69.

15. *Шмакова М.В. Аналитическая формула расхода наносов. Методика расчетов // Метеорология и гидрология. – 2013. – №8. – С. 61 – 69.*

16. **Шмакова М.В.** Гидравлические сопротивления в математическом моделировании речных потоков // Ученые записки РГГМУ. – 2015. – № 40. – С. 28 – 37.

17. *Шмакова М.В. К вопросу о соотношении расходов взвешенных и влекомых наносов в речном потоке // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 12. – С. 75 – 82.*

18. *Шмакова М.В. Математическое моделирование движения воды и твердого вещества на примере реки Невы // Метеорология и гидрология. – 2012. – №2. – С. 102 – 105.*

19. **Шмакова, М.В.** Расчет заносимости русловых карьеров / М.В. Шмакова // Ученые записки РГГМУ. 2012. – № 26. – С. 46 – 57.
20. **Шмакова М.В.,** Кондратьев С.А. Анализ и расчеты твердого стока (на примере североамериканских рек) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 43. – С. 51 – 66.
21. **Шмакова М.В.,** Кондратьев С.А. Гидродинамическое моделирование течений и транспорта наносов в водоеме при наличии макрофитов (на примере Сестрорецкого Разлива) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 49. – С. 85 – 93.
22. **Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Математическая модель движения воды и наносов в открытых руслах // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 6. С. 81 – 88.**
23. **Шмакова М.В.,** Кондратьев С.А. Оценка заиления водохранилищ по данным о годовом твердом стоке притоков (на примере Сестрорецкого Разлива) // Ученые записки РГГМУ. – 2014. – № 34. С. 134 – 141.
24. **Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки // Метеорология и гидрология. – 2014. – №9.– С. 74 – 84.**
25. **Шмакова М.В.,** Кондратьев С.А., Маркова Е.Г. Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 44. – С. 61 – 69.
26. **Шмакова М.В.,** Липовицкая И.Н. К вопросу о математическом моделировании русловых деформаций // Ученые записки РГГМУ. – 2014. – № 37. – С. 28 – 36.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

27. **Шмакова М.В.** Оценка годового стока наносов для неизученных рек // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 201461251. Дата гос. регистрации 27.02.2014.
28. Кондратьев С.А., **Шмакова М.В.** Расчет формирования стока на водосборе на основе модели ILHM // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614210. Дата гос. регистрации 09.04.2015.
29. **Шмакова М.В.** 2D модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615451. Дата гос. регистрации 08.05.2018.
30. **Шмакова М.В.** Стохастическая модель погоды // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614228. Дата гос. регистрации 09.04.2015.
31. Кондратьев С.А., **Шмакова М.В.** Математическая модель движения воды и твердого вещества в речном потоке // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612803. Дата гос. регистрации 10.03.2016.

Статьи в других изданиях:

32. Vinogradov Yu. B., Shmakova M.V. Stochastic Model of Weather at the Input of the Distributed Determined Model of Runoff Formation // NATO Advanced Research Workshop. Stochastic Models of hydrological processes and their applications to problems of environmental preservation. – Moscow, Russia, November 23 – 28, 1998. – С. 170 – 175.
33. Vinogradov Yu. B., Shmakova M.V. Stochastic Model Weather in system determined-stochastic modeling of runoff characteristics // Delft University of Technology. Abstracts of the International Workshop. River runoff minima and maxima. – St. Petersburg, June 6-8, 2001. – P. 62 – 63.
34. Виноградов Ю.Б., Шмакова М.В. 2004. Детерминированно-стохастическое моделирование характеристик стока на примере речных бассейнов различной величины // Тезисы VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 5 –

Гидрофизические явления и процессы. Формирование и изменчивость речного стока, гидрологические и водохозяйственные расчеты. – СПб. – С. 138 – 139.

35. Шмакова М.В. Гидродинамическое моделирование русловых потоков в системе математического моделирования русловых деформаций // Сб. докладов и сообщений 25 пленарного межвузовского координационного совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ. – Астрахань, 12 - 14 октября 2010 г. – С. 295 – 299.

36. Шмакова М.В. Оценка расходов наносов для неизученных рек // Труды Всероссийской научной конференции «Процессы самоорганизации в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин Fluvial-2012». – Томск, 3 – 5 июля 2012 г. – С. 93 – 98.

