

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)

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора географических наук**

Научный консультант
д.г.н. Поздняков Шамиль Рауфович

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | Стр. |
|--|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| ГЛАВА 1. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ | |
| МУТНОСТИ ВОДЫ И НАНОСОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ..... | 18 |
| 1.1. Основные характеристики твердого стока водных объектов..... | 18 |
| 1.2. Основные источники мутности водных объектов | |
| 1.3. Пространственно-временные закономерности распределения мутности в водных объектах | 26 |
| 1.4. Физико-географическое распределение твердого стока по территории Земного шара | 43 |
| 1.5. Географический обзор некоторых геоэкологических задач, связанных с транспортом наносов | 56 |
| ГЛАВА 2. РАСЧЕТЫ ТВЕРДОГО СТОКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ | |
| РЕШЕНИИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ | |
| ЗАДАЧ | 63 |
| 2.1. Заиление водохранилищ речными наносами | 64 |
| 2.2. Статистическое распределение мутности | 68 |
| 2.3. Мутность как показатель качества воды. Вопросы нормирования мутности водного объекта | 74 |
| 2.4. Расчеты поля повышенной мутности воды при дноуглублении или дампинге | 83 |
| ГЛАВА 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТВЕРДОГО СТОКА ВОДНЫХ | |
| ОБЪЕКТОВ | 97 |
| 3.1. Модель движения воды и твердого вещества в открытом русле | 98 |
| 3.2. Аналитическая формула расхода наносов | 109 |
| 3.2.1. Обзор формул общего расхода наносов, расхода взвешенных и влекомых наносов | 109 |
| 3.2.2. Вывод аналитической формулы речного потока | 127 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.3. Апробация аналитической формулы расхода наносов для рек с разной формой движения наносов | 132 |
| 3.3. Некоторые вопросы построения расчетных схем оценки твердого стока водных объектов | 145 |
| 3.4. Транспортирующая способность потока | 155 |
| 3.5. 2D модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме | 169 |
| 3.6. Модель годового твердого стока | 174 |
| 3.7. ДС моделирующая система «Погода – Сток – Наносы» | 179 |
| 3.7.1. ДС моделирование в гидрологии | 179 |
| 3.7.2. ДС моделирующая система «Погода – Сток – Наносы» | 187 |
| 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 | 205 |
| 4.1.1. Расчет годового твердого стока притоков | 209 |
| 4.1.2. Пространственно-временные закономерности переформирования дна Сестрорецкого Разлива речными наносами | 213 |
| 4.1.3. ДС моделирование пространственно-временных закономерностей переформирования дна Сестрорецкого Разлива речными наносами при реализации некоторых климатических сценариев | 221 |
| 4.2. Моделирование распространения наносов в озере Неро | 227 |
| 4.3. Моделирование переформирования дна и пространственного распространения мутности воды в Куйбышевском водохранилище | 242 |
| 4.3.1. Моделирование переформирования дна приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища | 247 |
| 4.3.2. Расчеты поля максимальной мутности воды в акватории Куйбышевского водохранилища | 252 |

| | |
|--|-----|
| ГЛАВА 5. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С ОЦЕНКОЙ МУТНОСТИ ВОДЫ И ТРАНСПОРТА НАНОСОВ В ВОДОТОКАХ | 258 |
| 5.1. Оценка распространения загрязнения в русле реки Невы в результате возможной аварийной ситуации на полигоне «Красный Бор» | 258 |
| 5.2. Моделирование мутности воды реки Нарва | 264 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 274 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 281 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ | 308 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Многообразие водных объектов по их различной физико-географической принадлежности, морфометрическим и гидравлическим характеристикам, особенностям водосборных площадей и климатическим факторам предполагает и определенные особенности охраны и рационального водохозяйственного использования таковых. При этом, оценка, прогноз и моделирование последствий неблагоприятных внешних воздействий на природные системы являются одной из важнейших прикладных задач геоэкологии [Дмитриев, 2010; Дмитриев и др., 2011]. 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 [Фролова и др., 2014]. 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. Van Rijn, 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 массопереносе 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 взвесенесущей 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 гидравлично-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 пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Астрахань, 2010); 26 пленарного межвузовского координационного совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Арзамас, 2011); XXXI Пленум Геоморфологической комиссии РАН (Астрахань, 2011); Всероссийская научная конференция «Процессы самоорганизации в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин Fluvial–2012» (Томск, 2012); 27 пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Ижевск, 2012); II Всероссийская конференция с международным участием «Малые реки: экологическое состояние и перспективы развития» (Чебоксары, 2012); 28 пленарное межвузовское координационное совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Пермь, 2013); VII Всероссийский гидрологический съезд (СПб, 2013); Международная научно-практическая конференция LXVII Герценовские чтения (СПб, 2014 г.); 29 пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Ульяновск, 2014); 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); V Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2015); Четвертая всероссийская научная конференция с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Москва, 2015); 30 пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Набережные Челны, 2015); Международная научно-практическая конференция LXIX Герценовские чтения (СПб, 2016); 31 пленарное межвузовское координационного совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых

процессов (Архангельск, 2016); XXXV Пленум Геоморфологической комиссии РАН (Симферополь, 2016); Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам. V Ладожский симпозиум. (СПб, 2016); Международная научно-практическая конференция LXX Герценовские чтения (СПб, 2017); VI Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2017); Всероссийская научная конференция «Современные водные ресурсы: новые вызовы и пути решения» (Сочи, 2017); XXXII межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Уфа, 2017); Международная научно-практическая конференция LXXI Герценовские чтения (СПб, 2018); XXXIII межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Нижневартовск, 2018); 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 – 2019); Всероссийская научно-практическая конференция «Водоохранилища 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 рисунка и 32 таблицы. Библиографический список содержит 293 наименования.

ГЛАВА 1. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ И НАНОСОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

1.1. Основные характеристики твердого стока водных объектов

Чрезвычайно огромная территория нашей страны определила и ее физико-географическое разнообразие. На территории России выделяется 13 физико-географических стран, условно однородных по орографии и циркуляционным процессам, а также характеризующихся по своеобразию географической зональности (набором природных зон или спектром высотных поясов) [Власова и др., 2005]. Водные объекты, расположенные в различных физико-географических странах или в пределах одной страны (зона (для равнинных стран) или горная область (для горных стран)) [Власова и др., 2005] могут принципиально отличаться по ряду существенных признаков – интенсивности водообмена, морфометрическим характеристикам, условиям формирования стока на водосборе. При этом известный вклад в такое различие может приносить хозяйственная деятельность на водосборе или в акватории водного объекта.

Одним из важных показателей переменных состояния двухфазной циркуляции водных масс в водном объекте является твердый сток. Твердый сток водного объекта – это находящееся в речном потоке или движущихся массах озерных вод твердое вещество различного генезиса – грунтового (твердые минеральные частицы) или органического. Минеральный твердый сток в гидрологической практике называется наносами. Движущиеся в водной массе за счет гидродинамических процессов наносы характеризуются скоростью движения и концентрацией. Твердый сток водных объектов может рассматриваться в различных приложениях – статическом (мутность воды), динамическом (расход взвешенных и влекомых наносов, общий расход наносов) и косвенно динамическом (переформирования отметок дна и берегов, заиление). Мутность воды фактически является удельной характеристикой расхода взвешенных наносов и пересчитывается в него умножением на расход воды. Применительно к расходу

наносов рассматривают разные временные масштабы обобщения – от секундного расхода наносов до месячного или годового твердого стока.

В гидрологии суши приняты следующие характеристики различных приложений твердого стока [Гидрология суши..., 1988]. Наносы – «твердые частицы, образованные в результате эрозии водосборов и русел, а также абразии берегов водоемов, переносимые водотоками, течениями в озерах, морях и водохранилищах, и формирующие их ложе» [Гидрология суши..., 1988]. Взвешенные наносы – «наносы, переносимые водным потоком во взвешенном состоянии» [Гидрология суши..., 1988]. Влекомые наносы – «наносы, перемещаемые водным потоком в придонном слое и движущиеся путем скольжения, перекачивания или сальтации» [Гидрология суши..., 1988]. Мутность воды – «весовое содержание взвешенных наносов в единице объема смеси воды с наносами» [Гидрология суши..., 1988]. Расход наносов – «количество наносов, проносимое через живое сечение потока в единицу времени» [Гидрология суши..., 1988].

Любой неустановившийся неравномерный двухфазный поток характеризуется процессами перераспределения твердого вещества в русле или акватории водного объекта (если речь идет о водоеме). При этом могут наблюдаться как процессы осаждения и взмыва твердого вещества, так транзитного следования наносов.

Неустановившееся движение потока вызвано изменением интенсивности поступления воды из верхнего створа водотока и поверхности водосбора и характеризует гидрологический режим водного объекта. Для водоема неустановившееся движение водных масс может быть инициировано помимо изменения режима притоков также и ветровыми и плотностными течениями.

Таким образом, расход наносов – это количество твердого вещества, переносимое потоком за единицу времени. Мутность воды – это концентрация наносов в единичном объеме потока. Мутность воды может быть сформирована минеральными и органическими веществами (частицы глины, песка, ил) и различными микроорганизмами, присутствующими во взвешенном состоянии в

толще водного объекта. Когда говорят о мутности, как правило рассматривают сток взвешенных наносов, не принимая во внимание наносы, перемещающиеся влечением (влекомые наносы).

Формирование стока наносов и мутности водного объекта, как и для любого природного процесса, зависит от целого комплекса причин. Однако, в зависимости от типа водного объекта, источники твердого вещества и вклад той или иной составляющей этого процесса может быть различен. Основным источником наносов для водотоков и водоемов является почвенная эрозия. Вклад почвенной эрозии в общее количество твердых частиц в водных потоках может достигать до 90 % [Эдельштейн, 2018]. Этот вклад определяется физико-механическими характеристиками почвогрунтов, слагающих водосборную площадь, типом растительности, климатическими характеристиками, а также интенсивностью антропогенной деятельности на водосборе. Поступление твердого вещества с поверхности водосбора может происходить в результате ветрового переноса пылеватых частиц, водной эрозионной деятельности микроручейковой сети в период интенсивных осадков и снеготаяния.

Стоковые течения в водоемах осуществляют как транзитный перенос наносов, так и могут инициировать взмыв и движение частиц донного грунта (механизм, аналогичный русловым процессам). В верхней части водохранилищ «режим наносов в значительной степени определяется находящейся в подпоре рекой» [Сток наносов..., 1977].

Например, по результатам многолетних исследований по перераспределению наносов в акватории Великих озер (США) [Ouyang and Bartholic, 2003; Smith, 2010; Robertson et al., 2006; Robertson, 1997; Suspended sediment..., 1997 – 2001] так и по данным математического моделирования выявлено, что повышенная мутность и процессы интенсивного отложения наносов приходятся на прибрежные участки и места впадения притоков изучаемых озер.

Для водоемов в результате сильных течений в периоды половодий и паводков, а также при ветровом воздействии начинается процесс интенсивного взмучивания донных отложений и перенос их во влекомом и взвешенном (преимущественно)

[Судольский, 1991] состоянии. Интенсивность взмучивания является функцией возраста водохранилища, характером донного грунта, особенностями морфометрии водоема, морфологии котловины.

Для искусственных водоемов (водохранилищ) веский вклад в транспорт наносов, а значит и в показатель мутности привносит процесс абразии берегов за счет их подмыва, механического воздействия ледяных полей и ветрового волнения водных масс. Ветровое волнение, подвижки льда, интенсивные течения, вызванные резкой сработкой уровня водохранилища, приводят к разрушению берегов и соответствующему увеличению содержания взвешенных веществ в воде. Последующее распределение взвешенных частиц в акватории определяется ветровыми и гравитационными течениями, расположением и водностью притоков и стоков, морфометрии водоема, морфологии котловины.

Для достаточно хорошо прогреваемых акваторий естественных и искусственных водоемов на мутность влияет и результат жизнедеятельности гидробионтов.

В работе [Буторин и др., 1975] приведена таблица с данными о количестве взвешенного вещества, поступившими в верхневолжские водохранилища в течение достаточно продолжительного периода (основание водохранилища). Из этой таблицы (Таблица 1.1) следует, что сток взвешенных наносов, вызванный продукцией гидробионтов, по отношению к стоку речных наносов составляет от 8 до 18%.

Таблица 1.1 – Количество взвешенного вещества, поступившего в верхневолжские водохранилища из различных источников [Буторин и др., 1975].

| Водохранилище | Сток наносов, тыс. т | Размыв берега и дна, тыс. т | Продукция фитопланктона и высшей водной растительности, тыс. т |
|--------------------------|----------------------|-----------------------------|--|
| Иваньковское (1937–1968) | 6250 | 14440 | 1150 |
| Углическое (1940 – 1968) | 7160 | 10700 | 550 |
| Рыбинское | 19000 | 86600 | 2900 |

| | | | |
|---------------|--|--|--|
| (1941 – 1965) | | | |
|---------------|--|--|--|

В водотоках фактором, определяющим твердый сток, после эрозии почвы является процесс перераспределения твердого вещества в русле вследствие гидродинамического взаимодействия двухфазного речного потока и подстилающей поверхности. В целом, вклад того или иного источника взвешенных веществ в водном объекте определяются фазой водности, метеорологическими условиями, а для водоемов – их проточностью [Nogesetal, 1999].

Твердый сток и мутность водного объекта, как функция климатических факторов, геоморфологических характеристик водосбора и водности, находятся в непосредственной зависимости от изменений условий формирования стока на водосборе в силу естественных природных причин или в результате хозяйственной деятельности. Все это изменяет не только среднее значение мутности воды, но и отражается на ее режиме в течение года.

Природные и антропогенные причины изменений гидрофизических и почвomeханических свойств водосбора, которые приводят к изменениям его водно-эрозионной отдачи, выражаются в качественном изменении типов подстилающей поверхности.

Осушение или обводнение территорий, аграрная деятельность на водосборе приводят к принципиальному изменению условий формирования жидкого и твердого стока – либо к повышению интенсивности вымывания почвогрунтов во время интенсивных осадков и мутность воды в водотоке резко возрастает, либо к аккумуляции взвешенных веществ на территории водосбора в пределах обводненных территорий.

Вырубка леса или лесные пожары также оказывают влияние на режим мутности и водности. Полевые исследования, проводимые во многих странах, позволили достоверно установить знак изменения стока как после удаления древостоя, так и после облесения и показали достаточно высокую изменчивость получаемых оценок [Крестовский, 1986; Bosch, Hewlett, 1982]. В работе [Bosch, Hewlett, 1982] приведены результаты исследований, проведенных на 94 водосборах

в различных районах лесной зоны (от тайги до тропических лесов), из которых следует, что из-за удаления различными способами древостоя (рубками, пожарами и вредителями леса) сток увеличивается от 20 до 90%.

Условия формирования стока на водосборе определяются и внешними климатическими причинами [Ясинский, 2012]. Влияние климатических факторов прежде всего обусловлено характером выпадающих осадков и интенсивностью снеготаяния. Продолжительные обильные осадки формируют интенсивный склоновый сток, который в значительной степени определяет перемещение почвенных частиц на территории водосбора. Весной, в период снеготаяния в балках и оврагах часто происходит сход снежных масс, сопровождающийся механическим захватом почвенных частиц. Также, механическое разрушение агрегатов почвы имеет место и при падении капель дождя [Лопатин, 1952]. Причем, это «разрушение будет тем больше, чем меньше защищена почва растительностью, чем крупнее капли дождя и чем чаще они падают, т.е. чем больше интенсивность дождя» [Лопатин, 1952]. В качестве показателя эрозионного потенциала осадков может служить эрозионный индекс дождей [Wischmeier, 1958; Эрозионные процессы, 1984]. Современный анализ изменений годовых значений метеорологических величин и их внутригодового распределения показывает однозначные отклонения от среднего климатического периода. В результате исследований выявлены пространственно-временные неоднородности тенденций изменения климата как в течение года, так и в целом по территории земного шара. На Рисунке 1.1 (позаимствованном из [NASA Global Climate Change, Vital Signs, 2018]) приводится хронологический ход среднегодовой температуры воздуха в приземном слое в среднем для планеты с 1880 по 2017 годы [NASA Global Climate Change, Vital Signs, 2018]. На этом рисунке проиллюстрирована выраженная тенденция к повышению температуры воздуха в целом по планете.

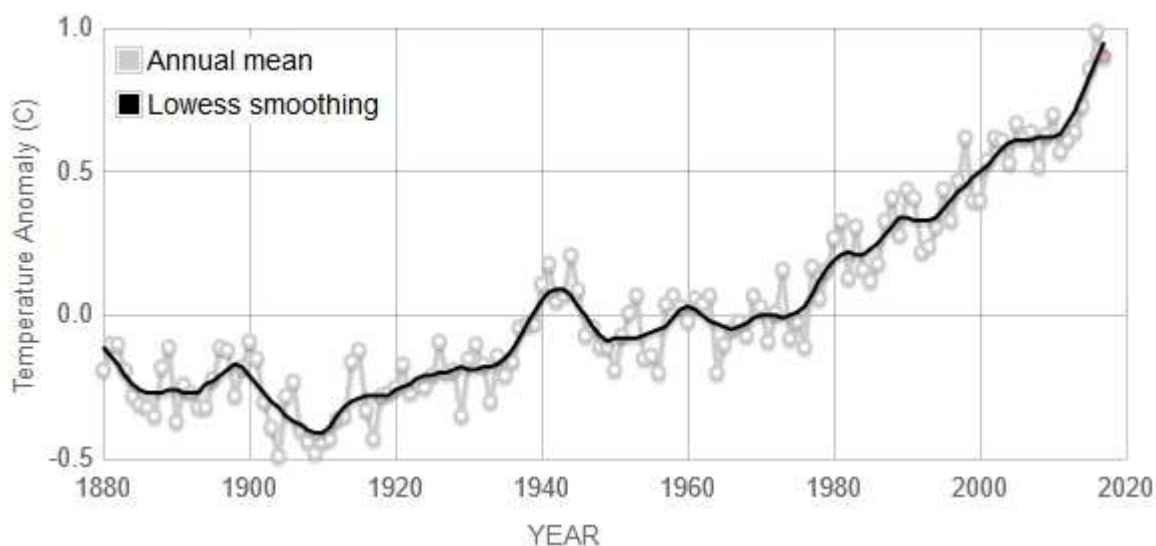


Рисунок 1.1 – Хронологический ход среднегодовой температуры воздуха в приземном слое в среднем для планеты с 1880 по 2017 годы
[NASA Global Climate Change, Vital Signs, 2018]

Общее представление о стоке наносов рек бывшего СССР можно получить из известной схемы среднегодовой мутности рек бывшего СССР, разработанной в ГГИ и представленной в работе Н.Н. Бобровицкой [Bobrovitskaya, 1996] (Рисунок 1.2). Приведенная схема может служить источником приближенной оценки средних значений мутности рек, расположенных, в том числе, в регионах с минимальной эрозионной активностью склонов. К числу таких территорий относятся, например, Карельский перешеек, Карелия и Кольский полуостров со среднегодовыми значениями мутности рек менее 10 г/м^3 . Генезис речных наносов в этой зоне установить практически невозможно.

Расход наносов и мутность водного объекта (водотока, водоема) имеют выраженное распределение как во времени, так и в пространстве. Внутригодовое распределение расхода наносов определяется фазами водности, которые регламентируют поступление аллохтонного вещества в водный объект – продукты смыва и выветривания грунтов подстилающей поверхности водосбора. Также интенсивность поступления грунта извне в одинаковые фазы водности для разных лет определяется водностью и метеорологической обстановкой отдельного года. Сезонная водность водного объекта и метеорологическая обстановка отдельных лет

также обуславливает и перераспределение автохтонного вещества, приводящегося в движение в результате различных гидродинамических процессов в пределах обозначенного водного объекта.

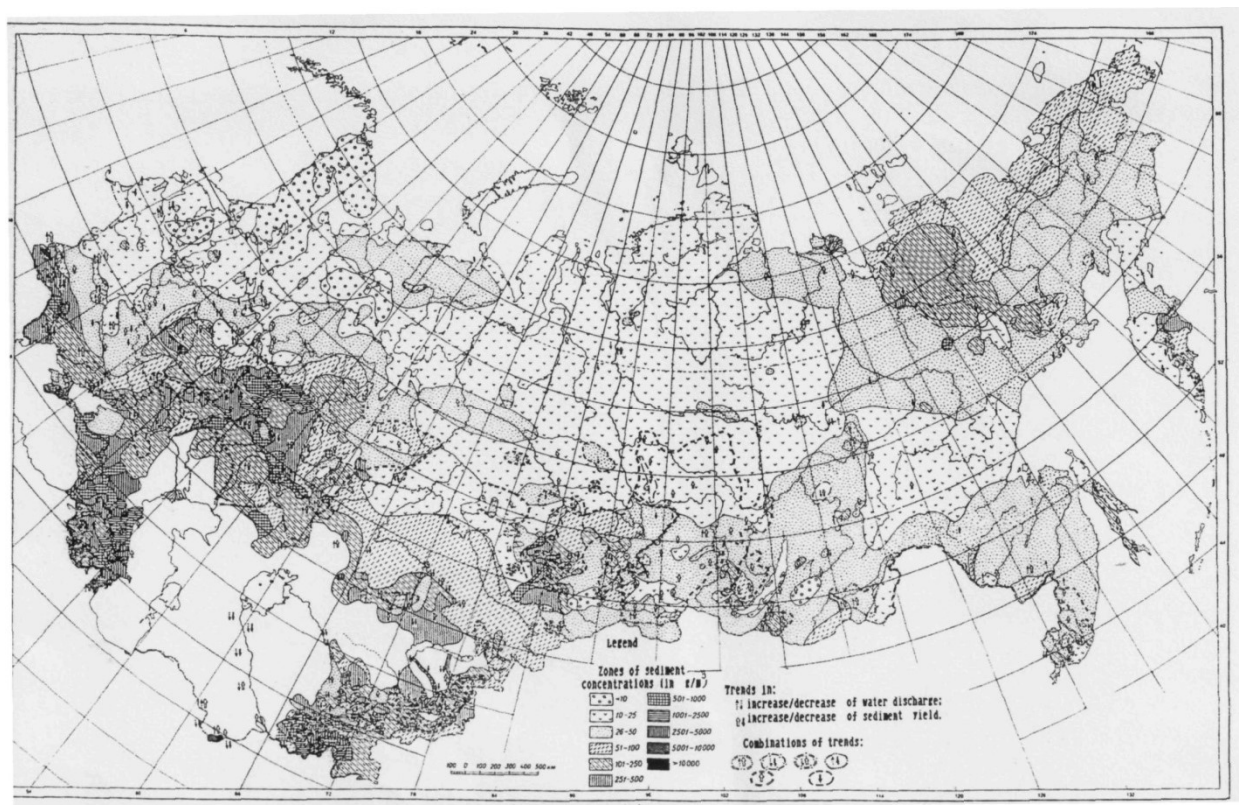


Рисунок 1.2 – Схема распределения среднегодовых значений мутности рек бывшего СССР [Bobrovitskaya, 1996]

Для водотоков и водоемов внутригодовое распределение стока наносов, сформированной частицами грунта, может различаться. Причинами этого служат принципиальное различие в их морфометрии, разные доминирующие гидродинамические процессы (например, в водотоке выраженное поступательное движение воды, в водохранилище – резкие перепады уровня за счет сработки и т.д.). По этим же причинам принципиально отличается для водотоков и водоемов пространственное распределение стока в пределах водного объекта.

1.2. Основные источники мутности водных объектов

Почвенная эрозия

Основными факторами формирования наносов являются эрозионные процессы на водосборе [Лопатин, 1952; Эрозионные процессы, 1984]. В 1952 году Г.И. Лопатин [Лопатин, 1952] выделил элементы единого эрозионно-аккумулятивного процесса:

1. склоновый сток (основная эрозионная деятельность на водосборе);
2. овражный сток (овражная эрозия);
3. речной сток (развитие речных долин, русловые деформации).

Однако замечено, что значительная часть продуктов бассейновой эрозии не поступает в речную сеть [Маккавеев и др., 1956]. Но, учитывая, что площадь водосбора, на которой может развиваться эрозия, неизмеримо больше, чем площади поверхности размыва в русловой сети, процесс эрозии верхних звеньев гидрографической сети следует рассматривать как первоисточник поступления наносов в русловые потоки [Маккавеев, 1955]. Очевидно, что объем поступающих в речную сеть наносов зависит от степени размываемости почвы, от орографии и климатических характеристик речного бассейна, а также от проводимых на территории водосбора мелиоративных мероприятий.

Влияние климатических факторов прежде всего обусловлено характером выпадающих осадков и интенсивностью снеготаяния. Продолжительные обильные осадки формируют интенсивный склоновый сток, который в значительной степени определяет перемещение почвенных частиц на территории водосбора. Весной, в период снеготаяния в балках и оврагах часто происходит сход снежных масс, сопровождающийся механическим захватом почвенных частиц. Также, механическое разрушение агрегатов почвы имеет место и при падении капель дождя [Лопатин, 1952]. Причем, это «разрушение будет тем больше, чем меньше защищена почва растительностью, чем крупнее капли дождя и чем чаще они падают, т.е. чем больше интенсивность дождя» [Лопатин, 1952]. В качестве показателя эрозионного потенциала осадков может служить эрозионный индекс дождей [Wischmeier et al., 1958; Эрозионные процессы..., 1984]. В [Эрозионные

процессы..., 1984] представлено распределение эрозионного индекса осадков на территории европейской части бывшего СССР и на Кавказе.

К косвенным факторам, определяющим процессы почвенной эрозии следует отнести палеоклиматические характеристики (характеристики климата прошлого), определяющие современный состав и свойства почвогрунтов, представленных на территории водосбора.

Следует отметить, что мелиоративные мероприятия усиливают почвенную эрозию на сельскохозяйственных угодьях. Так, воды, поступающие на поля в результате орошения сельскохозяйственных культур, также формируют нерусловые потоки, а распашка земель приводит к ослаблению связей между частицами грунта.

Характер почвогрунтов, представленных на территории водосбора определяет интенсивность эрозионных процессов. Очевидно, что интенсивность почвенной эрозии значительно возрастает в условиях легко размываемых почвогрунтов при прочих равных климатических характеристиках. В работе [Косов и др., 1975] проанализирована размываемость разных типов почв и представлена зависимость величины твердого стока от типа почвы. Противоэрозионная устойчивость может быть оценена по расчетным формулам, основывающимся на показателях донной размывающей скорости [Григорьев, Кузнецов, 1976; Эрозионные процессы..., 1984]. Также оценка противоэрозионной устойчивости почв может быть представлена системой баллов, в набор показателей которой входят такие свойства почвы, как механический, химический состав, физико-механические свойства и физическое состояние [Эрозионные процессы..., 1984].

Влияние растительного покрова, также в значительной степени обусловленного климатическими характеристиками территории, на почвенную эрозию несомненно. Определяющим в этом влиянии является характер растительности и продолжительность вегетационного периода. В работе [Лидов, 1981] замечено, что «ранней весной озимые культуры имеют слаборазвитую корневую систему и небольшое проективное покрытие, что способствует размываемости почв».

Орография, ландшафтные характеристики водосбора также имеют веское значение в процессе размывания почвы. Основной орографической характеристикой является крутизна склона, которая влияет на величину критической скорости размыва грунта и на скорость потока [Козменко, 1913; Эрозионные процессы..., 1984].

Помимо факторов, представленных выше, в [Эрозионные процессы..., 1984] приведены также такие природные факторы, определяющие овражную эрозию, как морфометрические характеристики оврагов – длина, уклоны, формы склонов, углы наклона равнинных территорий, глубины местных базисов эрозии. Характер овражной эрозии отличен от почвенной наличием больших уклонов овражных склонов и выраженным тальвегом, проходящим по дну оврага и напрямую связан с морфометрическими характеристиками оврагов и плотностью распространения оврагов на территории водосбора.

В таблице 1.2. приведен вклад в сток взвешенных наносов продуктов бассейновой или русловой эрозии для различных природных зон [Дедков, Можжерин, 2006].

Таблица 1.2 – Характер зависимостей модулей стока взвешенных наносов от площадей бассейнов в различных природных зонах равнин Земли.

| Природные зоны | I | II | Природные зоны | I | II |
|------------------------|---|----|-----------------------|---|----|
| Субарктика | - | | Субтропики Средиземья | ? | - |
| Тайга и смешанные леса | + | - | Субтропический лес | + | - |
| Широколиственный лес | + | - | Саванна | - | - |
| Лесостепь | + | - | Тропический лес | + | - |
| Степь | ? | - | Экваториальный лес | + | - |
| Полупустыня | - | - | | | |

Бассейны: I – антропогенно неосвоенные и слабоосвоенные, II – антропогенно хорошо освоенные; зависимости модулей от площадей: прямые – плюс, обратные – минус.

Согласно этой работе, прямые зависимости модулей стока наносов от площадей означают преобладание бассейновой эрозии над русловой и наоборот. Такая точка зрения подтверждается и другими исследователями [Сток наносов..., 1977; Oven, Slaimaker, 1992; Walling, Webb, 1996].

Переработка берегов водохранилищ

«Под переработкой берегов понимается совокупность физико-геологических процессов (эрозия, абразия, оползни, карст, суффозия и др.), обусловленных изменившимися в результате создания водохранилища природными условиями и приводящих к деформациям прибрежных территорий» [Рекомендации..., 1986]. «В водохранилищах может быть иное, чем в озерах, соотношение различных генетических типов взвесей» [Буторин и др., 1975], определяющих мутность. Последнее определяет и различный гранулометрический состав взвешенных веществ, что может приводить к разным пространственно-временным закономерностям распространения мутности в акваториях озер и водохранилищ.

В [Рекомендации...1986] выделяют следующие факторы, определяющие процесс переработки – геологические, геоморфологические, гидрогеологические, гидрометеорологические и техногенные. Таким образом, породы, которыми сложена береговая полоса, углы откоса по отношению к зеркалу водохранилища, уровенный режим водохранилища, ветровое волнение, течения разного генезиса, вдольбереговое перемещение наносов и ледовые явления обуславливают интенсивность переформирования берегов. Очевидно, что наиболее интенсивно процессы переформирования берегов водохранилищ приходятся на первые годы их существования.

Волнение как ветровое, так и судовое полагается одним из важнейшей гидродинамической причиной переработки берегов [Рекомендации..., 1986]. Помимо механического разрушения берега, волны «способствуют выветриванию, размоканию и растворению пород береговых склонов» [Рекомендации..., 1986].

Постоянное динамическое воздействие водных масс на береговые грунты облегчает в дальнейшем процессы выветривания.

Существенное влияние на переформирование берега оказывают волновые и стоковые течения. Достаточные скорости таких течений аналогично русловому потоку, способствуют размыву и переотложению частиц грунта на береговых отмелях [Судольский, 1991].

За счет специфики сработки водохранилища, в процессах переработки берегов существенную роль играет ледовая абразия. Разрушение берега традиционными подвижками льда при оттепелях усугубляются проседанием льда при попусках воды из водохранилища, что также активно эродировывает прибрежную мелководную зону [Рекомендации..., 1986].

Обрушению берегов также способствует влияние грунтовых вод в зоне подпора водохранилища. «...в конечном итоге это влияние приводит к просадке грунта, образованию трещин, провалов. Все это способствует обрушению берега и его отступанию». [Давыдов и др., 1973].

Согласно данным [Печеркин, 1969; Назаров, 2006], максимальная скорость переработки некоторых крупных водохранилищ в первые годы функционирования составила от 0.8 (Чебокасарское) до 10.9 (Каховское) м/год. Однако, и в настоящее время с учетом пространственно-временных неоднородностей снижение интенсивности процесса абразии берегов «происходит крайне медленно» [Назаров, 2006].

Течения и ветровое волнение в водоемах

Движение водных масс в водоеме определяет перераспределение взвешенных веществ в акватории водоема. Перемещение водных масс может быть вызвано ветровым воздействием, тепловой (плотностной) конвекцией, а стоковыми течениями, обусловленными наличием притоков и стока из водоема

Движение водных масс, вызванное ветровым перемешиванием, для неглубоких водоемов приводит к относительно равномерному перемешиванию

озерной воды. Характер и интенсивность ветрового перемешивания определяется скоростью и продолжительностью ветрового воздействия, длиной разгона, морфометрией и морфологией озера, особенностью его береговой линии [Волны, течения..., 1980]. Неоднородная вертикальная стратификация озерных вод, вызванная разностью температур и, как следствие, плотности, в крупных водоемах приводит к градиентным течениям. Эти течения могут инициировать внутренние волны, параметры которых сопоставимы с ветровыми волнами. Стоковые течения, сформированные впадающими и вытекающими из водоема водотоками, формируют транзитные сквозные течения. Площади, охваченные этими течениями, характеризуются наиболее интенсивным перераспределением твердого вещества, поступающего с впадающими реками. Наибольшая интенсивность этого перераспределения приходится на фазы большой водности – половодье и паводки. Помимо внешних сил, на динамику водных масс в водоеме определяющее влияние оказывают такие внутренние силы как сила инерции и сила внутреннего трения, которая пропорциональна коэффициенту турбулентного обмена и градиенту скорости по глубине [Волны, течения..., 1980].

При изменениях уровня водоема и скоростей течения в нем наносы, отложившиеся ранее, смываются и распределяются по всей акватории, увеличивая мутность воды. Характер и динамика мутности озер или водохранилищ обусловлены прежде всего типом водоема, его гидравликой, характеристиками водосбора и климатом.

Транзитные потоки в водоеме также подвержены воздействию волновых явлений, ветровых, сейшевых или плотностных течений [Судольский, 1991]. В результате этого изменяется направление переноса водных масс, а вместе с этим и перераспределение мутности в акватории.

Русловые процессы как показатель перераспределения наносов в русле

Процессы перераспределения твердого вещества в русле, сопровождающиеся переформированием дна и берегов, называются русловыми. Основными

природными источниками формирования мутности речного потока взвешенными частицами грунта являются продукты почвенной эрозии, поступающие с территории водосбора, наносы, поступающие из верхнего створа водотока и результат размывающей русло и берега деятельности речного потока.

Вне зависимости от источника поступления твердого вещества в речной поток, гидродинамика двухфазного потока как функция соотношения гидравлических переменных состояния определяет характер перераспределения этого вещества в русловом пространстве.

К основным гидравлическим переменным состояниям речного потока относят уклон, глубину потока, его скорость, касательное напряжение на твердой границе потока, расход воды. Основными характеристиками твердого вещества, переносимого потоком являются гидравлическая крупность, плотность, размер (диаметр) частиц. Нередко принимают в рассмотрение крупность частиц определенной обеспеченности (квантили).

Переносимое речным потоком твердое вещество называется наносами, а скорость его переноса – расходом наносов. Расход наносов, отнесенный к расходу воды, называется мутностью потока. В зависимости от характера перемещения выделяют несколько типов движения наносов – перемещение во взвешенном состоянии (взвешенные наносы), влечением, перекачиванием или сальтацией (влекомые наносы), а также перемещение на поверхности потока за счет поверхностного натяжения воды (этот процесс называется флотацией). Вклад последней формы перемещения в общий расход наносов крайне незначителен и достаточно редок. Такая форма перемещения встречается во время ветрового переноса пылеватых частиц и осаждение последних на поверхность речного потока.

Очевидно, что заданный расход воды при постоянной ширине потока может быть получен различными сочетаниями глубины и скорости. Каждому сочетанию глубины и скорости будет соответствовать определенное значение расхода наносов. Это значение 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. Эта масса твердого вещества определяет соотношение скорости и глубины потока. Транспортирующий потенциал потока меньше или равен транспортирующей способности потока (при постоянном расходе воды). Так, в зависимости от соотношения гидравлических переменных состояния потока и количества твердого вещества, переносимого им, может иметь место размыв русла (транспортирующий потенциал меньше транспортирующей способности), аккумуляция переносимых наносов (транспортирующий потенциал больше транспортирующей способности) или же динамическое равновесие. При размыве русла концентрация наносов или мутность воды в речном потоке увеличивается.

Таким образом, изменение гидравлических переменных состояния потока и перераспределение твердого вещества в потоке – это взаимосвязанный процесс, который определяется стремлением системы «двухфазный поток – русло» минимизировать свою энергию.

Вполне очевидно, что ключевым внешним фактором, определяющим мутность воды, является поступление твердого вещества извне (почвенная эрозия на водосборе и обрушение берегов за счет подмыва и подвижек льда), а основным внутренним – неравномерный и нестационарный режим движения речного потока.

Продукция гидробионтов

«Среди биотических факторов, вызывающих обогащение воды взвешенным веществом, на первом месте стоит продуцирование фитопланктона» [Буторин и др., 1975]. В [Буторин и др., 1975] полагается, что в результате продукции фитопланктона во взвешенном состоянии остается около 15% от его общей массы. Вклад же продукции зоопланктона в грунтообразующий материал, ввиду большой доли в его составе легко распадающихся до растворимых в воде продуктов, крайне незначительный [Буторин и др., 1975].

Очевидно, что продукция гидробионтов, а значит и пополнение ее сухим остатком взвешенных веществ водохранилища является функцией степени эвтрофирования водоема, гидрометеорологических факторов и различается от года к году. В благоприятные теплые годы с умеренной интенсивностью гидродинамических процессов доля сухого остатка во взвешенном состоянии значительно возрастает. В работе [Кременецкая, 2013] отмечено, что вклад «валовой первичной продукции фитопланктона в баланс взвешенных веществ увеличивается с ростом стратифицированности водной толщи».

Результатом жизнедеятельности гидробионтов помимо прочего является сухой остаток, который в силу крайне незначительного удельного веса после осаждения легко взмучивается со дна под воздействием стоковых и ветровых течений, а также волновых процессов в акватории водоема. Все это вносит соответствующий вклад в увеличение концентрации взвешенных веществ в водной массе. В отличие от результатов продуцирования фитопланктона, мутность, вызванная отмершими частицами гидробионтов, полностью определяется гидродинамическими процессами в водоеме и может быть описана основными уравнениями двухфазного массопереноса.

1.3. Пространственно-временные закономерности распределения мутности в водных объектах

Мутность водного объекта (водотока, водоема) имеет выраженное распределение как во времени так и в пространстве. Внутригодовое распределение мутности определяется фазами водности, которые регламентируют поступление аллохтонного вещества в водный объект – продукты смыва и выветривания грунтов подстилающей поверхности водосбора. Также интенсивность поступления грунта извне в одинаковые фазы водности для разных лет определяется водностью и метеорологической обстановкой отдельного года.

Сезонная водность водного объекта и метеорологическая обстановка отдельных лет также обуславливает и перераспределение автохтонного вещества,

приводящегося в движение в результате различных гидродинамических процессов в пределах обозначенного водного объекта.

Для водотоков и водоемов внутригодовое распределение мутности, сформированной частицами грунта, может различаться. Причинами этого служат принципиальное различие в их морфометрии, разные доминирующие гидродинамические процессы (например, в водотоке выраженное поступательное движение воды, в водохранилище – резкие перепады уровня за счет сработки и т.д.). По этим же причинам принципиально отличается для водотоков и водоемов пространственное распределение мутности в пределах водного объекта.

Водотоки

Вопросам пространственного распределения мутности рек с начала минувшего века было посвящено очень много исследований. Большое внимание в этих исследованиях отечественными и зарубежными учеными уделялось распределению мутности по вертикали речного потока и по длине реки. Также проводились большие исследования уже другого масштаба осреднения по анализу обобщенных материалов пространственно-временного распределения мутности (Г.И. Шамов, А.В. Караушев, Н.Н. Бобровицкая).

Количество твердого вещества, перемещаемого вдоль речного потока по направлению уклона определяется нестационарностью и неравномерностью самого потока, размываемостью донного грунта, гранулометрией переносимого грунта, а также интенсивностью поступления частиц грунта извне. Вне зависимости от того, какое количество твердого вещества переносится потоком в верхнем створе, сопряженность гидравлических переменных состояния потока и концентрации наносов определяют транспортирующий потенциал потока, а значит и количество переносимого твердого вещества нижнего створа. На эту сопряженность безусловно накладывается инерция осаждения частиц и поступательного движения всего двухфазного потока. Вполне очевидно, что

изменение транспортирующего потенциала потока приведет к перераспределению твердого веществ в русле, к русловым деформациям.

В работе [Шамов, 1959] наглядно проиллюстрированы различные профили мутности водотоков, расположенных в разных физико-географических зонах – от устойчивого понижения расхода наносов от истока к устью до устойчивого повышения, а также пилообразные профили, демонстрирующие отсутствие динамического равновесия двухфазного речного потока. На рисунке 1.3 приведен график распределения среднегодовой мутности за 1955 год по длине реки Кама, а в таблице 1.3 перечень гидрометрических створов и данные по мутности. Согласно приведенным в таблице 1.3 и на рисунке 1.3 данным изменение мутности по длине реки неоднозначно.

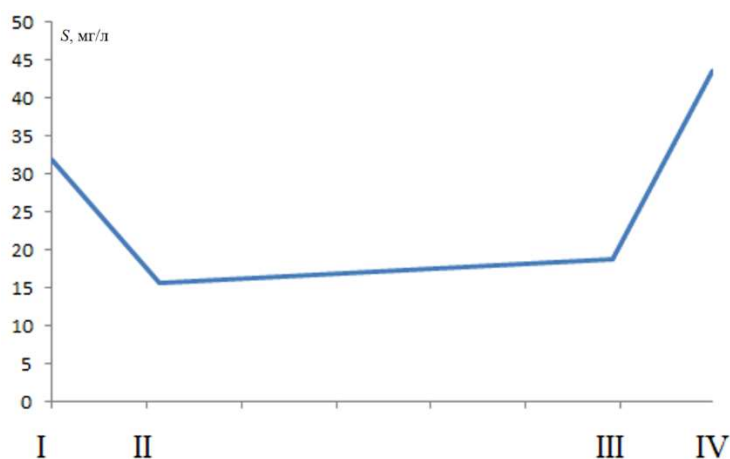


Рисунок 1.3 – Распределение среднегодовой мутности S , мг/л за 1955 год по длине реки Кама (I – р. Кама – с. Волосницкое; II – р. Кама – с. Гайны; III – р. Кама – г. Сарапул; IV – р. Кама – д. Тарловка)

Таблица 1.3 – Данные по гидрометрическим створам р. Кама, 1955 год.

| Гидрометрический створ | Расстояние от устья, км | Среднегодовая мутность, г/м ³ | Среднегодовой расход воды, м ³ /с |
|--------------------------|-------------------------|--|--|
| р. Кама - с. Волосницкое | 1685 | 31.90 | 65.1 |
| р. Кама - с. Гайны | 1458 | 15.56 | 207.1 |
| р. Кама - г. Сарапул | 503 | 18.72 | 1 549 |

| | | | |
|--------------------------|-----|-------|-------|
| р. Кама - д. Тарловка | 291 | 43.55 | 2 388 |
|--------------------------|-----|-------|-------|

В условиях стационарного движения потока попеременное увеличение и уменьшение движущихся наносов в основном может быть вызвано тремя причинами – неравномерностью русла, изменением степени размываемости донного грунта и размеров его частиц, впадением притоков.

При этом падение транспортирующего потенциала в условиях неравномерности ожидается, например, при уменьшении уклона русла, при увеличении касательного напряжения на твердой границы потока за счет увеличения ширины русла или крупности донных отложений.

Впадающие притоки, соизмеримые с размерами основного водотока, в зависимости от степени насыщенности наносами, соответственно влияют на концентрацию последних в основном потоке – уменьшая ее, увеличивая или оставляя прежней.

Увеличение степени размываемости донного грунта при меньшем, чем транспортирующая способность потока, значении транспортирующего потенциала приведет к увеличению мутности и сопровождающему этот процесс размыву дна. При транспортирующем потенциале равном транспортирующей способности потока концентрация взвешенных веществ в воде не изменится.

В целом, для многих водотоков выявлена следующая закономерность изменения мутности по длине русла. Для рек, несущих свои воды с севера на юг (реки Русской равнины) характерно увеличение мутности к устью. Это объясняется большей интенсификацией эрозионных процессов в том же направлении в сравнении с увеличением водности. Для водотоков, течение которых направлено на север (Обь, Енисей, Лена), «обогащение материалами смыва происходит значительно медленнее вниз по течению, чем увеличение их водности» [Давыдов и др., 1973]. Это является причиной уменьшения мутности воды вниз по течению.

А.В. Караушев получил следующее уравнение распространения мутности вдоль потока для деформируемого русла [Караушев, 1977]

$$S_{\text{кон}} = S_{\text{тр}} + \sum_{i=1}^m (s_{\text{нач}i} - s_{\text{тр}i}) e^{-\frac{B(u_i+k_i)\Delta x}{Q}},$$

где $S_{\text{кон}}$ и $S_{\text{нач}}$ – мутность в конце и начале расчетного участка, г/м³; $S_{\text{кон}}$ – транспортирующая способность потока, г/м³; m – количество расчетных участков; B – ширина реки, м; u – гидравлическая крупность частиц, м/с; Δx – длина расчетного участка, м; Q – расход воды, м³/с; k – коэффициент пропорциональности.

При различных соотношениях мутности на расчетном участке и транспортирующей способности потока в приведенной выше формуле имеет место размыв русла или аккумуляция наносов.