37. Шмакова М.В. Методика расчета расхода наносов для неизученных рек // Малые реки: экологическое состояние и перспективы развития: материалы докладов II Всероссийской конференции с международным участием (Чебоксары, 7 – 8 декабря 2012 г.). – Чебоксары: Перфектум, 2012. – С. 52 – 57.

38. Поздняков Ш.Р., Шмакова М.В. Сравнительный анализ формул расхода влекомых наносов на примере реки Ала-арча (Киргизское Алатау) // Сб. трудов II Всероссийской школы-конференции с международным участием «Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана», т. 2. – П. Борок, 18 – 22 ноября 2014 г. – С. 320 – 323.

39. Рахуба А.В., Шмакова М.В. Математическое моделирование заиления водохранилищ речными наносами // Сборник трудов четвертой всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (15-18 сентября 2015 г. г. Москва). – С. 440 – 442.

40. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Детерминированно-стохастическая оценка воздействия климатических изменений на сток с водосбора реки Невы // Сборник трудов четвертой всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (15-18 сентября 2015 г. г. Москва). – С. 302 – 304.

41. Шмакова М.В. Расчеты твердого стока рек в некоторых прикладных задачах гидрологии // Сборник трудов четвертой всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (15-18 сентября 2015 г. г. Москва). – С. 130 – 132.
42. Рахуба А.В., Шмакова М.В. Моделирование формирования рельефа дна водохранилища при неустановившемся движении воды // Теория и методы современной геоморфологии. Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН. – Симферополь, 3-8 октября 2016 г. Таврическая академия Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского. Том 1. – Стр. 377 – 381.
43. Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Кондратьев С.А. Детерминировано-стохастическое моделирование заиления водоема речными наносами // Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам. V Ладужский симпозиум. – СПб. 9 – 11 ноября 2016. – С. 145 – 149.
44. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Моделирование заиления водоема речными наносами // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции «Современные водные ресурсы: новые вызовы и пути решения» (2 – 7 октября 2017 г., г. Сочи). – С. 368 – 373.
45. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Гидродинамические аспекты восстановления экосистемы озера Неро // Труды Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития». – СПб, 19-20 декабря 2017 г. – С. 267 – 270.
46. Поздняков Ш.Р., Шмакова М.В. Расчеты расхода наносов в речных потоках. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения БГУ. – Минск, 20-23 сентября 2018 г. – С. 132 – 136.
47. Шмакова М.В. Фазовое гидравлическое пространство в расчетах транспортирующей способности речного потока // Материалы XXXIII межвузовского координационного совещания по проблеме эрозионных,

русловых и устьевых процессов. – Нижневартовск, 2 – 4 октября 2018. – С. 172 – 174.

48. Поздняков Ш.Р., Шмакова М.В. Концепция современного развития расчетных схем расхода наносов речных потоков // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Водные ресурсы России: современное состояние и управление» – Сочи, 8-14 октября 2018 г. Том II. – С. 91 – 98.

49. Шмакова М.В. Гидродинамическое моделирование реки Невы // Маккавеевские чтения – 2010 / Сборник материалов под редакцией К.М. Беркович, Г.А. Ларионов, Р.С. Чалов. – М.: МАКС Пресс, 2011. – С. 35 – 44.

50. Шмакова М.В. Формула расхода наносов в речном потоке // Маккавеевские чтения – 2011 / Сборник материалов под редакцией К.М. Беркович, Г.А. Ларионов, Р.С. Чалов – М.: МАКС Пресс, 2012. – С. 72 – 78.

51. Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Моделирование переноса примеси в реке Нева // Река Нева в экосистеме Северо - Запада России. Сб. научных трудов. СПб, 2014. – С. 45 – 52.

52. Шмакова М.В. Сравнительный анализ формул общего расхода наносов на примере рек США // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – №2. – С. 80 – 87.

53. Шмакова М.В., Рахуба А.В. Моделирование распространения максимальной мутности воды в акватории водохранилищ // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Водохранилища РФ: современные экологические проблемы, состояние, управление». – Сочи, 23 – 29 сентября 2019. – Стр. 379 – 384.

54. *Rakhuba A.V., Shmakova M.V. Mathematical modeling of water turbidity in the water body // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. – 2019. – Sci. 321 012030.*

55. Шмакова М.В. Некоторые вопросы нормирования сбросов сточных вод по взвешенным веществам // Вода: химия и экология. – 2019. – № 7 – 9. – С. 28 – 33.