Определяющим во внутригодовом распределении мутности воды в водотоках является их физико-географическое расположение. Последнее обуславливает характер и тип подстилающей поверхности водосбора и слагающих его почвогрунтов, внутригодовую динамику метеорологических элементов, особенности русловой сети и непосредственно русловые показатели водотока. В [Сток наносов..., 1977] выделяют три группы основных факторов, обуславливающих сток наносов: климатические, геоморфологические и антропогенные.

Вполне очевидно, что сток наносов крупных рек и их мутность в естественном режиме в основном сопряжены с режимом водности. Для малых рек большое значение начинает иметь состояние их водосборных площадей – увлажненность, интенсивность снеготаяния и т.д. Также различие в режиме стока наносов для рек разной величины определяется и разницей в продолжительности прохождения периодов половодий и паводков. Для больших рек этот процесс достаточно растянут во времени, а значит и период повышенной мутности также является более продолжительным в сравнении с малыми реками.

Большинство рек России характеризуется выраженными половодьем и паводками. Эти периоды, инициированные активным снеготаянием и осадками,

сопровожаются интенсивными процессами почвенной эрозии, описание которой приводится в этой главе. Соответственно в эти многоводные фазы за счет поступления твердого вещества с поверхности водосбора и за счет увеличения транспортирующего потенциала потока, мутность возрастает. Периоды межени характеризуются относительно незначительными скоростями течения и отсутствием источников аллохтонных наносов. В этот период мутность воды снижается, а основные ее концентрации приходится на придонный слой. На период большой воды по разным данным может приходиться до 95% твердого стока от годового [Сток наносов..., 1977].

На рисунке 1.4 приведен годовой ход мутности S и расхода воды Q за 1955 год для разных гидрометрических створов реки Кама, расположенных на разном расстоянии от устья. Как видно из графиков на рисунке 1.4, наибольшие значения мутности приходятся на половодье, период с интенсивным поступлением в русловую сеть продуктов почвенной эрозии.

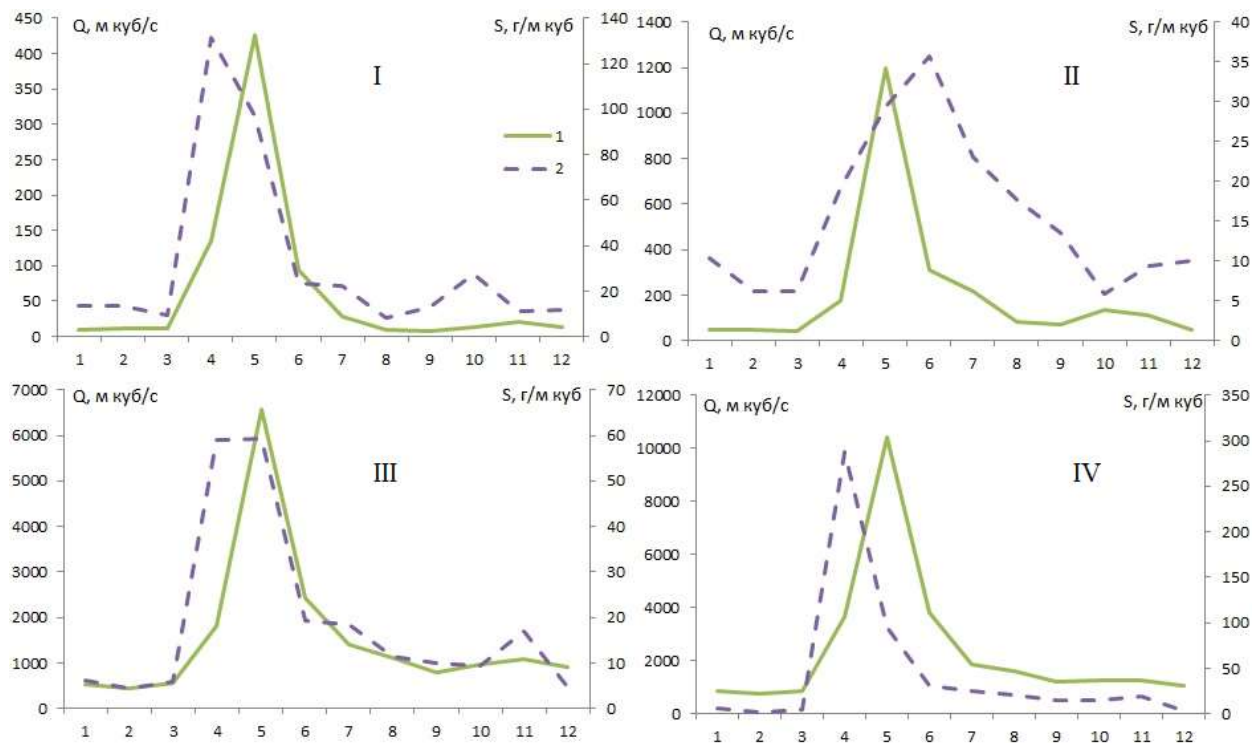


Рисунок 1.4 – Годовой ход мутности S и расхода воды Q за 1955 год для разных гидрометрических створов реки Кама (I – р. Кама – с. Волосницкое; II – р. Кама – с. Гайны; III – р. Кама – г. Сарапул; IV – р. Кама – д. Тарловка)

Озера и водохранилища

Особый интерес в исследовании мутности в акватории водоема вызывает ее распределение как в плане так и по вертикали. В отличие от водотоков, в водоемах при отсутствии стоковых транзитных течений в период активного продуцирования фитопланктона концентрация взвешенных веществ будет увеличиваться и в поверхностном слое. Вполне ожидаемо различие пространственного распределения мутности естественных водоемов (озер) и водохранилищ в силу неустоявшейся донной отмостки последних, а также активных процессов береговой переработки.

Непосредственное влияние на распределение мутности в акватории оказывает ветровое волнение, ветровые и стоковые течения, гранулометрия донного и прибрежного грунта, а также морфометрия водоема, форма его котловины. Наиболее подвержены воздействию ветра участки мелководья и прибрежной зоны. Для этих участков ветровое перемешивание водных масс достигает дна и приводит в движение донный грунт, взмучивая его и распределяя по всей глубине мелководного участка.

Ветровое и стоковое течения обеспечивают горизонтальный обмен водными массами в водохранилище, что также способствует перераспределению мутности в акватории.

Таким образом, можно полагать, что «взмыв наносов у дна определяется турбулентностью, обусловленной волнением и течением, а их взвешивание в основной толще воды — турбулентностью, зависящей от течения» [Караушев, 1977]. Исходя из этого, А.В. Караушев для описания распределения мутности по вертикали в водоемах предлагает экспоненциальное выражение, аналогичное выражению, полученному для русловых потоков [Караушев, 1977]:

$$S = S_{\text{н}} e^{-\frac{\rho u}{A_{\text{сп}}}(H-y)},$$

где S и S_n – общая на вертикали и придонная мутность, г/м^3 ; ρ – плотность воды, кг/м^3 ; H – глубина на вертикали, м; $A_{\text{ср}}$ – средний по вертикали коэффициент турбулентного обмена; u – гидравлическая крупность частиц, м/с; y – расстояние от дна, м.

Распределение мутности воды в плане по акватории водоема является неравномерным. Эту неравномерность порождают особенности морфометрии водоема, морфологии котловины и участки впадения притоков и стока. Также неравномерное распределение мутности вдоль береговой зоны вокруг водоема определяют разные по составу грунты, которыми представлены прибрежная полоса и мелководье.

Плановые очертания водоема определяют характер ветрового воздействия – разгон ветра, высоту и направление волн. Все это обуславливает интенсивность и направленность процессов взмучивания донного грунта и обмена водными массами. При выраженной извилистости береговой линии и наличии подветренных мелководных бухт мутность воды на участках этих бухт может не повышаться при ветрах относительно благоприятных для такого расположения направлений. Для относительно круглого в плане водоема с выраженными мелководными участками в прибрежной зоне концентрация взвешенных частиц в водной толще будет убывать в середине водоема.

Стоковые течения осуществляют как транзитный перенос наносов, так и могут инициировать взмыв и движение частиц донного грунта (механизм, аналогичный русловым процессам). В верхней части водохранилищ «режим наносов в значительной степени определяется находящейся в подпоре рекой» [Сток наносов..., 1977].

Существенную роль в процессах взмучивания донных отложений играют гидродинамика водных масс, вызванная сработкой уровня водохранилища. Причем, увеличение мутности воды приходится не только на мелководные участки водохранилища, но и на приплотинную часть акватории.

Период большой воды обуславливает для всех водных объектов повышенную мутность. В половодье и паводки с водосбора в водоем может поступать до 90 % годового стока наносов [Эдельштейн, 2018]. Однако, ввиду того, что внутригодовой ход уровня многих озер несколько более сглажен за счет регулирующего влияния емкости, а летние периоды как правило характеризуются продуцированием гидробионтов и ветровым перемешиванием водных масс, то внутригодовое распределение мутности может отличаться от такового для рек, расположенных в той же физико-географической зоне. В свою очередь, в отличие от озер, периоды сработки водохранилищ, инициируя выраженные стоковые течения, приводят к взмучиванию донных отложений и, как следствие, увеличению мутности. В [Зиминова, 1975] по внутригодовому распределению мутности выделяют два типа долинных водохранилищ:

1. Внутригодовое распределение мутности в водохранилище повторяет распределение мутности притоков – наименьшие значения приходятся на периоды малой водности, наибольшие значения – на период половодья и паводков. Исключения могут составлять периоды интенсивного ветрового воздействия на акваторию. Как правило, такое распределение характерно для водохранилищ недельного и сезонного регулирования.

2. Распределение мутности не имеет выраженного хода в течение года и определяется влиянием ветров на гидродинамику водохранилища, что свойственно для слабопроточных водохранилищ многолетнего регулирования.

Периоды относительно малой мутности могут наблюдаться как в летние так и в зимние сезоны. Гидравлическая крупность (скорость оседания) взвешенных частиц увеличивается по мере прогрева воды. И, по мере наступления безветренных периодов в летний сезон в водоемах может наступить так называемая фаза чистой воды [Эдельштейн, 2018]. Также осветление воды наблюдается и в подледный период при ослаблении всех гидродинамических процессов.

1.4. Физико-географическое распределение твердого стока по территории Земного шара

Распределение расхода взвешенных и влекомых наносов, мутности воды, а также годового твердого стока для различных водотоков очень разнообразно по этим показателям для всей территории земного шара и определяется, как уже отмечалось выше, физико-географическими условиями формирования почвенной эрозии и жидкого стока на территории водосбора, а также гидравлическими и морфометрическими характеристиками самих водотоков. Все это влияет не только на значение этих величин, но и на вклад взвешенных и влекомых наносов в общий расход наносов, а также на характер связи мутности воды реки с ее водностью.

В настоящее время существует достаточно много работ, посвященных изучению распространения твердого стока в различных приложениях по территории различных регионов, государств и континентов. При этом, наиболее часто встречается описание распределения годового твердого стока в устьевых участках крупных рек, впадающих в Мировой океан, а также распределение мутности речных вод на территориях разного масштаба. Работы, описывающие распределение стока взвешенных наносов, встречаются реже и имеют, как правило, частный региональный характер. Большая работа в этом направлении была проделана Г.В. Лопатиным в 50-е годы [Лопатин, 1952], Шамовым [Шамов, 1939; 1952; 1959], а в дальнейшем – сотрудниками ГГИ в 70 – 80-е годы прошлого века А.В. Караушевым, Н.Н. Бобровицкой и нашла свое выражение в построении карт мутности и расхода взвешенных наносов для всей территории бывшего СССР (Рисунок 1.2) [Bobrovitskaya, 1996]. Описание распределения стока влекомых наносов на относительно протяженной территории (не в масштабе отдельной реки) встречается исключительно редко. Для российских рек и рек бывшего СССР такие данные можно найти в издании «Ресурсы поверхностных вод СССР» в соответствующих выпусках, а также в серии монографий Шамова [Шамов, 1939; 1952; 1959]. Такая урезанность информации в отношении распространения стока влекомых наносов объясняется прежде всего определенными инструментальными сложностями измерения последних – это затруднительность проведения полевых работ и точность определения самого расхода влекомых наносов. Однако, при

оценке твердого стока рек для больших временных обобщений принимается во внимание общий расход наносов, выносимых рекой. Для этого используют интегральные данные наблюдений за изменениями отметок дна и общей площади устьевой области водотока.

Вынос твердого стока рек в Мировой океан

Значительная часть суши (80 %) относится к области внешнего стока. Причем водосборам Тихого и Атлантического океанов принадлежит 51 %, а остальные 29 % к водосборам Индийского и Северного Ледовитого океанов. По вполне понятным причинам объемы твердого стока впадающих в Мировой океан водотоков по всей береговой линии последнего являются неодинаковыми. Вклад того или иного водотока в вынос грунта определен прежде всего геологическими и климатическими условиями водосборных территорий, а в последнее время существенный вклад в процессы выноса твердого вещества со стоком рек вносит и антропогенная деятельность в пределах речного бассейна [Дедков и др., 2007]. Согласно [Дедков и др., 2007], антропогенная составляющая характеризуется усилением почвенной эрозии и последующим увеличением расхода наносов. По расчетам некоторых исследователей на антропогенную составляющую выноса твердого вещества приходится 40 – 67 % [Дедков и др., 2007].

По разным оценкам, выполненным в 1990 – 2000 годы сток наносов в Мировой океан составляет в среднем $17.3 \cdot 10^9$ т/год [Лисицин, 1991; Львович и др., 1991; Milliman, Sivitsky, 1992; McLennan, 1993; Harrison, 1994; Ludwig, Probst, 1998; Stallard, 1998; Harrison, 2000; Дедков, Мозжерин, 2000]. При этом, модуль твердого стока составляет 195 т/год·км² [Дедков и др., 2007]. На Рисунке 1.5 приведена наглядная схема распространения твердого стока по континентам и частям света, представленная в работе [Gleick, 1993]. Согласно [Gleick, 1993], наибольший вклад в поступление твердого материала с территории материков осуществляется водосборами внешних рек Азии ($6349 \cdot 10^6$ т/год), наименьший – со всего континента Австралии ($62 \cdot 10^6$ т/год).



Рисунок 1.5 – Твердый сток с внешних водосборных площадей в Мировой океан
[Gleick, 1993]

В Таблице 1.4 приведены данные о твердом стоке разных частей света и континентов земного шара по данным [Дедков и др., 2007], его природной и антропогенной составляющей. Основной вклад в поступление твердого стока в Мировой океан делают реки Азии, обладающие высокой эрозионной активностью и развитой сельскохозяйственной деятельностью на их водосборах. На их долю приходится около 59 % выносимых водотоками всего земного шара продуктов русловой и почвенной эрозии [Дедков и др., 2007]. При этом в [Дедков и др., 2007] отмечается различный вклад в выносимый твердый сток разных частей Азии. В бассейн Северного Ледовитого океана выносится в 95 раз меньше, чем в бассейны Тихого и Индийского океанов [Дедков и др., 2007]. Столь неравномерный вклад объясняется различными физико-географическими условиями формирования твердого стока на водосборах основных рек. Бассейны крупных северо-азиатских водотоков (Лена, Енисей, Обь) характеризуются большой лесистостью, слабой сельскохозяйственной освоенностью, а также достаточно обширным распространением вечной мерзлоты. Тогда как водосборы основных водотоков

южной Азии (Брахмапутра, Ганг, Хуанхэ, Меконг) сложены легко эродируемыми породами и достаточно хорошо освоены в сельскохозяйственном плане, а также на эти территории приходится высокие значения атмосферных осадков.

Ожидаемо наименьший вклад в твердый сток в Мировой океан осуществляют реки Австралии и Европы. Европейские реки характеризуются похожим с Азией различием вклада в вынос твердого стока северной и южной частей. С более аграрно освоенных южных водосборов с выраженным рельефом выносятся в Средиземное море наносов значительно больше, чем с водосборов северных европейских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан.

Австралийские реки имеют наименьший модуль выноса твердого стока по сравнению с другими частями света. Это объясняется наименьшей в сравнении с другими водотоками – притоками Мирового океана водностью рек, умеренной сельскохозяйственной деятельностью, а также соответствующими геологическими и геоморфологическими факторами.

Одного порядка значений имеет величина выноса твердого стока для таких континентов как Африка, Южная и Северная Америка – в пределах одного миллиарда тонн в год. При этом, модуль твердого стока Южной Америки на 26 и 44 % выше модуля Африки и Северной Америки соответственно. Такое превышение объясняется прежде всего климатическими факторами (обильными атмосферными осадками) и, как следствие, большой водностью южно-американских рек.

Исключительно высокий модуль выноса твердого стока приходится на острова Тихого океана. Небольшие водосборные площади островного пояса Тихого океана за счет развитого земледелия, большого годового слоя атмосферных осадков и предрасположенной к эрозии подстилающей поверхности определяют вынос твердого вещества со стоком рек с единичной площади в несколько раз выше, чем в других регионах нашей планеты.

Наибольший вклад в сток наносов в Мировой океан (около 27 %) приносят такие реки как Амазонка ($1.2 \cdot 10^9$ т/год), Хуанхэ ($1.185 \cdot 10^9$ т/год), Ганг и Браhmaпутра ($1.06 \cdot 10^9$ т/год), Янцзы (0.471) и Миссисипи ($0.4 \cdot 10^9$ т/год).

Таблица 1.4 – Данные о твердом стоке разных частей света и континентов земного шара [Дедков и др., 2007].

| Регион | Общий твердый сток | | Природная составляющая общего твердого стока | | Доля антр. стока, % | Модуль твердого стока, т/год км ² | |
|-----------------------|--------------------|------|--|------|---------------------|--|-----------|
| | млн. т/год | % | млн. т/год | % | | Общий | Природный |
| | | | | | | | |
| Европа | 579.6 | 3.8 | 171.6 | 29.6 | 71 | 69 | 20 |
| Азия | 9132.7 | 59 | 3525.2 | 38.6 | 61 | 337 | 130 |
| Африка | 1043.1 | 6.7 | 314 | 30.1 | 70 | 57 | 17 |
| Северная Америка | 1080 | 7.0 | 322.9 | 29.9 | 70 | 50 | 15 |
| Южная Америка | 1238.4 | 8.0 | 993.7 | 80.2 | 20 | 72 | 58 |
| Австралия | 164.6 | 1.1 | 54.8 | 33.3 | 67 | 44 | 15 |
| Острова Тихого океана | 2230.2 | 14.4 | 595.5 | 26.7 | 73 | 1770 | 458 |
| Земля | 15468.5 | 100 | 5977.7 | 38.6 | 61 | 158 | 61 |

Распределение мутности воды и стока взвешенных наносов водотоков Земного шара

Как было отмечено выше, 80 % водосборной площади суши относится к области внешнего стока в Мировой океан. Соответственно, 20 % водосборов суши относится к области внутреннего стока. Наибольшие площади областей внутреннего стока приходятся на Азию (12.3 млн. км²), Африку (9.6 млн. км²) и Австралию (3.9 млн. км²) – аридные и полуаридные засушливые пустынные, полупустынные и сухостепные районы [Львович, 1974].

Распределение мутности рек имеет зональный характер и отражает частные особенности формирования стока наносов. На Рисунках 1.6 и 1.7 приведены карты распространения мутности воды и модуля стока взвешенных наносов для территории Российской Федерации. Ввиду того, что сток наносов является

функцией мутности и расхода воды (но при этом, мутность также зависит от водности потока), эти карты не являются симметричными по рисунку изолиний.

Мутность водотоков на исследуемой территории меняется в самых широких пределах – от нескольких единиц до нескольких тысяч г/м³. Наименьшие значения мутности приходятся на северную европейскую часть России и Кольский полуостров, которые характеризуются зонами тундры и лесотундры, а также лесная зона побережья Финского залива. Сибири и Дальнему Востоку соответствуют средние по сравнению с прочими значения мутности – до 500 г/м³. При этом водотоки территории вечной мерзлоты и мощного растительного покрова характеризуются мутностью до 100 г/м³. В междуречье низовьев Волги и Дона в пределах Калачской возвышенности мутность колеблется от 500 до 1000 г/м³. Наибольшие значения мутности (2500 – 5000 г/м³) приходятся на водотоки, расположенные в восточной части Кавказа. Эта территория характеризуется интенсивными ливневыми осадками, вызывающими процессы селеобразования, а также обнаженными эродируемыми породами (сланцево-песчаные породы, глинистые сланцы, известняки, песчаники и глины).

На африканском континенте мутность самой полноводной реки Конго (средний сток 1460 км³/год) достаточно невелика и равняется 50 г/м³. Это объясняется достаточно залесенным водосбором в среднем и нижнем течении. Мутность второй по водоносности реки Африки Нигер (200 км³/год) превышает мутность реки Конго в четыре раза и составляет 200 г/м³. Это можно объяснить интенсивными атмосферными осадками (до 2000 мм/год) на одной из частей ее водосборной площади и достаточной эродируемостью поверхности водосбора. Сток наносов реки Нил (сток воды в дельту 91 км³/год) составляет 1200 г/м³, реки Замбези (153 км³/год) – 200 г/м³. Мутность наиболее мутных африканских рек Оранжевая (до 11 км³/год) и Лимпопо (до 5.3 км³/год) – 1500 и 6200 г/м³ соответственно [Эдельштейн, 2018].

Наибольшая азиатская река Янцзы (Голубая река) характеризуется средней мутностью 500 г/м³, средняя мутность Ганга превышает 800 г/м³.

Мутность нескольких крупных рек Северной Америки в среднем равна около 300 г/м^3 (р. Миссисипи – 430 г/м^3 ; р. Маккензи – 300 г/м^3 ; р. Юкон – $<300 \text{ г/м}^3$). В зарегулированных водохранилищами реках мутность в несколько раз ниже и составляет, например, для р. Снейк – 40 г/м^3 и для р. Св. Лаврентия – 10 г/м^3 .

Наиболее крупная река нашей планеты Амазонка протекает в Южной Америке и имеет концентрацию взвешенных веществ 190 г/м^3 [Milliman et al., 1995]. Мутность других крупных водоносных рек Южной Америки рек Уругвай и Парана составляет около 250 г/м^3 .

Особенности водного баланса Австралии определяет как вынос твердого стока с водами рек, так и мутность этих водотоков – на 456 мм/год приходится около 86% слоя испарения и оставшиеся 14% приходятся на сток [Эдельштейн, 2018].

Для сравнительной оценки интенсивности выноса наносов рекой за пределы водосбора используется такая удельная характеристика как модуль стока наносов, которая представляет собой расход влекомых/взвешенных наносов отнесенный к единице площади. В среднем модуль стока взвешенных наносов в средней для всей территории Российской Федерации находится в диапазоне от 5 до $20 \text{ т/(км}^2 \cdot \text{год)}$. Наименьшие значения модуля приходятся на север Европейской части России, Западную Сибирь и часть Восточной Сибири. Большие значения модуля стока взвешенных наносов приходятся на возвышенности степной зоны Европейской части РФ и Алтайский край, а также на горные районы Крыма, Приморья, Камчатки и Сахалина – от 20 до $100 \text{ т/(км}^2 \cdot \text{год)}$.

Западноевропейский район от Британских островов и Северогерманской низменности до Гибралтарского пролива, средиземноморских островов и берегов Мраморного и Эгейского морей характеризуется относительно незначительными значениями модуля стока наносов от 5 до $20 \text{ т/(км}^2 \cdot \text{год)}$. При этом в южной Европе с распространением виноградников и садоводством, модуль стока составляет от 20 до $50 \text{ т/(км}^2 \cdot \text{год)}$.

Наиболее велик он на юге Европы. Значения модуля в центре и на севере Пиренейского полуострова, где много эродлируемых пашен, составляют $100 - 200$

т/(км²·год), а в предгорьях 500 т/(км²·год). В предгорьях южного склона Альп и в горах Апеннинского полуострова величина модуля стока особенно велика — до 1000, а местами даже до 2000 т/(км²·год). Зимние паводки в речной системе вызывают наводнения, оставляющие толстый слой отложений на затапливаемой территории.

Для Исландско-Скандинавского района характерна слабая эрозионная деятельность на водосборах и модуль твердого стока здесь составляет 2 – 5 т/(км²·год). Однако развитое пастбищное животноводство на южных склонах Скандинавских гор приводит к увеличению модуля стока наносов до 20 т/(км²·год) [Львович, 1991].

Рекам Южноазиатского района (включая пространство от Корейского полуострова до западной границы Пакистана с бассейнами рек Хуанхэ, Янцзы, Сицзяна и Северо-Восточного Китая, Тибета с верховьями Меконга, водосборы рек Салуин, Иравади, Брахмапутры, Ганга, а также многочисленных рек полуострова Индостан и острова Шри-Ланка) соответствуют очень большие значения мутности. Модуль годового твердого стока превышает 5000 т/(км²·год) на Лессовом плато, а местами достигает 20 — 30 тыс. т/(км²·год) в бассейне Хуанхэ [Львович, 1991].

Переднеазиатский район (от побережья Мраморного и Эгейского морей до восточной границы Иранского нагорья, включая весь бассейн р. Шатт-эль-Араб) характеризуется интенсивностью эрозии от 20 т/(км²·год) на Месопотамской низменности до 200 т/(км²·год) на увлажненных склонах гор в Турции, Иране и до 500— 1000 т/(км²·год) в Закавказье [Эдельштейн, 2018].

Для рек Западноиндокитайского района (от побережья Андаманского моря до восточного водораздела бассейна Меконга) определено среднее значение модуля твердого стока в диапазоне 200 – 500 т/(км²·год).

Реки Восточноиндокитайского района (водосборы рек восточного склона хребта Чыонгшонг и бассейна р. Хонгха (Красная), а также полуострова Малакка) за счет активной сельскохозяйственной деятельности характеризуются сравнительно большим модулем стока наносов от 200 до 500 т/(км²·год).

Ближневосточный район – бассейны рек восточного побережья Средиземного моря, р. Иордан и северо-восточного побережья Персидского залива характеризуются средним значением модуля стока наносов от 10 до 20 т/(км²·год).

На африканском континенте выделяют четыре гидрологических района, которые характеризуются достаточно широким диапазоном значений модуля твердого стока в пределах каждого района [Эдельштейн, 2018]:

- Западноафриканский район (освоенные территории чередуются с эвкалиптовыми лесами, 5 – 500 т/(км²·год)) [Львович, 1991].
- Южноафриканский район (50 – 500 т/(км²·год); в бассейне Оранжевой – 890 т/(км²·год));
- Восточноафриканский район (20 – 200 т/(км²·год); на территории сельскохозяйственной освоенности до 1500 т/(км²·год)) [Львович, 1991];
- Центральноафриканский район (<10 т/(км²·год)).

За счет большой широтной и долготной протяженности на территории Северной Америки по внутригодовым колебаниям стока выделяют несколько зон по условию формирования стока и модулю стока речных наносов [Эдельштейн, 2018]:

- Лабрадор-Аляскинский район (< 10 т/(км²·год));
- Североканадский район (10 — 50 т/(км²·год));
- Центральномексиканский район (10 т/(км²·год));
- Западномексиканский район (нет данных);
- Центральноамериканский район (в горах сток наносов возрастает к югу от 100 — 200 до 500 т/(км²·год) и выше, а на Тихоокеанском побережье снижается до 50 т/(км²·год));
- Восточноканадский район (10 т/(км²·год));
- Водораздельный район (50 – 200 т/(км²·год));
- Южноканадский район (50 – 200 т/(км²·год));
- Срединный район (менее 20 т/(км²·год) во Флориде; менее 10 т/(км²·год) в пустынных районах Аризоны и Калифорнии; до 500 т/(км²·год) и более на орошаемых землях. В предгорьях Сьерра-Невады, а также в районах открытых

разработок полезных ископаемых и строительных материалов превышает 1000 т/(км²·год)) [Эдельштейн, 2018];

– Ванкуверский район (нет данных).

Для Южной Америки также выделены зоны условно однородных по генезису условий формирования стока и, как следствие, по значению модуля стока речных наносов [Эдельштейн, 2018]:

1. Срединный район (100 — 200 т/(км²·год));
2. Центральный район (>200 т/(км²·год));
3. Североаргентинский район (50 – 200 т/(км²·год)).
4. Тихоокеанский район (побережье северной части Перу и Эквадора) (5000 – 10 000 т/(км²·год)).
5. Амазонский район (20 т/(км²·год));
6. Оринокский район (50 – 200 т/(км²·год));
7. Уругвайский район (50 – 200 т/(км²·год));
8. Карибский район (водосборы Венесуэльского залива и Маракайбо), (200 — 500 т/(км²·год));
10. Патагонский район (юг континента, где областью формирования речного стока служат Анды) (500 – 1000 т/(км²·год); на почти бессточной поверхности плато <20 т/(км²·год)) [Львович, 1991].
11. Колумбийско-Гвианский район (охватывающий территорию Колумбии и Гвианского плоскогорья) (50 – 1000 т/(км²·год)).

На австралийском континенте выделяют области по водоразделам разных сторон континента. Реки северного побережья Австралии характеризуются модулем твердого стока наносов 5 – 10 т/(км²·год), в нижних течениях этих рек на территории более увлажненных водосборов модуль увеличивается до 100 т/(км²·год) и более. Это увеличение объясняется как увеличением водности и транспортирующей способности рек, так и интенсивностью эрозии на водосборах из-за перевыпаса скота [Львович, 1991].

Рекам юго-восточного побережья Австралии соответствует модуль твердого стока: на юго-восточных склонах Австралийских Альп в зоне влажных

СТОК РЕЧНЫХ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Рисунок 1.7 – Карта модуля стока взвешенных наносов рек России, кг/(год км²)

[Сток наносов..., 1977; Закономерности..., 2012]

Распределение стока влекомых наносов водотоков земного шара

Как уже отмечалось выше, несовершенная инструментальная база для регистрации влекомых наносов, ограниченное количество гидрометрических створов для измерения таковых, а также недостаточная точность их измерения и расчетов значительно осложняют обобщенную оценку пространственного распределения стока влекомых наносов. Для рек бывшего Советского Союза была проведена большая работа по расчетам средних значений годового стока влекомых наносов, основанная на восстановлении значений расхода влекомых наносов по соответствующим формулам и по параметрам гряд, меняющимся в определенные фазы водности [Сток наносов..., 1977; Алексеевский, 1990]. Такие подходы дают количественные ориентиры в оценке твердого стока влекомых наносов, но при этом на такие оценки безусловно влияют погрешности принятых расчетных методов, оцениваемые некоторыми исследователями в сотни и тысячи процентов [Шмакова, 2018].

Вполне очевидно, что водность водотока однонаправленно определяет и сток влекомых наносов. Поэтому, влияние физико-географических характеристик водосбора проявляется через изменение величины порядка реки [Закономерности..., 2012]. Согласно приведенной в [Закономерности..., 2012] Таблице 1.5 следует, что в среднем для приведенных водосборов некоторых крупных рек России и их притоков значения величины годового стока влекомых наносов находятся в диапазоне от 0.01 до 17.45 млн т/год. Исходя из приведенных в [Закономерности..., 2012] значений, можно сделать вывод о том, что вклад влекомых наносов в общий твердый сток может находиться в пределах 27 % – 59 %.

Таблица 1.5 – Сток влекомых наносов на водосборах некоторых крупных рек России [Закономерности..., 2012].

| Бассейн реки | Сток влекомых наносов (средний по бассейну), млн т/год | Диапазоны изменения стока влекомых наносов рек бассейна, млн т/год |
|----------------|--|--|
| Северная Двина | 0.325 | 0.01 – 0.71 |
| Обь | 0.859 | 0.19 – 2.89 |
| Лена | 6.415 | 0.43 – 17.45 |
| Волга | 0.136 | 0.04 – 0.40 |

1.5. Географический обзор некоторых геоэкологических задач, связанных с транспортом наносов

Двухфазный массоперенос в системе «водосбор – водный объект» определяет и соответствующую морфометрическую трансформацию этой системы. Хозяйственная деятельность на водосборной площади или в пределах водного объекта привносит существенный вклад в эту трансформацию – как в изменение интенсивности процессов преобразования системы, так и меняя направленность этих процессов. Сельскохозяйственная деятельность, промышленные выпуски сточных вод, создание водохранилищ меняют естественный ход процессов массопереноса, нередко в неблагоприятную с экологической точки зрения сторону.

Повсеместный охват антропогенной деятельностью водных объектов и их водосборов приводит к геоэкологическим катастрофам разного масштаба – от региональных до глобальных. В пределах отдельных регионов можно ожидать успешности мероприятий, направленных на восстановление водного объекта и его водосбора. Это и экономико-экологические аспекты управления хозяйственной деятельностью, и внедрение наилучших доступных технологий. Тогда как в пределах целого природного комплекса инерционность процессов, а также, возможно, их необратимость, приводят к невосполнимым потерям в облике нашей планеты и значимому ухудшению качества жизни населения. Однако при этом можно выделить и инженерные мероприятия, направленные на предупреждение природных катастроф. В качестве иллюстрации изложенного можно привести несколько примеров положительных и неблагоприятных последствий антропогенной деятельности в процессах транспорта наносов в речных и озерных системах.

Река Рейн (Западная Европа). Рейн является одним из крупнейших водотоков Центральной и Западной Европы. Вода Рейна используется для питьевого и промышленного водоснабжения, а также для нужд сельского хозяйства и энергетики. Интенсивная хозяйственная деятельность на водосборе и необдуманное водопользование в начале и середине прошлого века привело к интенсивному загрязнению воды в реке. Поступающие в нижнее течение реки и откладывающиеся на дно наносы явились также существенным источником вторичного загрязнения водного объекта.

В связи с этим в 1950 году была создана Международная комиссия по защите Рейна, а в период 1970 – 1980 годов были реализованы программы по строительству сооружений по очистке сточных и промышленных вод. Все эти мероприятия привели к значительному оздоровлению водотока и его притоков и существенному улучшению качества воды. Но при этом, загрязнение донных отложений и пойменных почв остается “наследием прошлого”. Вопросы изъятия и перезахоронения загрязненного донного грунта решается на межправительственном уровне [Heise S. and Förstner U., 2006].

Река Хуанхэ (Азия). Река Хуанхэ является одной из самых взвесенесущих рек в мире. В своем среднем течении Хуанхэ проходит через Лёссовое плато и вымывает из него большое количество породы – лёсса и песка. Всего на этом участке вымывается более 90 % всех наносов реки. Наносы откладываются в нижнем течении в соответствии с уменьшением уклона русла. При этом вертикальные деформации русла формируются в природные плотины прорывы которых приводят к катастрофическим наводнениям. «С 2540 года до н. э. до 1946 года на Хуанхэ произошло 1593 наводнения. Некоторые из этих наводнений были одними из самых страшных стихийных бедствий в мире» [<http://chydesa-mira.ru/reka-chuanche/>]. Для защиты от наводнений был создан комплекс дамб на основном русле и его притоках, длина которых превышает 5 тысяч километров, что превышает длину самой реки. Строительство современных плотин и гидротехнических сооружений на реке привело к перераспределению твердого вещества в среднем и нижнем течении и, как следствие, стихийных разливов в нижнем течении.

Великие Озера (Северная Америка). Великие Озера составляют 18% мировых запасов поверхностной пресной воды. Это богатство пресной воды поддерживает обильные и разнообразные популяции растений и животных. Ряд озер представляют систему водных путей, имеющую большое экономическое значение для США.

Продолжительный период сбросов из точечных и рассредоточенных источников от промышленных и коммунальных объектов, а также городской и сельскохозяйственный сток к Великим озерам и его притокам способствовал поступлению и накоплению токсичного вещества в экосистему.

Транспорт наносов через основные притоки в Великие Озера уже давно считается основным источником загрязнения [Moore et al., 1989]. Это обусловлено прямыми сбросами промышленных предприятий, расположенных вдоль рек. Степень вклада притока в нагрузку загрязняющими веществами взвешенных наносов является функцией транспортирующего потенциала водотоков. Например, ил и глинистые фракции транспортируются первоначально в виде дискретных

частиц, взвешенных в толще воды. Затем из них образуются агрегаты большего диаметра в результате физико-химической коагуляции. Осаждение этих агрегатов определяется гидродинамическими условиями речного потока.

Река Меконг (Азия). Большая антропогенная нагрузка на трансграничный водосбор реки Меконг и сам водоток определяет серьезные экологические проблемы дельты Меконга. Большое количество ГЭС, плотины которых задерживают твердый сток, приводит к интенсивному уменьшению площади дельты реки. Последнее совместно с общим уменьшением водности территории приводит к вторжению минерализованных океанских вод по системам проток и каналов вглубь дельты. Это все значительно ухудшает условия ведения сельского хозяйства и рыбоводства [Чан, 2019].

В связи с этим, в последнее время рассматриваются проекты по проведению исследований по изучению расходов наносов и распределению осадочных материалов по длине реки с дальнейшей разработкой комплексных рекомендаций по эффективной системой управления балансом наносов [Чан, 2019].

Краснодарское водохранилище (Восточная Европа) принято в эксплуатацию в 1973 – 1975 годах. Основная водохозяйственная нагрузка водохранилища – регулирование стока, мелиорация, промышленное и питьевое водоснабжение, рыбохозяйственная деятельность, а также рассоление до 156 тыс. га Приазовских лиманов и улучшение навигационных условий на Нижней Кубани [Лагута, Погорелов, 2018]. Слабая проточность водохранилища и большая мутность притоков приводит к интенсивным изменениям в морфометрии и морфологии Краснодарского водохранилища. По данным некоторых исследований, в акватории водохранилища задерживается более 95 – 98 % твердого стока, поступающего с притоками водохранилища и территории частного водосбора [Лагута, Погорелов, 2018]. За последние 10 лет объем заиления Краснодарского водохранилища (исключая Тшицкий водоем) оценивается в $83.2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ [Лагута, Погорелов, 2018]. Около трети объема аккумулярованных наносов приходится на устьевые взморья рек Кубань и Пшиш [Лагута, Погорелов, 2018]. Такие темпы осадконакопления без принятия необходимых мер по регулированию и

оптимизации поступления твердого стока в водохранилище неизбежно приведут к абсолютному сокращению УМО и, как следствие, деградации водохранилища в ближайшие десятилетия [Лагута, Погорелов, 2018].

Таким образом, двухфазный массоперенос системой рек и каналов является одним из ключевых факторов при планировании, проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов. Транспорт наносов определяет качество и продолжительность функционирования водохранилищ, трансформацию речных русел и устьевых участков рек, проектирование гидротехнических сооружений и качество вод для различных целей. Это все обуславливает актуальность адекватной оценки различных характеристик твердого стока (стока наносов) и разработки мер по регулированию этого стока.

Гималайские реки (Центральная Азия). Гималайские реки несут высокую концентрацию наносов с высоким содержанием твердых минералов, которые являются высокоабразивными, вызывая износ турбин гидроэлектростанций. Это приводит к накоплению миллионов тонн речных наносов в водохранилищах. Несмотря на тщательно продуманные мероприятия по седиментации, наносы проходят через генерирующие агрегаты со скоростью тысячи тонн в сутки [Naidu, 2000]. Доля кварца в общем содержании осадка может превышать 90 % и вызывает сильную эрозию, приводящую к удалению нескольких тонн стали на агрегатах во время каждого муссонного периода. В связи с этим оценка твердого стока этих рек имеет большое значение для прогноза годовой нагрузки твердым стоком, поступающего в водохранилища. Для этого необходимы дополнительные исследования и разработка в области выявления причин и смягчения последствий эрозии отложений [Naidu, 1997].

Выводы по главе

Сток наносов как с точки зрения ключевого фактора переформирования подводного рельефа водных объектов, так и со стороны показателя качества воды (мутности) является важным предметом мониторинга и контроля. Помимо этого,

реализации различных проектных решений по водопользованию должны быть обеспечены адекватными расчетными характеристиками стока наносов и мутности воды.

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 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.

При этом, наиболее востребованы расчеты, сопряженные с характеристиками твердого стока – интенсивность заиления водохранилищ, статистические параметры распределения мутности воды, поля распределения мутности в акватории, динамика переформирования дна водного объекта и многие другие.

Все вышеизложенное демонстрирует необходимость развития расчетных методов для оценки текущих и прогнозных характеристик твердого стока водных объектов. Наиболее перспективным в этом направлении представляются комплексные детерминировано-стохастические моделирующие системы, которые включают в себя модели ключевых процессов формирования жидкого и твердого стока на водосборе – начиная от климатических или метеорологических математических моделей, заканчивая моделями твердого стока водных объектов.

Как уже отмечалось, водные объекты в зависимости от своих морфометрических и гидравлических особенностей характеризуются различной

интенсивностью водообмена и гидродинамической неоднородностью акватории. Форма котловины, ее геометрические размеры, расположение притоков и стока относительно друг друга и их водность определяют области интенсивного и замедленного водообмена. Это, в свою очередь, приводит к неравномерным процессам двухфазного массообмена в акватории, таким как переформирование дна речными наносами, формирование полей мутности, распространение загрязняющих веществ из точечных источников и так далее.

Исходя из единой физики процессов, происходящих в водных объектах различного масштаба, для описания этих процессов применяют традиционные системы гидродинамических уравнений. Интенсивность водообмена и геометрические масштабы водного объекта учитываются при назначении пространственно-временных шагов расчета посредством аналитических критериев, например, число Куранта – Фридрихса – Леви. При этом интересно заметить, что при хорошо разработанном и адаптированном для природных объектов математическом аппарате, расчеты перераспределения твердого вещества в акватории до сих пор не имеют единой концепции. Это объясняется в первую очередь тем, что алгоритмы расчета транспорта твердого вещества в водных объектах нередко имеют эмпирическую природу и, как следствие, не являются универсальными. Также, одна из причин отсутствия единой расчетной схемы транспорта твердого вещества – описание этого процесса на разных структурных уровнях. Из чего следует ограничение в применении этих алгоритмов для объектов с геометрическими масштабами, отличными от заложенных в расчетные схемы. Так, например, формулы расхода наносов, полученные на лотках, часто не являются работоспособными в условиях реального водотока. В связи с этим, определенную ценность представляют единый алгоритм расчета транспорта наносов для водных объектов, характеризующихся разными геометрическими масштабами. Приведенные в Главе 3 методы расчета транспорта наносов и интенсивности переформирования дна водоемов получены из общего анализа процессов двухфазного массопереноса в водном объекте в условиях гидравлического осреднения этих процессов. Эти методы были реализованы для ряда водоемов и

водотоков, имеющих различные динамические и статические характеристики с поставленными различными геоэкологическими задачами.

Исследуемые водоемы и водотоки расположены в разных Федеральных округах европейской части РФ и в соответствии со своими размерами относятся к разным типам [Иванов, 1948]: малый – средний водоем (Сестрорецкий Разлив $F_{\text{зеркала}}=12.2 \text{ км}^2$), средний – (озеро Неро $F_{\text{зеркала}}=54.4 \text{ км}^2$), большой – (приплотинный плес Куйбышевского водохранилища $F_{\text{зеркала}}=397 \text{ км}^2$), очень большой – (Куйбышевское водохранилище $F_{\text{зеркала}}=6450 \text{ км}^2$), средний водоток (река Нарва $F_{\text{вдсб}}=56200 \text{ км}^2$, $Q_{\text{ср}}=399 \text{ м}^3/\text{с}$) и крупный водоток (река Нева $F_{\text{вдсб}}=281000 \text{ км}^2$, $Q_{\text{ср}}=2500 \text{ м}^3/\text{с}$). Для решения поставленных геоэкологических задач для каждого водного объекта была использована общая концепция двухфазного массопереноса, представленная во второй главе и разработанные на основе этой концепции методы. Геоэкологические задачи посвящены региональным проблемам водопользования и полноценного функционирования водных экосистем.

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 [Дмитриев, 2010]. В современном мире структура и функционирование водных экосистем в частности и существование водных объектов в целом напрямую зависит от характера и интенсивности прямых и косвенных антропогенных воздействий. При этом, вследствие различной инерционности водных гео- и экосистем, особенную угрозу представляет косвенное невыраженное влияние, последствия которого часто не увязывают в причинно-следственную цепь. К последствиям таких воздействий относят, например, интенсификацию процессов эвтрофирования водоема, мутацию гидробионтов, накоплению в их организмах тяжелых металлов и так далее. В отличие от косвенных, прямые антропогенные воздействия можно регулировать и превентивно оценивать их последствия. При этом, достаточно эффективным средством решения таких задач является математическое моделирование геоэкологических процессов.

Некоторые прямые антропогенные воздействия, такие, как создание водохранилищ, коммунально-бытовые и промышленные стоки, сельскохозяйственная деятельность на водосборе, добыча нерудных материалов в пределах водного объекта и на его водосборе сопряжены с процессом поступления в водных объект твердого вещества и его последующего перераспределения. Поступающие в водные объекты взвешенные вещества меняют характеристику абиотической среды для гидробионтов, что определяет качество функционирования последних. Повышенная мутность воды при, например, проведении дноуглубительных работ оказывает негативное влияние на развитие фито- и зоопланктона – от изменения циклов развития до исчезновения некоторых организмов [Шкодин, 2005].

В связи с этим, 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 и ее экстремальных значений в пределах водного объекта.

2.1. Заиление водохранилищ речными наносами

Движение водных масс в водоеме определяет перераспределение взвешенных и растворенных веществ в акватории. Перемещение водных масс может быть вызвано ветровым воздействием, тепловой (плотностной) конвекцией, а также стоковыми течениями, обусловленными наличием притоков и стока из водоема.

Движение водных масс, вызванное ветровым перемешиванием для неглубоких водоемов приводит к относительно равномерному перемешиванию озерной воды. Характер и интенсивность ветрового перемешивания определяется скоростью и продолжительностью ветрового воздействия, длиной разгона, морфометрией озера и особенностью его береговой линии [Волны, течения..., 1980]. Неоднородная вертикальная стратификация озерных вод, вызванная разностью температур и, как следствие, плотности, в крупных водоемах приводит к градиентным течениям. Эти течения могут инициировать внутренние волны, параметры которых сопоставимы с ветровыми волнами. Стоковые течения, сформированные впадающими и вытекающими из водоема водотоками, формируют транзитные сквозные течения. Площади, охваченные этими течениями, характеризуются наиболее интенсивным перераспределением твердого вещества,

поступающего с впадающими реками. Наибольшая интенсивность этого перераспределения приходится на фазы большой водности – половодье и паводки. Помимо внешних сил, на динамику водных масс в водоеме определяющее влияние оказывают такие внутренние силы как сила инерции и сила внутреннего трения, которая пропорциональна коэффициенту турбулентного обмена и градиенту скорости по глубине [Волны, течения..., 1980].

Попадающие в водоем частицы взвешенных наносов из-за малых скоростей течения начинают осаждаться. Крупные наносы осаждаются вблизи впадения притоков, мелкие же сносятся ниже. Формируется заиление водоемов, которое представляет собой изменение отметок дна, повлекшее за собой уменьшение объема воды. 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]. Вклад того или иного фактора в динамику заиления мелких озер или водохранилищ обусловлен прежде всего типом водоема, его гидравликой, характеристиками водосбора и климатом. При изменениях уровня водоема и скоростей течения в нем наносы, отложившиеся ранее, смываются и распределяются по всей акватории. Для водохранилищ выделяют три этапа заиления [Карасев, 1975]: иррегулярный (поглощение всех поступающих наносов), регулярный (потеря емкости водохранилища происходит по экспоненциальному закону с уменьшением аккумуляции во времени), заключительный (восстановление транзита наносов через водохранилище). При решении задач заиления в зависимости от поставленной задачи, полноты данных натурных наблюдений и выбранного пространственно-временного масштаба моделирования могут быть использованы следующие методы расчетов: методы, основанные на материале натурных исследований заиления (эмпирические); методы, базирующиеся на определении объемов заиления по разности транспортирующей способности потока в смежных расчетных створах и не учитывающие непрерывное изменение элементов стока при заилении (балансовые

методы) и методы, определяющие объем заиления с учетом непрерывного изменения характеристик стока и притока.

В условиях подпора реки плотиной и образования водохранилища скорость течения уменьшается, соответственно уменьшается и транспортирующий потенциал потока. Последнее приводит к постепенному осаждению транспортирующего твердого вещества. Таким образом происходит заиление водохранилища речными наносами. Это влечет за собой его занесение его мертвого объема, обмеление, зарастание высшей водной растительностью, и, как следствие, утрачивается регулирующее значение водохранилища [Водохранилища мира, 1979]. При всей актуальности мониторинга процессов переформирования дна водохранилищ, натурные наблюдения на крупных водохранилищах часто крайне затруднены и дорогостоящи. В этом случае может быть полезно численное моделирование гидродинамических внутриводоемных процессов, которое описывает двухфазный массоперенос в акватории. Также, при недостаточности данных для моделирования делается интегральная (обобщенная) оценка интенсивности осадконакопления в чаше водохранилища с предположении об его условно-равномерном распределении на дне.

Суммарная приближенная оценка продолжительности периода заполнения водоема или водохранилища наносами может быть вычислена по формуле [Горошков, 1979]:

$$T = \frac{W_B}{W_H(1-\delta)}, \quad (2.1)$$

где T – средняя продолжительность периода заиления водохранилища в годах; W_B – мертвый объем водохранилища, м³; W_H – средний годовой объем наносов, м³; δ – транзитная часть наносов мелких фракций, сбрасываемых из водохранилища при паводках, в долях от общего объема наносов, для равнинных водотоков в среднем $\delta = 0.3-0.4$.

Средний годовой объем наносов W_H , может быть определен по формуле:

$$W_n = \frac{31500R_0}{\beta}, \quad (2.2)$$

где R_0 – средний годовой расход наносов, кг/сек; β – объемный вес наносов, т/м³, равный от 0.5...0.7 для илистых наносов в первые годы отложений до 1.0...1.5 для песчаных или илистых уплотненных наносов.

Формула пересчета массы R_{cp} (т/год) твердого стока в слой δ (мм/год) имеет вид

$$\delta = \frac{R_{cp}}{\rho_{грунта} F_{зеркала}} \phi k, \quad (2.3)$$

где $F_{зеркала}$ – площадь зеркала водохранилища, км²; ϕ – плотность залегания грунта (для песка принимается равным 1.3), б/р [Рекомендации по прогнозу..., 2006]; k – доля оставшегося в акватории твердого стока, приносимого реками.

Но следует заметить, что приведенный выше метод расчета заиления водохранилищ дает лишь общую оценку условно равномерного заполнения водохранилища речными наносами. Этот метод не учитывает сложную морфометрию водохранилищ, распределение поступившего с речным стоком твердого вещества по всей акватории водохранилища и его внутригодовую динамику, обусловленную изменением водности в течение года, регулированием стока водохранилища, влиянием ветра и ледовых явлений, осыпание берегов, образование органического осадка и так далее. В связи с этим объективная оценка динамики подводного рельефа водохранилищ должна быть основана на гидродинамических уравнениях взвесенесущих водных масс и учитывать основные факторы, определяющие этот процесс.

2.2. Статистическое распределение мутности

«Большинство изучаемых гидрологией природных явлений в той или иной мере носит случайных характер. ... Это служит причиной широкого применения теории вероятностей в ряде разделов современной гидрологии, и в частности, в прогнозах характеристик гидрологического режима водных объектов» [Борщ и др., 2018]. Мутность водных объектов, как и прочие гидрологические явления и процессы, представляет собой функцию многих определенных (детерминированных) факторов. Многофакторность явления всегда оставляет достаточную неопределенность в его оценке. Последнее позволяет полагать это явление случайным и применять по отношению к величинам, его характеризующим, аппарат математической статистики.

В основе любого статистического анализа всегда должно лежать понимание закона распределения, которому соответствует распределение случайной величины. Важной составляющей статистического анализа является оценка соответствия аналитического закона распределения и распределения гидрологической величины и оценка параметров этого распределения. Построение эмпирической кривой распределения предваряет вычисление вероятностей каждого члена ранжированного ряда. Одной из важных задач статистической гидрологии или, как пишет Ю.Б. Виноградов, «гидрологической спецификой проблемы» [Виноградов, 2008] является несмещенная оценка этих вероятностей. В исследованиях, посвященных этому вопросу [Виноградов, 1988; Виноградов, 2008; Картвелишвили, 1981] рекомендуются функциональное задание для расчета вероятности крайних членов (например, [Gumbel, 1958; 1963]). Также Ю.Б. Виноградов [Виноградов, 2008] предлагает процедуру сглаживания исходного ранжированного вариационного ряда осреднением смежных членов – первого и второго, второго и третьего и т.д.

На основе многочисленных исследований в области гидрологических расчетов выявлены основные законы распределения гидрологических величин [Соколовский, 1959; Борщ и др., 2018]. Причем, одна и та же величина в

зависимости от временного масштаба осреднения или выборки из ряда наблюдений за этой величиной ее экстремальных значений (например, максимального или минимального стока) может подчиняться разным законам распределения. Например, с увеличением масштаба обобщения, распределение гидрологических рядов начинает соответствовать нормальному закону распределения (Рисунок 2.1). Наиболее применимыми в статистической гидрологии законами распределения являются

– для дискретных величин (например, оценка сплошности ледового поля в баллах): биномиальное распределение, распределение вероятностей Пуассона;

– для непрерывных величин: нормальный закон распределения (среднегодовой расход воды), лог-нормальный закон распределения, закон распределения Пирсона III типа (гамма-распределение), трехпараметрическое гамма-распределение (распределение Крицкого-Менкеля) (суточные расходы воды), законы распределения Гамбела и Джонсона.

Как в прежних рекомендациях [Определение..., 1985; Пособие..., 1984], так и в современных действующих нормативах [СП 33-101-2003] основным распределением речного стока полагается принимать трех-параметрическое гамма-распределение. При этом уместно отметить позицию Ю.Б. Виноградова [Виноградов, 1988]: «С моей точки зрения, единственным распределением, имеющим право претендовать на это, является нормальное» [Виноградов, 1988]. Некоторые исследователи, например, Картвелишвили [Картвелишвили, 1981] и Ю.Б. Виноградов [Виноградов, 1988] для приведения распределения ряда случайной гидрологической величины к нормальному закону распределения предлагает нормализовать значения ряда посредством некоторых функциональных преобразований. Причем, как параметры нормализации, так и параметры предполагаемого нормального распределения оцениваются в результате оптимизации – достижения максимального соответствия аналитической и эмпирической нормализованной кривых распределения [Виноградов, 1988]. Этот подход является достаточно эффективным и был использован в настоящей работе для нормализации рядов суточных расходов воды.

Приведенный в работе [Смыжова, 2010] анализ соответствия эмпирических и аналитических кривых распределения показал, что «для измеренных и средних годовых показателей биогенного загрязнения речных вод оптимальным законом распределения является закон Пирсона III-его типа. Следующим за ним по критерию согласия с эмпирическими данными является закон распределения Гамбела» [Смыжова, 2010].

Однако некачественные, редкие и нерегулярные данные наблюдений приводят к недостоверным статистическим оценкам, что чревато заданием ошибочных качественных и количественных ориентиров для различных сфер водопользования. К таким наблюдениям в гидрологии относят, прежде всего, показатели качества воды – гидрохимические наблюдения и мутность. Ситуацию усугубляет то, что данные наблюдений могут быть неоднородными по своему генезису – наблюдения в условиях естественного фона дополняются значениями, измеренными на момент техногенных влияний или аномальных погодных условий.

В связи с этим, в настоящее время крайне актуальны исследования, направленные на изучение проблемы статистической оценки гидрохимических рядов в условиях редких неэквидистентных наблюдений [Шелутко, 2013; Шелутко, 2015]. Учет неэквидистентности при расчетах среднегодового значения концентрации рекомендуется проводить интегральным способом, рассчитывая площади под кривыми хронологического хода концентрации (в предположении о линейном характере изменений концентраций между точками измерений) [Шелутко, 2010]. При этом, помимо прочего, в [Шелутко, 2010] рекомендуется проводить разделение данных наблюдений на две группы и их последующий анализ. В первую группу попадают данные, измеренные в условиях естественного природного фона, во вторую группу – данные, полученные в результате измерений в условиях антропогенного воздействия и аварийных или экстремальных условиях. В [Шелутко, 2008] показана эффективность сопряжения концентрации гидрохимических показателей с измеренными расходами воды для оценки средних значений концентрации.

Помимо нерегулярности данных наблюдений за гидрохимическими показателями и мутностью воды, существенной проблемой является отнесение эмпирического распределения этих величин конкретному закону распределения. «В настоящее время достаточно широко обсуждается вопрос о том, что функции распределения химических показателей качества воды не подчиняется нормальному закону распределения [Банникова, 2011; Лепихин, Мирошниченко, 1997; Лепихин, Мирошниченко, 2002]» [Лепихин, Возняк, 2012].

В приведенном в работе [Лепихин, Возняк, 2012] исследовании показано, что лишь для 50% исследуемых гидрометрических створов распределение мутности соответствует нормальному закону. Причем, в качестве расчетного материала использовались среднемесячные данные наблюдений, которые в силу осреднения по времени уже являются сглаженными. Из чего можно сделать вывод о том, что количество створов, для которых будет иметь место соответствие распределения суточных значений мутности воды нормальному, будет еще меньше. Основным выводом [Лепихин, Возняк, 2012] является то, что «...учитывая сложный характер статистических распределений химических показателей качества воды водных объектов, оценка их характерных значений должна проводиться не на основе параметрического показателя – среднеарифметических значений, а на основе квантилей» [Лепихин, Возняк, 2012]. Причем, в [Возняк, Лепихин, 2018] рекомендуется во избежание рассмотрения экстремальных концентраций иного генезиса использование квантилей 25 % и 75 % обеспеченности (против традиционно используемых в гидрологии до 10 % и выше 90 % обеспеченности). Аналогичный подход рекомендуется также, например, в [US EPA, 2000].

Однако все это не решает вопрос определения закона распределения и достоверности параметрических или непараметрических оценок. Вместе с этим, изученность процессов формирования качества природных вод и создание достаточного арсенала расчетных методов позволяют в настоящее время воспроизводить (моделировать) с приемлемой точностью основные показатели качества воды. К наиболее успешным математическим аппроксимациям, в силу физико-механических особенностей природного процесса, можно отнести модели

транспорта наносов в водных объектах, которые являются частным приложением своего удельного показателя – мутности воды. В этой связи расширить возможности статистического анализа показателей качества воды позволяет комплексный подход к оценке последних посредством хорошо зарекомендовавших себя детерминированных и стохастических алгоритмов расчета с аргументами, наблюдаемыми регулярно и продолжительно.

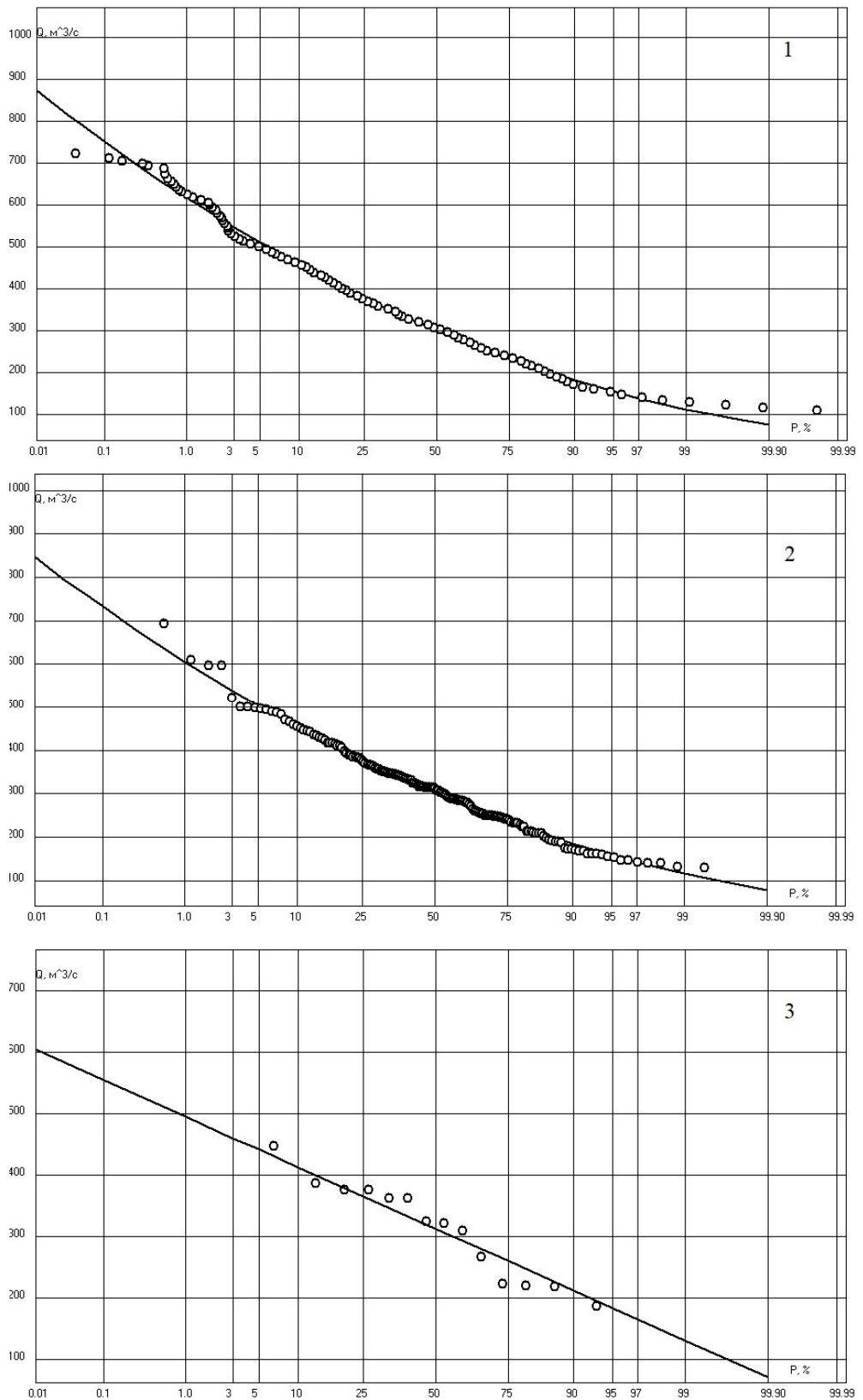


Рисунок 2.1 – Эмпирические (o) и аналитические (–) кривые распределения суточных (1), среднемесячных (2) и среднегодовых (3) расходов воды в клетчатке нормального закона распределения, р. Нарва – д. Скамья, 2004 – 2017 гг.

2.3. Мутность как показатель качества воды.

Вопросы нормирования мутности водного объекта

Актуальность мониторинга и контроля качества воды обусловлена в первую очередь потребностью живых организмов в существовании при естественных показателях природной среды, представленной воздухом, водой и почвой. Соответствие качества окружающей среды природному фону – важнейшее условие полноценной жизнедеятельности многих экосистем. Необходимость организации полноценного мониторинга, оценка качества природных вод и развития расчетных методов оценки концентрации взвешенных веществ в водных объектах определяется экологическими, рекреационными, рыбо- и водохозяйственными аспектами. Для производственных ориентиров водопользования также необходима разработка стандартов качества водных объектов, то есть нормирование.

«Качество воды в основном определяется составом и количеством растворенных и взвешенных веществ, биомассы и микроорганизмов» [Методические основы..., 1987]. Взвешенные вещества – это минеральные и органические вещества (частицы глины, песка, ил) и различные микроорганизмы, присутствующие во взвешенном состоянии в толще водного объекта. Количественными характеристиками взвешенных веществ в водном объекте может служить расход взвешенных наносов или его удельный показатель – концентрация взвешенных веществ или мутность воды.

В последнее время появилось много работ, направленных на изучение влияния нагрузки избыточной мутности на водные экосистемы начиная от основания пищевой цепи фитопланктона и заканчивая консументами высших порядков, например, [Максимова, 2002; Кондратьева и др., 2012; Лепихин, Головачева, 2015; Зиновьев, Китаев, 2015]. Причем, ввиду того, что фитопланктон является основным продуцентом автохтонного органического вещества, последствия воздействия повышенной концентрации взвешенных веществ могут затронуть все звенья пищевой системы и нанести ущерб экосистеме в целом. Избыточная мутность воды приводит к «засорению фильтрующих и

пищеварительных органов водных организмов, сокращению их видового состава, замедлению роста, численности и биомассы» [Кондратьева и др., 2012].

Концентрация взвешенных веществ (или мутность воды) в водохранилище определяет прозрачность воды и, как следствие, проникновение света, интенсивность прогревания, а также сорбционные процессы и интенсивность фотосинтеза. Все это влияет на качество воды и жизнедеятельность водных организмов.

В [Зиновьев, Китаев, 2015] подробно рассматривается целый комплекс негативных факторов прямого и косвенного воздействия повышенной мутности на гидробионты. Среди прочего, в [Зиновьев, Китаев, 2015] замечено, что в зависимости от продолжительности периода повышенной мутности «могут происходить выпадения ряда звеньев в цепях питания и взаимодействия биосистем или общая деградация экосистем» [Зиновьев, Китаев, 2015]. Однако, «наряду с отрицательным механическим воздействием на экосистемы водных объектов взвешенные вещества выступают и в качестве транспортера, переносчика высокотоксичных поллютантов» [Лепихин, Головачева, 2015]. Тем не менее, многие исследования свидетельствуют о крайне губительном воздействии повышенной мутности на жизнедеятельность гидробионтов, например, [Billard, 1982; Cooper, 1965; River, 1984; Wildish, 1985].

Согласно [Лепихин, Головачева, 2015], при регламентации отведения ВВ в водные объекты в качестве лимитирующего фактора, как правило, рассматривают гидробионты. В этой же работе [Лепихин, Головачева, 2015] исследуются особенности влияния мелкодисперсных взвесей разного гранулометрического состава на водоросли. На Рисунке 2.2, позаимствованном из [Лепихин, Головачева, 2015], представлены кривые влияния критических концентраций (S) взвешенных веществ на развитие фитопланктона в зависимости от сорбционной емкости (E) взвешенных материалов.

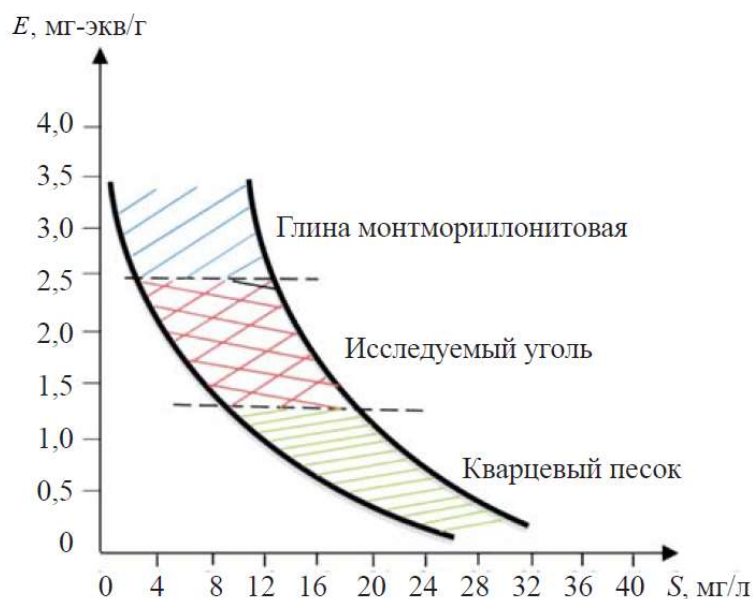


Рисунок 2.2 – Влияние критических концентраций (S) взвешенных веществ на развитие фитопланктона в зависимости от сорбционной емкости (G) взвешенных материалов [Лепихин, Головачева, 2015]

В работе [Кондратьева и др., 2012] выявлено, что в зоне работы земснаряда в районе Камского и Волжско–Камского плесов Куйбышевского водохранилища имеет место снижение численности фитопланктона в 2.2 ± 1.1 раза, зоопланктона – в 1.4 ± 0.2 , зообентоса – в 5.2 ± 1.8 раза.

Использование прибрежных территорий и вод поверхности суши является благоприятным времяпрепровождением для отдыха и укрепления здоровья населения. С 70-х годов прошлого века Всемирная организация здравоохранения разработала положения, определяющие безопасное использование водных объектов в рекреационных целях [Guidelines...2003; Water recreation and disease, 2005]. В этих положениях представлена классификация качества воды по данным мониторинга и прописаны риски для здоровья отдыхающих, вызванные загрязнением водных объектов. Требования к качеству воды в водных объектах, используемых в рекреационных целях в Российской Федерации приведены в СанПиН 2.1.5.980-00 [СанПиН 2.1.5.980-00]. Согласно этим нормативам в таких водных объектах нормируется среди прочих показателей качества и содержание

взвешенных веществ. Вопросы качества и нормирования вод, в том числе и по такому показателю, как взвешенные вещества (ВВ), поднимался в середине прошлого века и зарубежными исследователями, например, [Brown, 1970; Hines, 1975] и более поздние работы [Boyd, 2000].

Концентрация взвешенных веществ является одним из принятых к мониторингу показателей качества воды практически во всех программах контроля по гидрологическим и гидрохимическим показателям многих стран [Гагарина, 2012]. «Взвешенные вещества (ВВ) являются одними из наиболее распространенных контролируемых и регламентируемых показателей качества воды» [Лепихин, Головачева, 2015]. Например, в [Владимиров, Орлов, 2009] в таблице «Экологические классы качества поверхностных вод суши» приводятся следующие концентрации взвешенных веществ (мг/дм^3) и их соответствие загрязненности природных вод: 20 – очень чистые; 30 – чистые; 50 – весьма незначительно загрязненные; 100 – незначительно загрязненные; 200 – сильно загрязненные; 200 – очень сильно загрязненные. В зависимости от хозяйственного назначения водного объекта, значения допустимые концентрации могут различаться. В [СанПиН 2.1.4.1074-01] мутность в рамках благоприятных органолептических свойств воды определяется в пределах 1.5 – 2.0 мг/л.

Как в [СанПиН 2.1.5.980-00] так и в [Приказ Минсельхоз России..., 2016] прописано регламентирование поступления взвешенных веществ со сточными водами в сравнение с естественным (фоновым) содержанием взвешенных веществ в водных объектах. Для водных объектов разного назначения допускается увеличение концентрации взвешенных веществ не более чем на 0.25 мг/л (для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий) и на 0.75 мг/л (для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест). Также в этих нормативных документах указано, что «для водных объектов, содержащих в межень более 30 мг/дм^3 природных взвешенных веществ, допускается увеличение их содержания в воде в пределах 5 %» [СанПиН 2.1.5.980-00].

При организации водопользования актуальность оценки мутности или концентрации взвешенных веществ определяется при ведении рыбных хозяйств, размещением объектов водохозяйственного назначения как в плане, так и по глубине водного объекта (осветление воды, забираемой из водного объекта является достаточно дорогостоящим), регламентирования сбросов сточных вод с повышенным содержанием ВВ и так далее.

Нормирование сбросов по загрязняющим веществам является функцией трех основных показателей – естественного гидрохимического фона (или мутности воды) водного объекта; предельного для полноценного водопотребления и функционирования гидробионтов содержания загрязняющего вещества – ПДК; предельно допустимого содержания загрязняющего вещества в сточных водах. В настоящее время многими исследователями ставится под сомнение качество и методология оценки каждого из этих показателей.

Как указывалось выше, 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 является крайне невысокой, а связь с водностью водного объекта не всегда однозначной. Лимитирующие значения сброса взвешенных веществ $S_{\text{регламент}}$ (0.25 – 0.75 мг/л) почти на порядок ниже точности измерения мутности воды, что делает подобное нормирование непродуктивным.

А.В. Караушев [Методические..., 1987] предлагает регламентировать допустимое превышение мутности отклонениями от фоновой мутности – от 10 % для малых значений мутности до 25 % для больших значений. Объясняется это погрешностями измерения и расчетов мутности и указанные отклонения не принесут нарушения в общий режим транспорта наносов в водотоке [Методические..., 1987]. В соответствии с вышеизложенным, в [Методические..., 1987] приводятся общие рекомендации к сточным водам, содержащим ВВ для водных объектов, характеризующихся разной концентрацией ВВ (Таблица 2.1) [Методические..., 1987]. При невозможности регулирования мутности

сбрасываемых вод в течение года для расчетов предельно допустимых сбросов сточных вод в водные объекты в качестве основы принимается фоновая концентрация взвешенных веществ, наблюдаемая при среднемесечном расходе воды 95 % обеспеченности при условии наличия связи концентрации ВВ с расходом воды [РД 52.24.622-2017]. При отсутствии данных наблюдений рекомендуется использовать данные о мутности воды реки-аналога [РД 52.24.622-2017]. Вполне очевидно, такие меры по назначению условных фоновых концентраций не могут полагаться достоверными и окончательными и являются лишь полумерой в условиях недостаточности или отсутствии наблюдений необходимых гидравлических переменных состояния речного потока.

Таблица 2.1 – Общие требования к составу сточных вод, содержащие взвешенные вещества, не отличающиеся от естественных в водном объекте у пунктов водопользования [Методические..., 1987]

| Диапазон изменения естественных (фоновых) значений мутности, мг/л | Погрешности измерения, % | | Допустимое превышение мутности над фоновой, мг/л |
|---|-------------------------------|--------------------------------|--|
| | для нижнего предела диапазона | для верхнего предела диапазона | |
| Меньше 10 | – | 25 | 3.5 |
| 10 – 100 | 25 | 20 | 2.5 – 20 |
| 100 – 500 | 20 | 15 | 20 – 75 |
| 500 – 2000 | 15 | 10 | 75 – 200 |
| Больше 2000 | – | – | 200 |

В стандартах [Приказ Минсельхоз России; СанПиН 2.1.5.980-00] установлены единые по территории РФ нормативы ПДК по различным показателям качества воды. При этом, устойчивая антропогенная деятельность на водосборе, физико-географическое и климатическое разнообразие территорий нашей страны определяют и принципиальные отличия водных объектов по гидрологическим, морфометрическим, гидрохимическим и гидробиологическим характеристикам. Актуальные вопросы назначения региональных ПДК в

настоящее время поднимаются в работах многих исследователей (А.П. Лепихин, Е.В. Веницианов, В.А. Селезнев и другие).

Также ситуация осложняется неравномерным распределением мутности в течение года. Для нормирования сбросов по мутности воды согласно [РД 52.24.622-2017] рекомендуется принимать «фоновую концентрацию, соответствующую минимальному среднемесячному расходу воды года 95 %-ой обеспеченности» [РД 52.24.622-2017]. Такой подход имеет определенные недостатки в части пассивного учета фоновой концентрации взвешенных веществ – без учета его внутригодового распределения. Известно, что наибольшая мутность приходится на период половодья и паводков – интенсивного выноса твердого вещества с поверхности водосбора. И при достаточно насыщенном взвешенными веществами потоке, значительное увеличение мутности воды может принципиально усугубить негативное влияние последней на экосистемы водного объекта. Сезонная водность водного объекта и метеорологическая обстановка отдельных лет также обуславливает и перераспределение автохтонного вещества, приводящегося в движение в результате различных гидродинамических процессов в пределах обозначенного водного объекта (Рисунок 2.3). Согласно Рисунку 2.3 наибольшие значения мутности приходятся на половодье, период с интенсивным поступлением в русловую сеть продуктов почвенной эрозии. Минимальные же значения мутности не всегда сопряжены с минимумом меженного стока (например, для створов р. Кама – с. Волосницкое и р. Кама – с. Гайны). Это объясняется как руслоформирующими процессами в водотоках, так и хозяйственной деятельностью на водосборе (распашка сельскохозяйственных территорий, орошение и т.д.). Для водоемов распределение мутности также может не иметь выраженного хода в течение года и будет определяться влиянием ветров на гидродинамику водоема, что свойственно для слабопроточных водохранилищ многолетнего регулирования.

1. Погрешность измерения превышает допустимое увеличение концентрации взвешенных веществ в контрольном створе водного объекта.

2. Недостаточная точность оценки среднемесячной фоновой концентрации при нерегулярных и редких наблюдениях.

3. Не учитывается внутригодовое распределение мутности в водном объекте.

4. Не учитываются региональные особенности водотока, обусловленные его физико-географическим расположением и определяющие пределы изменения мутности воды.

Первый вопрос может быть решен предложенным А.В. Караушевым [Методические..., 1987] регламентированием допустимого превышения мутности отклонениями от фоновой мутности – от 10 % для малых значений мутности до 25 % для больших значений – ввиду больших погрешностей как измерений так и расчетов мутности, указанные отклонения не принесут нарушения в общий режим транспорта наносов в водотоке [Методические..., 1987]. В соответствии с вышеизложенным, в [Методические..., 1987] приводятся общие рекомендации к сточным водам, содержащим взвешенные вещества для водных объектов, характеризующихся разной концентрацией ВВ. При невозможности регулирования мутности сбрасываемых вод в течение года, допустимые отклонения должны быть ориентированы на межennую (минимальную) мутность, полагая таковую за фоновое значение [Методические..., 1987].

Принципиально решить проблему, обозначенную во втором пункте перечня, 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 описывающая 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 детерминированно моделирования особенно в части недостаточности или отсутствия наблюдений за одной из переменных состояния системы или при реализации различных численных экспериментов.

При решении двух последних вопросов, возможно, будет уместным назначить региональное значение ПДК по взвешенным веществам $S_{\text{ПДК}}^{\text{рег}}$ и лимитировать допустимое значение концентрации сброса в контрольном створе $S_{\text{сброс}}$ следующим комплексом условий отдельно для каждого месяца (i – индекс месяца):

$$\begin{aligned} S_{\text{сброс}} &\leq S_{\text{доп}}^i && \text{при } S_{\text{ПДК}}^{\text{рег}} \geq S_{\text{фон}}^i + S_{\text{доп}}^i, \\ S_{\text{сброс}} &\leq S_{\text{ПДК}}^{\text{рег}} - S_{\text{фон}}^i && \text{при } S_{\text{ПДК}}^{\text{рег}} < S_{\text{фон}}^i + S_{\text{доп}}^i \text{ и } S_{\text{ПДК}}^{\text{рег}} - S_{\text{фон}}^i > 0, \\ S_{\text{сброс}} &= 0 && \text{при } S_{\text{ПДК}}^{\text{рег}} - S_{\text{фон}}^i < 0. \end{aligned}$$

где $S_{\text{доп}}$ – предельное допустимое превышение концентрации взвешенных веществ над фоновым значением в контрольном створе мг/л.

Такой подход позволит учесть текущую характеристику водного объекта в части мутности, а назначение регионального ПДК по мутности для отдельных месяцев даст возможность скоординировать совокупное содержание ВВ (фоновая концентрация совместно с поступившими ВВ со сбросами) и лимитирующее содержание, определяющее нижнюю границу комфортного существования гидробионтов.

Все вышеизложенное определяет актуальность исследования пространственно-временных закономерностей распределения мутности в водном объекте для различных гидрометеорологических условий и совершенствовании методов ее расчета. Результаты мониторинга совместно с данными, полученными в результате математического моделирования, являются безусловной основой для решения актуальных в настоящее время вопросов нормирования сточных вод – «прежде чем судить об антропогенном влиянии на мутность водных масс речных потоков, необходимо рассмотреть бытовые характеристики мутности и ее изменчивость» [Методические основы..., 1987].

На основании изложенного, можно сделать вывод о необходимости пересмотра существующих правил нормирования сбросов сточных вод и перехода на региональную систему назначения ПДК.

2.4. Расчеты поля повышенной мутности воды при дноуглублении или дампинге

Многие крупные озера и водохранилища являются источниками промышленного и питьевого водоснабжения населенных пунктов, расположенных в пределах их береговой зоны. При этом 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 [Методические основы..., 1987]. Экстремально большие значения мутности неблагоприятно влияют на жизнедеятельность гидробионтов.

Основными количественными характеристиками полей повышенной мутности, как следствия дноуглубительных работ, являются продолжительность

стояния облака повышенной мутности в водных объектах с замедленным водообменом, интенсивность распространения шлейфов повышенной мутности в акватории, концентрация взвешенных веществ на разном удалении от источника взмучивания и так далее. В настоящее время методы расчетов ряда характеристик повышенной мутности при дноуглубительных работах или дампинге представлены в различных нормативных документах и в печатных трудах исследователей соответствующего профиля. При этом, основное внимание в этих методах уделяется динамическим характеристикам распространения поля повышенной мутности в зависимости от производительности гидромеханического устройства, таким как интенсивность изменения шлейфа повышенной мутности и его геометрические размеры. Эти характеристики полностью сопряжены с естественной (ненарушенной) гидродинамикой водного объекта в пределах зоны влияния механизмов и вне зоны влияния, дополнительные гидродинамические воздействия (образование волн и областей повышенной турбулентности) непосредственно от самих механизмов, с крупностью донных отложений и вкладом в общую гранулометрию частиц соответствующей «эффективной» крупности, продолжительностью работ по изъятию и сброса грунта и объемом извлекаемого и сбрасываемого грунта. Частицами с «эффективной» крупностью можно полагать такие фракции, которые формируют достаточно устойчивые поля повышенной мутности с большой инерционностью осаждения. К таким частицам можно отнести взмучиваемый донный грунт с диаметром частиц не более 0.1 мм [ВРДС 12-05-03 МО РФ]. В расчеты вводится коэффициент эффективной крупности, который показывает долю взвешенных частиц с размерами, определяющими относительно устойчивое продолжительное взвешивание (замедленное осаждение) в общем объеме частиц.

В [СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08.31– 2012] водные объекты по характеру распространения мутности, связанному с гидродинамическими свойствами объекта, подразделяются на большие и малые водотоки и водоемы.

Для больших рек с существенными скоростями течения рекомендуется метод НГАВТ [Временные указания..., 1986], разработанный на основании решения

системы уравнений турбулентной диффузии С.В. Афанасьева [Ботвинков и др., 2002]. При этом концентрация взвешенных веществ рассматривается как функция морфометрических характеристик расчетной области, средней скорости течения и гидравлической крупности частиц, образующих взвесь. Согласно этому методу расчетное поле, находящееся в зоне влияния гидротехнических работ, представляется в виде конечных элементов с условно одинаковыми значениями глубины и скорости. Далее последовательно для этих элементов по эмпирическим формулам и графикам рассчитываются и снимаются необходимые для дальнейших вычислений величины. Концентрация взвешенных веществ в створе выброса определяется по формуле [Временные указания..., 1986]

$$S_0 = \frac{K_y Q_t K_1 \rho_{гр}}{3600 B H v},$$

где K_y – коэффициент уноса грунта, определяемый по номограмме; Q_t – техническая производительность землесоса, м³/час; K_1 – процентное содержание частиц грунта меньше контролирующего диаметра (за фактор, определяющий границы зоны повышенной мутности, принимается d_5 , при этом коэффициент $K_1 = 0.05$); $\rho_{гр}$ – плотность грунта, кг/м³; $B = 3B_{сбр}$ – ширина взмученного потока в створе рефулирования, равная утроенной ширине сбросного устройства $B_{сбр}$, м; H – глубина в месте выброса грунта, м; v – скорость течения, м/с в месте выброса грунта.

По значению концентрации взвешенных веществ в створе выброса по эмпирическим графикам последовательно находятся значения концентраций вдоль гидродинамической оси до конечного створа [Временные указания..., 1986].

Методика, приведенная в [Временные указания..., 1986] легла в основу комплексной номограммы, построенной В.А. Баулой. Номограмма (Рисунок 2.4) получена в результате аппроксимации эмпирических графических зависимостей метода [Временные указания..., 1986] аналитическими формулами и позволяет

определить относительное изменение концентрации взвешенных веществ на участке S_i / S_{i-1}

$$\frac{S_i}{S_{i-1}} = \left(\frac{\omega}{0.00018} \right)^{-0.0019 \Delta L_i \ln\left(\frac{1.7}{v_i}\right) \ln\left(\frac{12.5}{H_i}\right)},$$

где S – концентрация примесей в различных створах, мг/л; i – индекс створа; ΔL_i – расстояние между расчетными створами, м; v_i и H_i – скорость, м/с, и глубина, м, в i -ом створе на оси струи; ω – гидравлическая крупность грунта, м/с.

Для малых водотоков в [СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08.31– 2012] рекомендуют использовать метод расчета распространения поля мутности, разработанный сотрудниками ГГИ В.М. Католиковым и А.А. Костюченко. Этот метод основан на предположении о равномерном в сечении потока распространении поля повышенной мутности и дальнейшего убывания концентрации взвешенных веществ за счет их осаждения. Средняя технологическая мутность в створе перехода определяется по формуле

$$\Delta P = 10^4 \frac{M \rho_{\text{объемн.гр}} z}{Q},$$

где ΔP – средняя дополнительная мутность в створе работ, г/м³; M – производительность землеройной техники, м³/с; z – процент уноса грунта; $\rho_{\text{объемн.гр}}$ – объемная масса грунта, т/м³; Q – расход воды, м³/с.

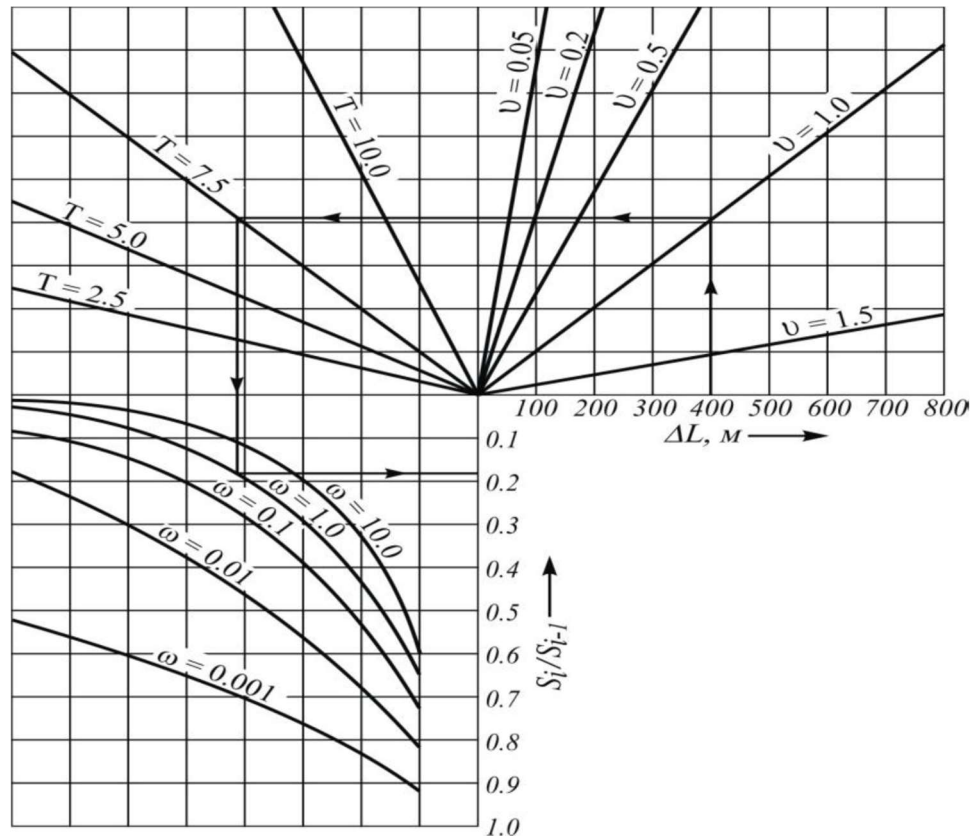


Рисунок 2.4 – Номограмма для определения относительного изменения концентрации взвешенных наносов S_i / S_{i-1} при отвале извлеченного грунта в воду [Ботвинков и др., 2002]

Поступающая в поток при разработке карьера масса грунта G рассчитывается по формуле

$$G = \frac{W \rho_{\text{объемн.гр}} z}{1000},$$

где W – объем перемещаемого грунта, м^3 .

Разность между всей массой грунта, поступившей в поток, и массой грунта, осевшей к расчетному створу, дает массу транзитного грунта в створе GL (транзит).

Нижние по течению границы зон осаждения (расчетные зоны) определяются по формуле

$$L = \frac{hv}{\omega},$$

где L – расстояние от створа работ, м; h – глубина, м; v – скорость, м/с; ω – гидравлическая крупность для нижней границы фракции грунта в расчетных условиях, м/с.

Тогда полная дополнительная мутность по расчетным створам при разработке карьера рассчитывается по формуле

$$\mu = \tau \frac{10^2 G_{L(\text{транзит})}}{3.6q},$$

где τ – время разработки карьера; q – расход воды; 10^2 и 3.6 – множители для согласования размерности времени в значениях производительности техники, продолжительности работ и расхода воды, и для перехода к размерности мг/л.

Области осаждения взвешенных частиц разной крупности между расчетными створами по длине реки могут быть схематично представлены следующим образом (Рисунок 2.5) [<https://lektsii.org/17-123.html>].

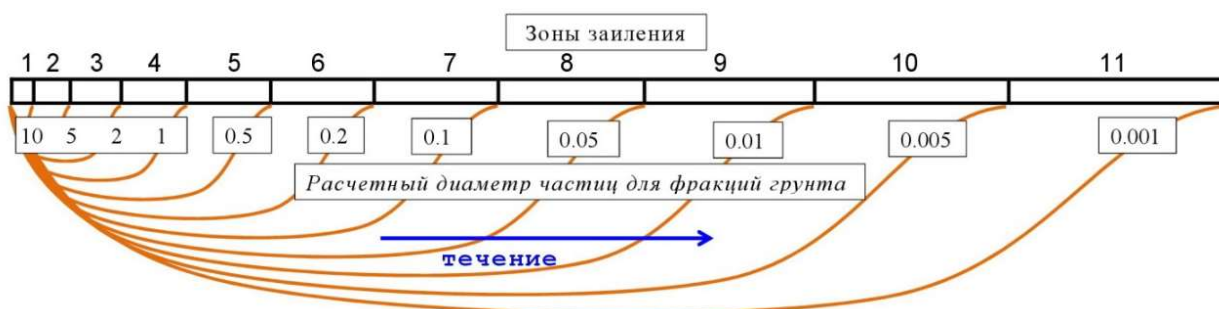


Рисунок 2.5 – Схема формирования зон заиления по длине реки

[<https://lektsii.org/17-123.html>]

В [Методические..., 1987] в основе расчетов распространения взвешенных наносов при производстве земляных работ в водоемах лежит уравнение баланса наносов транзитной струи. Эти расчеты построены в предположении, что ось, по

которой осуществляется воздействие механизмов на гидравлику потока совпадает с направлением осредненного течения [Методические..., 1987]. Расчет распределения взвешенных веществ вдоль оси потока осуществляется по формуле

$$S = S_{\text{тр}} + (S_{\text{нач}} - S_{\text{тр}}) \cdot e^{-\frac{(\omega + E)B_d \Delta x}{Q_d}},$$

где S – общая мутность в конце расчетного участка длиной Δx , мг/л; $S_{\text{тр}}$ – мутность, соответствующая транспортирующей способности потока, мг/л; $S_{\text{нач}}$ – мутность в начальном створе расчетного участка, мг/л; ω – средняя гидравлическая крупность транспортируемых взвешенных частиц, м/с; E – коэффициент, зависящий от скорости потока и от гидравлической крупности частиц; B_d – ширина загрязненной струи в начальном створе, перпендикулярном оси выброса, м; Q_d – расход воды в струе выброса, м³/с.

В Методических указаниях по расчету распространения зон мутности при дноуглублении и дампинге на акваториях ВМФ [ВРДС 12-05-03 МО РФ] «при наличии данных только об обеспеченности различных скоростей течения без учета направления зоны воздействия различной обеспеченности представляются в виде концентрических окружностей с центром в точке источника распространения взвеси». Так, распределение взвешенных веществ техногенного происхождения при дноуглублении и дампинге рассчитывается по формуле [ВРДС 12-05-03 МО РФ]

$$S(x, y, z, t) = \frac{q}{8} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi K t}} \right)^3 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4Dt} \right),$$

где x, y, z, t – пространственно-временные координаты, м и с; q – мощность источника примеси, т/с; D – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с.

Расход G , т/с грунта, перешедшего во взвешенное состояние в результате земляных работ в акватории водного объекта согласно [ВРДС 12-05-03 МО РФ] рассчитывается по формуле

$$G = PkM\rho_{\text{гр}} \frac{\rho_{\text{объемнгр}} - \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{воды}}} \frac{1}{3600},$$

где P – весовое содержание в грунте (в долях единицы) частиц размером менее 0.1 мм, образующих зону повышенной мутности; k – коэффициент перехода грунта при работе технических средств во взвешенное состояние в долях единицы; M – производительность технического средства по грунту, м³/ч; $\rho_{\text{объемн.гр}}$ – объемный вес грунта в состоянии естественного сложения, т/м³; $\rho_{\text{воды}}$ и $\rho_{\text{гр}}$ – плотность воды и грунта, соответственно, т/м³.

Метод, разработанный в ГосНИОРХ С.Ф. Понкратовым [Понкратов С.Ф., 1989], основан на общих закономерностях перемещения наносов в речном потоке, сопряженных с гидравликой этого потока. Расход взвешенных наносов в створе взмучивания рассчитывается как

$$Q_{\text{тв}} = 0.1 \cdot P \cdot K \cdot f \cdot \rho_{\text{гр}},$$

где P – техническая производительность земснаряда, м³/с; K – коэффициент производительности земснаряда (0.75); $\rho_{\text{гр}}$ – плотность грунта, т/м³; f – содержание частиц в грунте, гидравлическая крупность которых меньше W_{max} – максимальное значение пульсационной скорости струи, м/с; 0.1 – коэффициент потерь грунта [Типовая технологическая схема, 1980].

Причем, максимальное значение пульсационной скорости приравняется трем значениям средней пульсационной скорости

$$W_{\text{max}} = 3 \frac{v\sqrt{g}}{\sqrt{CM}},$$

где C и M – коэффициент Шези и функция коэффициента Шези; v – средняя скорость струи, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Расстояние, через которое частицы гидравлической крупности ω_i осядут на дно, рассчитывается

$$L = \alpha \frac{hv}{\omega_i},$$

где α – коэффициент; h – средняя глубина, м.

Для оценки распространения взвешенных веществ при производстве земляных работ в водоемах в рекомендациях Ленгипроречтранс [Методика расчета..., 1990] принимается за основу методика расчета дополнительной мутности при добычных работах, разработанная Ленморниипроект. При этом дополнительная мутность $S_{\text{доп}}$ в водоеме на расстоянии L , м от источника загрязнения определяется по формуле

$$S_{\text{доп}} = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi DL}} \sqrt{v} \left(e^{-\frac{b^2 v}{DL}} + 1 \right),$$

$$D = 100v^2 \sqrt{\frac{h}{g}},$$

где Q_0 – начальное значение мощности источника, г/с; D – коэффициент диффузии, м²/с; v – скорость течения, м/с; b – расстояние от берега, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Приведенные выше методы распространения повышенной мутности в водных объектах можно разделить на два типа. К первому типу относятся методы, которые основаны на гидравлико-полуэмпирических зависимостях распространения мутности по оси потока. Это методы ГГИ (А.В. Караушев) [Методические указания..., 1987], НГАВТ [Временные указания..., 1986],

Методические указания [ВРДС 12-05-03 МО РФ]. Ко второму типу относятся методы, в которых прописаны средние по масштабу потока гидравлические соотношения между переменными состояниями потока (глубиной, скоростью) и гидравлической крупностью частиц. Это методы ГосНИОРХ (С.Ф. Понкратов) [Понкратов С.Ф., 1989], ГГИ (В.М. Католиков и А.А. Костюченко) [СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08.31 – 2012].

К третьему типу методов оценки распространения поля повышенной мутности можно отнести различные реализации уравнений динамики водных масс, дополненных выражениями переноса твердого вещества. Однако, согласно [Клеванный и др., 2013], «в настоящее время отсутствуют общепринятые математические модели и рекомендации для расчетов распространения взвеси в воде и ее влияния на биоту. Исследования в данном направлении продолжаются».

При наличии цифровой и гидродинамической модели водного объекта в настоящее время для оценки распространения полей повышенной мутности прибегают именно к гидродинамическим расчетам. Численные эксперименты на гидродинамической модели позволяют дать непрерывную оценку распространения полей мутности и рассчитать последствия возможных гидротехнических мероприятий, связанных с инициацией повышенной мутности в акватории.

В приведенном выше обзоре методов расчета распространения повышенной мутности при проведении дноуглубительных работ рассматриваются лишь динамические характеристики поля дополнительных техногенных концентраций. Однако определенный интерес может представлять оценка гидродинамического потенциала максимального содержания взвешенных веществ в потоке вне зоны влияния действующего источника техногенного взмучивания, то есть максимальной вместимости водным потоком взвешенных частиц или иначе транспортирующей способности потока. Особенную ценность такие построения представляют для межленного периода, характеризующегося наименьшей глубиной потока, а значит наибольшими значениями мутности. Полученное поле максимального насыщения водных масс взвешенными веществами при гипотетической инициации процессов взмучивания донного грунта позволит

оценить области акватории с наиболее неблагоприятными возможными значениями мутности воды, что может стать основой для последующих рекомендаций по мероприятиям, связанным с дноуглубительными работами и дампинге.

Концентрация взвешенных веществ вне зоны гидродинамического влияния работы специализированной техникой или по окончании работы таковых может быть охарактеризована как остаточная мутность. Удержание потоком остаточной мутности определяется его естественной ненарушенной действием гидротехнических механизмов гидродинамикой. Оценки поля остаточной мутности актуально для водоемов с замедленным водообменом. Продолжительность удержания повышенных концентраций взвешенных веществ i -ой фракции потоком T_i , с рассчитывается как функция гидравлической крупности i -ой фракции ω_i , м/с, скорости течения v , м/с и средней глубины взвешивания i -ой фракции h_i , м

$$T_i = \frac{l_i}{v_{\text{гр}}} = \frac{l_i}{\sqrt{\omega_i^2 + v^2}},$$

где $v_{\text{гр}}$ – скорость движения частицы грунта, м/с; l_i – путь, который проходит частица i -ой крупности, м

$$l_i = \sqrt{h_i^2 + L^2} = \sqrt{h_i^2 + \frac{h_i^2 v^2}{\omega_i^2}}.$$

Тогда

$$T_i = \frac{\sqrt{h_i^2 + \frac{h_i^2 v^2}{\omega_i^2}}}{\sqrt{\omega_i^2 + v^2}} = \frac{\sqrt{h_i^2 + \frac{h_i^2 v^2}{\omega_i^2}}}{\sqrt{\omega_i^2 + v^2}} = \frac{h_i}{v_{\text{гр}}} \sqrt{1 + \frac{v^2}{\omega_i^2}}.$$

Расчет гидродинамического потенциала потока, как отмечалось выше, однозначно сопряжен с транспортирующей способностью потока. В водоемах с

замедленным водообменом максимальная взвешенная нагрузка водных масс при естественном гидрологическом режиме практически не достигается. Даже в период повышенной водности (половодье или паводок) при интенсивных водно-эрозионных процессах на водосборе, мутность воды в водоемах в несколько раз ниже максимально возможной.

Оценка гидродинамического потенциала максимального содержания взвешенных веществ в потоке для однородной части акватории водоема может быть проведена по известным формулам транспортирующей способности потока. Построение поля максимально возможных концентраций взвешенных веществ может быть осуществлено в результате совместной реализации системы гидродинамических уравнений и формулы транспортирующей способности потока. В качестве основы таких расчетов может быть принята система уравнений мелкой воды, численно реализованная в работе [Шмакова, 2018] и интегрированной в нее аналитической формулой транспортирующей способности потока [Шмакова, 2018]. В этой формуле транспортирующей способности потока из характеристик грунта присутствует лишь его плотность. Это объясняется тем, что данный расчет направлен на оценку удерживаемой гидродинамическим комплексом общей массы взвешенного грунта с учетом того, что облако взвеси сформировано известным диапазоном гранулометрической кривой – песчаные, пылеватые и илистые частицы (≤ 1 мм). В работе [Клеванный и др., 2013] также сделан вывод «о допустимости выполнения расчетов с заданием одной фракции, скорость оседания которой равна средневзвешенному значению фракций, участвующих в загрязнении воды». Содержание фракций определенного размера в общем объеме подвешенного грунта может рассчитываться согласно гранулометрической кривой. Востребованность данных о гранулометрической крупности частиц возникает в расчетах времени стояния повышенной мутности в водной массе и формирования поля заиления осаждаемыми частицами.

Таким образом, существующие методы расчета поля повышенной мутности направлены на оценку динамических характеристик этого поля. В зависимости от поставленной задачи и от характера водного объекта для расчета выбираются

методы соответствующей гидравлической детализации. Оценка такого статического показателя как гидродинамического потенциала максимального содержания взвешенных веществ может быть представлена расчетами транспортирующей способности водных масс в акватории. Оценка распространения максимальной мутности при гипотетической инициации процессов взмучивания донного грунта позволит оценить области акватории с наиболее неблагоприятными гидродинамическими условиями, что может стать основой для последующих рекомендаций по мероприятиям, связанным с дноуглубительными работами и дампинге в водных объектах с замедленным водообменом.

Выводы по главе

Необходимость организации полноценного мониторинга, оценка качества природных вод и развития расчетных методов оценки твердого стока и концентрации взвешенных веществ в водных объектах, определяется в решении геэкологических задач, а также экологическими, рекреационными, рыбо- и водохозяйственными аспектами. Для производственного водопользования также необходима разработка стандартов качества водных объектов, то есть нормирование.

Некачественные, редкие и нерегулярные наблюдения за расходом наносов и мутностью воды приводят к недостоверным статистическим оценкам. Последнее чревато заданием ошибочных качественных и количественных ориентиров для различных сфер водопользования. Ситуацию усугубляет то, что данные наблюдений могут быть неоднородными по своему генезису – наблюдения в условиях естественного фона дополняются значениями, измеренными на момент техногенных влияний или аномальных погодных условий.

Таким образом, на текущем этапе состояния наблюдательной базы при достаточно приемлемо изученных процессах формирования водных, эрозионных и гидрохимических потоков и общего массопереноса в системе «водосбор – водный

объект» крайне эффективными и актуальными являются методы математического моделирования.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТВЕРДОГО СТОКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Моделирование в геоэкологии является инструментом количественной оценки переменных состояния природных систем, определяющих среду обитания живых организмов. Для водных экосистем основным фактором благополучного существования 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 биоты, изменению 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, 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 ситуация осложняется отсутствием или некачественностью данных наблюдений за твердым стоком, что затрудняет калибровку параметров моделей и их верификацию. Тем не менее, именно 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.

Актуальность расчетов твердого стока водного объекта при решении различных геоэкологических задач была рассмотрена в предыдущей главе. В

данной главе приведены разработанные методы расчета стока наносов в различных приложениях и обозначены задачи, решаемые каждым из приведенных методов.

3.1. Модель движения воды и твердого вещества в открытом русле

Динамика русловых потоков, вследствие своей неравномерности и нестационарности, определяет систему речной поток – русло как неравновесную. Неравновесность системы проявляется в несоответствии переносимых потоком наносов и транспортирующей способностью потока. Признаками неравновесной системы является изменение вклада кинетической энергии потока воды и движущихся наносов, а также потенциальной энергии донного и берегового грунта в общий энергетический баланс системы. Следствием этого являются русловые процессы – переформирование русла, образование и преобразование русловых форм.

В настоящее время проблемы динамики и морфологии речных русел занимают одно из первостепенных мест в задачах инженерного использования рек. Надежный математический аппарат, аппроксимирующий процессы, происходящие в речном потоке, позволит прогнозировать возможные гидравлические, гидро- и геоморфологические изменения речного русла и потока, протекающего в нем, дать соответствующие рекомендации по внедрению и эксплуатации различных гидротехнических сооружений. Интеграция теоретических положений о русловом процессе и инструментов гидродинамики в полной мере должна обеспечить аналитическими решениями задачи, поставленные различными отраслями.

Математическое моделирование процессов, происходящих в руслах рек, стоит на стыке гидродинамики и гидравлики. Многие математические аппроксимации этих процессов представляют собой синтез гидравлических формул и гидродинамических моделей. С течением времени подходы и методы аналитической гидравлики становятся все более строгими, что, несомненно, определяет ее как часть гидродинамики. Такие тенденции в развитии гидравлики замечены многими исследователями [Дмитриевский, 1962].

Традиционно круг задач гидравлики ограничивался поиском аналитических закономерностей, описывающих отдельные процессы, происходящие в потоке жидкости. Например, формулы истечения жидкости из отверстий и насадков различной формы, формулы оценки расходов русловых наносов, формулы взаимодействия движущегося потока воды и подстилающей поверхности и так далее. Одна из наиболее емких по содержанию формул речной гидравлики, описывающая связь гидравлических характеристик потока, была получена А. Шези в 18 веке. Коэффициент в этой формуле (коэффициент Шези) выражает собой сопротивление неоднородностей подстилающей поверхности движущемуся потоку воды. Для его оценки в разное время было получено около 300 формул [Горбачев, 1936]. Как правило, коэффициент Шези является функцией размера выступов донных отложений.

При описании потока воды в речном русле с морфометрической неравномерностью и неоднородностью подстилающей поверхности классические уравнения гидродинамики с одной стороны дополняются расчетными выражениями, позволяющими учитывать эти особенности руслового потока, а с другой стороны в гидродинамических моделях опускаются некоторые члены, имеющие второстепенное для движущегося речного потока значение. Так, например, в речной гидравлике не принято учитывать силы вязкости, вклад которых незначителен на фоне поступательного движения потока воды в русле. Также обстоит дело и с добавочным давлением, которое для открытых речных потоков принимается постоянным.

Основные уравнения гидравлики достаточно неплохо аппроксимируют движение речного потока. Эти уравнения могут быть ориентированы и на движение ламинарной жидкости, и учитывать турбулентное перемешивание, например, система уравнений В.М. Маккавеева (система уравнений для турбулентных речных потоков, в основе которой лежат уравнения Дж. Тейлора и В. Шмидта, разрабатывалась В.М. Маккавеевым – 1931, 1940, 1952 гг. [Караушев, 1960]).

В 1871 году Сен-Венан получил одномерное уравнение неустановившегося движения потока воды в открытом русле [Гришанин, 1979]

$$I - \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{a}{g} \left(v \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{\tau}{\rho_{\text{воды}} g h},$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = 0.$$

Ввиду того, что количественная оценка касательного напряжения на твердой границе потока затруднена, верхнее уравнение Сен-Венана было приведено к виду

$$I - \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{a}{g} \left(v \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{v|v|}{C^2 h},$$

где t – время, с; l – продольная координата, м; h – глубина, м; F – площадь поперечного сечения, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; a – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения скоростей по поперечному сечению; Q – расход воды, м³/с; I – уклон дна, б/р; C – коэффициент Шези, м^{0.5}/с.

Коэффициент Шези является функцией параметра шероховатости n и может быть рассчитан, например, по формуле Маннинга

$$C = \frac{h^{1/6}}{n}.$$

Параметр шероховатости может быть определен обратным путем, согласно качественным признакам русла по таблицам, в результате калибровки параметров гидродинамической модели руслового потока, а также по формулам, аргументом в которых являются размеры выступов донных неоднородностей.

В практике гидродинамического моделирования уравнение Сен-Венана совместно с уравнением неразрывности представлено в различных модификациях – одно-, двух-, трехмерной постановке, дополненное уравнениями переноса примесей, членами турбулентной пульсации, формулами для расчета расхода наносов и так далее.

При достаточном количестве моделей русловых потоков, основные их отличия состоят в принятой расчетной схеме и форме представления транспорта наносов [Wu, 2007]. Эти модели могут быть классифицированы не только по описанным ранее признакам размерности и стационарности, но и по характеру расчетной схемы, взаимосвязанности расчетов потоков воды и твердого вещества и так далее. В монографии [Wu, 2007] представлена следующая классификация моделей речного потока и транспорта наносов:

- по размерности: 1D (моделирование продольных профилей осредненных по сечению речных потоков); 2D вертикальные (осредненные по ширине); 2D горизонтальные (плановые); 3D;

- по стационарности: стационарные (не включают производную по времени); квазистационарные (деление относительно устойчивых по времени отрезков гидрографа на множество временных интервалов); нестационарные;

- по гранулометрическому составу наносов: однородная гранулометрия (наносы полагаются одного размера); неоднородная гранулометрия (нескольких размеров);

- по виду перемещения наносов: взвешенные, влекомые, общие;

- по равновесному состоянию двухфазного потока: насыщенные (расход наносов в потоке равен его транспортирующей способности); ненасыщенные;

- по численным методам: конечная разность; конечный объем; конечный элемент; конечная аналитическая или эффективная элементная модель;

- по взаимосвязанному расчету гидравлических переменных состояния потока и наносов: сопряженные (вычисление гидравлических переменных состояния, в том числе и расхода наносов, одновременно); частично сопряженные; несопряженные (вычисление расхода наносов по отдельным формулам);

– по дискретности движения твердого веществ в потоке: модели твердых частиц (основанные на движении отдельных частиц); модели непрерывной среды (основанные на концепции двухфазного потока).

Согласно результатам численных экспериментов, представленных в [Wu, 2007], полагается, что при незначительных концентрациях твердого вещества в потоке для его описания может быть использован невзаимосвязанный расчет водного потока и наносов [Wu, 2007], т.е. несопряженные модели. Несопряженные методы расчета двухфазного потока достаточно широко используются в практике инженерных задач. Это относительно простые в практической реализации системы гидродинамических моделей и эмпирических формул. Однако, область применения таких моделей ограничена низкой концентрацией твердого вещества в потоке.

Сопряженные модели учитывают гидравлическую связь потока воды и твердого вещества. Численные схемы реализации этих моделей более устойчивы [Wu, 2007] и могут использовать бóльший шаг по времени в отличие от несопряженных моделей [Saiedi, 1997; Cao et al., 2002]. При этом сопряженные модели обеспечивают решение более широкого диапазона инженерных задач [Wu, 2007]. Однако, численная реализация этих моделей несколько сложнее в отличие от несопряженных.

У истоков отечественной гидродинамики речных потоков стоят такие ученые как Б.А. Бахметев [1934], А.А. Саткевич [1926], Н.М. Бернадский, Б.В. Проскуряков [1931], М.А. Великанов [1954 – 1955]. Их исследования были направлены на изучение поведения речных потоков и на разработку методов построения расчетных схем.

В 30-е годы прошлого века Н. М. Бернадским были записаны уравнения планового течения и разработан итерационный графо-аналитический метод расчета [Бернадский, Проскуряков, 1931]. Этот метод заключается в построении ортогональной решетки, состоящей из кривых линий тока и перпендикулярных к ним во всех точках пересечения криволинейных поперечников и последующих вычислениях гидравлических переменных состояния потока [Караушев, 1960].

Работы А.А. Саткевича также посвящены вопросам ввода криволинейной системы координат, отражающей морфометрические особенности водотока [Саткевич, 1926; Лепихин, 2013]. Такие подходы на заре развития гидродинамики речных потоков при прежних вычислительных возможностях был крайне актуальным. «В настоящее время, в эпоху численных моделей, эти подходы представляют реальный интерес для построения эффективных расчетных схем» [Лепихин, 2013].

До настоящего времени в инженерной практике актуально полученное Б.А. Бахметевым уравнение для построения кривых свободной поверхности открытых потоков при различной гидравлической нагрузке (например, водоскат, подпор) [Бахметев, 1934].

Комплексные теоретические и экспериментальные работы М.А. Великанова [Великанов, 1954 – 1955], посвященные проблемам динамики речных потоков, а также методам интегрирования уравнений неустановившегося движения внесли заметный вклад в развитие отечественной речной гидродинамики.

Также вопросами математического моделирования русловых потоков занимались известные отечественные и зарубежные исследователи прошлого столетия – К.Я. Гришанин [1979], И.Ф. Карасев [1975], А.В. Караушев [1960], Н.И. Маккавеев [1986], Г. Ламб [1947], Г.К. Бэтчелор [1973], G. Taylor [1954], R. Smith [1981, 1987] и другие.

Подробный обзор гидродинамических моделей приводится в монографиях [Грушевский, 1982; Mahmood, Yevjevich, 1975; Wu, 2007].

Монография [Wu, 2007] содержит перечисление большого количества гидравлических моделей однофазных и двухфазных речных потоков в одно-, дву- и трехмерных постановке, а также численные схемы решения этих уравнений. Уравнение двухфазного потока является выражением баланса плотности водно-песчаной смеси и решается относительно объемной концентрации наносов [Wu, 2007]. К наиболее известным зарубежным моделям, описывающим процессы русловых деформаций, можно отнести модели [KerssensP., Van Rijn, 1977; Sanchez, Wu, 2011; Singh, 1975; 2002; Van Rijn, 1986; Wu, 2007].

В работе отечественных исследователей [Потапов, Снигур, 2015] представлена одномерная неравновесная русловая модель, основанная на уравнениях мелкой воды, уравнения деформации русла Экснера, уравнение переноса взвешенных наносов и авторской формулы расхода влекомых наносов. Упомянутая формула получена аналитически из уравнения движения тонкого придонного слоя и «учитывает влияние гранулометрических и физико-механических характеристик донного материала при расчете деформаций донной поверхности» [Потапов, Снигур, 2015].

В работах [Nicolas, 2002; Nicolas, Mitchell, 2003; Nicolas, 2003] представлены модификация системы уравнений Навье – Стокса для плановой задачи и уравнения сохранения массы взвешенного вещества и движения частицы. Моделирование скоростей потока в трехмерной проекции в этой модели осуществляется через уравнения сохранения массы, Рейнольдса и Навье – Стокса, учитывающих пульсационную составляющую скорости, вязкость потока и давление. Величины турбулентного напряжения и напряжения грунта сдвигу в модели оцениваются эмпирически. Характеристики концентрации взвешенного вещества в этой системе уравнений представлены независимо от прочих гидравлических характеристик потока. Таким образом, выражение, описывающее динамику концентрации примеси в потоке, выполняет роль уравнения распространения примеси, но никак не связано с транспортирующими возможностями потока и характером подстилающей поверхности в потоке, которые в целом определяют расход и количественные характеристики движущегося твердого вещества.

Е. П. Медников [1985] приводит систему дифференциальных уравнений механики гидродисперсных потоков, дополненную граничными условиями для вычисления пространственного распределения локальных значений осредненной скорости и концентрации взвешенных частиц, а также скорости несущей их жидкости в открытых руслах и каналах при произвольном соотношении объемов фаз. Входящие в состав уравнений такие величины, как коэффициент лобового сопротивления частицы, коэффициент сопротивления частицы, коэффициент

сопротивления нестесненного потока, коэффициент сопротивления трения и некоторые другие определяются по эмпирическим формулам.

А.Б. Векслером [1983] предложена следующая система уравнений для расчета деформаций русла – векторная сумма сил тяжести потока, инерции, сопротивления и тяжести для движущихся частиц (причем скорость их перемещения равна скорости потока), уравнения неразрывности соответственно водного потока (за вычетом из площади поперечного сечения доли площади, занимаемой наносами) и наносов (в объемном соотношении). В уравнении неразрывности для наносов изменение (в весовых единицах измерения) расхода наносов на единицу длины потока приравнивается изменению площади поперечного сечения потока за счет изменения отметок дна и свободной поверхности потока.

В зарубежной литературе [Zheng, Zhang, 2011] можно встретить дополнение системы уравнений Сен-Венана балансовыми соотношениями для транспорта наносов и русловых деформаций, где изменение отметок дна в весовых единицах измерения приравнивается массе осевшего вещества с учетом гидравлической крупности частиц.

В настоящее время для инженерных задач в гидродинамических расчетах речных потоков активно используются различные отечественные и зарубежные программные комплексы (Волна; Cardinal; River; GeoniCS Каналы и реки 2013 [<http://www.csoft.ru/catalog/soft/aquaterra/aquaterra-2013.html>]; MIKE 11 [<http://www.dhigroup.com>]; HEC-RAS [HEC-RAS, 2011]; SOBEK [<https://www.deltares.nl/en/software/sobek/>]). В основе этих комплексов лежат уравнения Сен-Венана в разной численной реализации, дополненные уравнениями расхода наносов, уравнением деформации русла Экснера, уравнениями распространения примесей и др.

Математическая модель движения воды и твердого вещества (Свидетельство о государственной регистрации 2016612803 от 10.03.2016) разработана в Институте озераедения РАН. Модель основана на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток –

донные отложения – наносы» [Шмакова, Кондратьев, 2008; Шмакова, 2011; 2013b; 2018]:

$$(1-f) \left(mg \left[I - \frac{\partial h}{\partial x} \right] - m \frac{dv}{dt} \right) - N_{act} m_{ч} \frac{dv_{ч}}{dt} + N_{act} m_{ч} g - cS = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad (3.2)$$

$$v_{ч} = \sqrt{v^2 + \omega^2}, \quad (3.3)$$

$$\frac{dE_{потока}}{dt} - \frac{dE_{частиц}}{dt} = 0, \quad (3.4)$$

где m – масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; I – уклон дна, б/р; v – скорость потока, м/с; h – глубина потока, м; x – продольная координата, м; S – площадь приложения давления, м²; $m_{ч}$ – масса частицы, кг; $v_{ч}$ – скорость движения частицы, м/с; N_{act} – количество перемещаемых частиц в потоке; ω – гидравлическая крупность частицы, м/с; $E_{потока}$ – кинетическая энергия потока, кг м²/с²; $E_{частиц}$ – кинетическая энергия движущихся частиц, кг·м²/с²; f – коэффициент внутреннего трения, б/р; c – параметр сцепления частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); S – площадь приложения силы, м².

Как видно из приведенного выше уравнения, сила трения $F_{сопр}$ представлена по аналогии с известной в грунтоведении зависимостью сопротивления грунта сдвигу давлению со стороны потока [Бабков и др., 1950]:

$$F_{сопр} = Rf + cS, \quad (3.5)$$

где давление со стороны потока R представляет собой комплекс сил ($F_{\text{потока}}$), действующих в потоке на движущиеся и неподвижные частицы грунта.

Уравнение движения воды и твердого вещества (3.1) замыкается уравнениями неразрывности потока (3.2), скорости движения частицы в потоке (3.3) и уравнением баланса кинетической энергии потока и частиц (3.4). Важно заметить, что в модели используется вес частицы в воде. Деление движущихся наносов на взвешенные и влекомые можно осуществить с помощью известных в гидрологии соотношений между взвешенными и влекомыми наносами [Чалов и др., 2000; Шмакова, 2016b].

Параметры f и c формулы в настоящее время уточняются [Шмакова, 2018]. Следует заметить, что коэффициент внутреннего трения f может быть больше единицы, тогда как для сухого грунта он, как правило, полагается менее единицы. Это объясняется тем, что угол предельного откоса грунта (тангенс которого и есть коэффициент внутреннего трения) в мокрой наклонной среде (с учетом гидростатического давления) может быть больше, чем для сухого грунта, то есть превышать 45° . Также следует заметить, что параметры трения являются функцией водности речного потока. То есть для одного и того же гидрометрического створа эти параметры в межень и половодье будут отличаться [Шмакова, Кондратьев, 2016 a].

Для расчета переноса растворенных примесей русловым потоком система уравнений (3.1) – (3.4) дополняется уравнением турбулентной диффузии [Методические..., 1987]:

$$\frac{dC'}{dt} = [D\Delta C'] \quad (3.6)$$

где C' – концентрация растворенного вещества в воде, г/м^3 , мг/л или в других единицах; $\langle D \rangle$ – тензор 1-ого ранга коэффициентов турбулентной диффузии в потоке ($\text{м}^2/\text{с}$), Δ – оператор Лапласа.

Переменными состояниями модели, описывающей движение воды, транспорта и переотложение наносов в открытом русле, а также перенос растворенных примесей и основанной на уравнениях (3.1) – (3.6) являются средняя скорость и глубина потока, скорость движения и количество (масса) частиц, концентрация растворенного вещества в воде. Параметрами модели – коэффициент внутреннего трения, параметр сцепления грунта при сдвиге, гидравлическая крупность частиц, коэффициент турбулентной диффузии в потоке.

Особенностями представленной модели являются:

1. В модели реализован взаимосвязанный расчет переменных состояний водного потока и потока твердого вещества. Единая система расчета движения воды и взвешенных частиц с физически обоснованной аппроксимацией процесса позволяет проследить перемещение взвешенного вещества по длине русла и оценить скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока в соответствии со своей гидравлической крупностью и исходной скоростью перемещения.

2. Взаимодействие движущегося потока и подстилающей поверхности в модели представлено физически обоснованными параметрами – коэффициентом внутреннего трения грунта и параметром сцепления грунта при сдвиге.

К числу задач, которые могут быть решены с помощью предложенной модели можно отнести: расчет вертикальных деформаций русла (перемещение и осаждение/взмыв твердого вещества в потоке); расчеты расхода наносов и мутности воды; оценка распространения растворенных примесей в речном потоке, поступающих от различных точечных и рассредоточенных источников загрязнения; расчет траекторий движения примесей и условий их попадания в важные с инженерной точки зрения места, например в водозаборы.

3.2. Аналитическая формула расхода наносов

3.2.1. Обзор формул общего расхода наносов, расхода взвешенных и влекомых наносов

На заре исследований процессов перемещения твердого материала в водотоках было принято разделение общего расхода наносов на влекомую и взвешенную составляющие. И, если для формирования общих видений о закономерностях вовлечения в движение и перемещения твердого вещества в речных потоках и, основное, с инструментальной точки зрения, такая постановка вопроса была оправдана, то в рамках современных представлений о физике процесса, накопленном опыте натурных и лабораторных экспериментов, инструментальных возможностей и повсеместной междисциплинарной интеграции, подобное видение проблемы кажется несколько ограниченным.

При математическом моделировании двухфазного потока вычисление отдельно расходов взвешенных и влекомых наносов полностью противоречит физике процесса. С одной стороны, все переменные состояния потока связаны между собой, и рассчитывать гидравлические характеристики потока (глубину и скорость) без учета взвесенесущей нагрузки некорректно. С другой стороны, отдельный невзаимосвязанный расчет расходов влекомых и взвешенных наносов также не соответствует единому физическому закону движения твердого вещества в водном потоке. Однако, очевидно как из анализа физики процесса неустановившегося неравномерного двухфазного массопереноса, так и из данных почти вековых наблюдений за речными потоками, что в зависимости от характера движения, фазы его неустановившегося режима деление наносов по признаку взвешенные и влекомые крайне условный. В современной литературе многократно рассматривались вопросы условий перехода из одного состояния в другое. «Перемещение наносов не является процессом непрерывным, частицы временами выпадают на дно потока, а затем взвешиваются вновь и переносятся далее. Процесс постоянно наблюдающегося взвешивания и осаждения наносов определяет процесс деформации русла» [Караушев, 1960]. «По участию в формированию речного русла наносы, перемещаемые потоком, условно делятся на руслоформирующие (русловые) и транзитные (нерусловые). ...Взвешенные наносы перемещаются во взвешенном состоянии в слое, толщина которого

соизмерима с глубиной потока или равна ей, и могут быть как руслоформирующими, так и транзитными» [Рекомендации..., 2006]. «Влекомые наносы всегда входят в состав руслообразующих; доля взвешенных наносов в нем очень изменчива...» [Чалов, 2011 а].

При этом вклад взвешенных и влекомых наносов в переформирование русла меняется в зависимости от пространственно-временного градиента гидравлических переменных состояния потока (степени нестационарности и неравномерности речного потока), доли взвешенных и влекомых наносов в общем расходе наносов, а также гранулометрии последних.

Разработка формул расхода взвешенных наносов, к сожалению, почти не нашла своего места в практике гидравлических расчетов. При этом большое внимание в исследовании взвешенных наносов отечественными учеными уделялось распределению мутности по вертикали и по длине реки. Также проводились большие исследования уже другого масштаба осреднения по анализу обобщенных материалов пространственно-временного распределения мутности (А.В. Караушев, Г.И. Шамов).

А в качестве формул расхода взвешенных наносов в нормативах и прикладных трудах предлагаются формулы расчета транспортирующей способности потока. В учебной же и научной литературе для расчета расхода взвешенных наносов представлено уравнение распространения примеси, основанное на диффузионной теории движения наносов (Дж. Тейлор, В. Шмидт, В.М. Маккавеев, А.В. Караушев). Однако, ни в первом случае (формулы транспортирующей способности потока), ни во втором (уравнение распространения примеси) задача расчета концентрации взвешенного вещества в потоке в окончательном виде не решена. Очевидно, что взвесенесущая нагрузка речного потока не всегда соответствует его транспортирующей способности. Также и уравнение распространения примеси, являющееся элементарным уравнением неразрывности при уже известной концентрации взвешенного вещества в потоке (задание граничного условия), оставляет вопрос оценки этой концентрации открытым.

Некоторые попытки вывода формул расхода взвешенных наносов в прошлом веке были также основаны на знании информации о концентрации взвешенных наносов в придонном слое s_0 и фактически сводились к интегральному расчету эпюры концентрации взвешенных наносов s .

Теоретическое уравнение для вертикального распределения взвешенных отложений в турбулентном потоке дано Х. Роузом в 1937 году. Так, отношение концентраций s_1 и s_2 на разных глубинах h_1 и h_2 в потоке глубиной h имеет вид [Sedaei et al., 2012]

$$\frac{s_1}{s_2} = \left[\frac{h - h_1}{h_1} \frac{h_2}{h - h_2} \right]^z,$$

$$z = \frac{w}{\kappa \beta u^*},$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{при } 0.1 > w/u^* \text{ или } w/u^* > 0.5 \\ 1 + 2(w/u^*)^2 & \text{при } 0.1 < w/u^* < 0.5 \end{cases},$$

где u^* – динамическая скорость, м/с; w – гидравлическая крупность, м/с; κ – постоянная Кармана (0.4); β – коэффициент диффузии.

Известно, что транспорт взвешенных наносов тесно связан с турбулентностью речного потока и сопровождается постоянным обменом вещества между слоями потока. Общее выражение для секундного расхода взвешенного вещества q_s , м/с через единичную горизонтальную площадку турбулентного потока имеет вид [Караушев, 1960]

$$-A \frac{g}{\rho_{\text{воды}}} \frac{ds}{dy} + sw = q_s,$$

где $Ag/\rho_{\text{воды}}$ – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; s – мутность, м³/м³; y – вертикальная координата, м.

Если предположить A постоянным по глубине, выражение концентрации s на глубине y в общем виде можно записать как

$$s = s_0 e^{-f(C,v,w,h,y,g)},$$

где C – коэффициент Шези, $m^{0.5}/c$.

Придонная концентрация или общая мутность взмыва может быть рассчитана, например, по формуле В.М. Маккавеева [Маккавеев, 1951]

$$s_0 = 0.000057 \frac{(0.7C + 6)C v_h^2}{g h},$$

где v_h – неразмывающая скорость, m/c .

Очевидно, что выражение для концентрации s , приведенное выше, предполагает экспоненциальный вид эпюры распределения мутности по вертикали. Однако, эпюры такого вида характерны для частиц крупностью $d \geq 0.1$ мм. Тогда как концентрация частиц, меньших 0.1 мм, «утрачивает непосредственную связь с элементами осредненного движения и описывается кривыми сложных очертаний» [Карасев, 1975].

В целом, недостаточное внимание к проблеме разработки формул расхода взвешенных наносов вызывает недоумение. Поскольку в отличие от низкой точности измерения расхода влекомых наносов и, как следствие, наличия определенных сложностей с построением и верификацией соответствующих формул и калибровки параметров этих формул, точность измерения расхода взвешенных наносов достаточно высока, инструментальное исследование речных потоков имеет уже весьма продолжительный период и систематический характер.

Определенное пренебрежение вниманием к расчетным методам расхода взвешенных наносов можно объяснить тем, что ряд ученых полагал влияние на процессы переформирования дна (русловые процессы) исключительно влекомых

наносов, тогда как взвешенные рассматривался лишь в качестве транзитных. «Необходимость четкого разграничения взвешенных и донных наносов при морфологическом рассмотрении вопроса вытекает из того, что эти наносы играют различную роль в русловом процессе. Донные наносы формируют русло, и в деформациях, происходящих в самом русле, взвешенные наносы практически не участвуют» [Кондратьев, 2000].

Однако, вопрос несомненного вклада взвешенных наносов в процессы формирования русла в настоящее время признан многими исследователями (см. выше).

Помимо этого, именно взвешенные наносы, распределенные в толще потока, имеют выраженное взаимосвязанное влияние на прочие гидравлические переменные состояния потока. С одной стороны, в турбулентном потоке снижается интенсивность пульсаций – «как показал Г.И. Баренблатт, работа взвешивания отнимает энергию от турбулентных пульсаций, т.е. снижает интенсивность турбулентного перемешивания. Следствием этого является неравномерность распределения осредненных скоростей на вертикали. Поток как бы ламинизируется» [Гришанин, 1992]. С другой, согласно закону сохранения энергии, увеличение концентрации твердого вещества в потоке воды приводит к увеличению движущейся массы с сохранением в среднем общего расхода. Последнее подразумевает увеличение скорости движения двухфазного потока с сопряженным уменьшением глубины. Этот эффект подтверждается и рядом других исследователей: «поток гидросмеси при некоторых обстоятельствах может иметь несколько бóльшую скорость, чем поток воды» [Караушев, 1960].

При достаточно большом количестве формул расхода влекомых наносов, формулы общего расхода наносов не так распространены. Однако, при часто эмпирической природе формул расхода влекомых наносов, формулы общего расхода наносов нередко более физически обоснованы.

Как известно, оценка расхода влекомых наносов естественных водотоков является одной из наиболее сложных гидравлических задач. К сожалению, приходится констатировать, что в последнее время активность в развитии новых

подходов к решению данной проблемы является недостаточной. При этом, основное затруднение заключается в отсутствии надежной верификации предлагаемых расчетных формул по данным натурных наблюдений.

Формулы расхода влекомых наносов могут быть ориентированы как на непосредственно движение отдельных частиц влекомых наносов, так и на грядовую форму движения наносов. Формулы, описывающие грядовую форму движения наносов, учитывают геометрические характеристики гряд – длину, высоту и так далее, и могут использоваться для рек с песчаным дном. Такие формулы обеспечены относительно достоверными данными наблюдений за расходами наносов, что позволяет оптимизировать как структуру формулы, так и ее параметры.

Наибольшую сложность в измерении расхода наносов представляют влекомые наносы в реках с галечно-гравийным дном. Это, соответственно, затрудняет апробацию формул расхода влекомых наносов и оптимизацию структуры и параметров этих формул.

Безусловно, основной причиной транспорта наносов в водотоке является движущая сила потока (сдвигающая проекция силы тяжести потока) и противостоящая ей сдерживающая сила (сила трения). То есть формулы расхода наносов должны быть построены на этом базовом для транспорта наносов положении. Однако, в явном виде в формулах сопротивление дна потоку нигде не прописано.

Таким образом, можно выделить следующие основные требования к формуле расчета расхода наносов:

- формула должна быть аналитической и универсальной;
- соответствовать структурному уровню процесса (масштабность);
- в формуле должны быть физически обоснованные параметры;
- формула должна обеспечиваться доступной исходной информацией.

Приведем ниже некоторые формулы расхода влекомых и взвешенных наносов $G_{вл}$ и $G_{взв}$, а также формулы общего расхода наносов G .

Некоторые формулы расхода влекомых наносов

Формула А. Шоклича [Поздняков, 2012]

$$G_{\text{вл}} = B \frac{7000}{\sqrt{d}} I^{3/2} (q - q_0),$$

$$q_0 = 0.00001944 \frac{d}{I^{4/3}},$$

где q – элементарный расход воды, м²/с.

Формула Г.И.Шамова (для $d \geq 0.1 - 0.2$ мм) [Шамов, 1952]

$$G_{\text{вл}} = B \cdot 0.95 \sqrt{d} \left(\frac{v}{v_{\text{отл}}} \right)^3 [v - v_{\text{отл}}] \left(\frac{d}{h} \right)^{\frac{1}{4}},$$

$$v_{\text{отл}} = 3.83 d^{\frac{1}{3}} h^{\frac{1}{6}}.$$

Формула И.В. Егiazарова [Егiazаров, 1949]

$$G_{\text{вл}} = c' Q \cdot \frac{\rho_{\text{грунта}} \rho_{\text{воды}}^2}{(\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}})^2} \left[1 - \frac{0.012 (\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}) d}{c' \rho_{\text{воды}} h I} \right] \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{3}{2}},$$

где c' – безразмерный коэффициент (для рек принимается равным 0.2; для лабораторных условий 0.45).

В ВСН-83 [ВСН 163–83, 1985] для рек с $I > 0.01$ рекомендована следующая формула для расчета расхода влекомых наносов

$$G_{\text{вл}} = 7000Q \left[\frac{h}{d} \right]^{0.7} I^{2.2}.$$

Формула К.В. Гришанина [Гришанин, 1979]

$$G_{\text{вл}} = 0.015 B \left(\frac{v}{v_{\text{н}}} \right)^3 d(v - v_{\text{н}}),$$

$$v_{\text{н}} = 1g \frac{8.8h}{d_5} \sqrt{\frac{2g(\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}})}{3.5\rho_{\text{воды}}} d},$$

где $v_{\text{н}}$ – неразмывающая скорость потока, м/с; d_5 – диаметр частицы обеспеченностью 5 %, м.

Формула В.Н. Гончарова [Гончаров, 1962]

$$G_{\text{вл}} = 2.08B \left(\frac{v}{v_{\text{н}}} \right)^3 d(v - v_{\text{н}}) \left(\frac{d}{h} \right)^{0.1},$$

$$v_{\text{н}} = 0.96 \sqrt{gd^{0.4} (d + 0.0014)^{0.6}} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.2}.$$

Формула И.И. Леви [Леви, 1948]

$$G_{\text{вл}} = 2B\rho_{\text{грунта}} \left(\frac{v}{\sqrt{gd}} \right)^3 d(v - v_{\text{н}}) \left(\frac{d}{h} \right)^{0.25},$$

$$v_{\text{н}} = 1.4 \sqrt{gd} \lg \frac{12h}{d_{10}},$$

где d_{10} – диаметр частицы обеспеченностью 10 %, м.

Модель расхода влекомых наносов, предложенная Ш.Р. Поздняковым [2012], имеет вид:

$$G_{\text{вл}} = e \cdot k_m \cdot B \cdot d \cdot p_b \cdot Y \cdot v_b,$$

$$Y = \frac{1}{2} - \Phi(x_0),$$

$$x_0 = \frac{v_0 - v_d}{G_{\text{vd}}},$$

$$v_0 = w \cdot \left[\frac{j_0 \cdot f_0 \cdot N}{k_c^2 \cdot N + j_0 \cdot f_0} \right]^{1/2},$$

$$v_b = v_d - v_0 \sqrt{f_d - f_0},$$

$$z_d = 0.7d,$$

$$k_c = \frac{1.11C \sqrt{1 - \left(0.57 + \frac{3.3}{C}\right) \left(\frac{y_d}{h}\right)^2}}{C - 1},$$

$$y_d = h - 0.6d \text{ при } d < 0.5h,$$

$$N = \frac{MC}{g},$$

$$M = 5.3\sqrt{C},$$

$$k_{\phi} = \frac{d^2}{d_x d_z},$$

$$v_d = \frac{v}{1 - 0.45 \frac{g^{1/4}}{C^{1/2}}} \sqrt{1 - 3 \frac{g^{1/4}}{C^{1/2}} \left(1 - 0.45 \frac{g^{1/4}}{C^{1/2}}\right)^2 \frac{(d/2)^2}{h^2}},$$

где Y – вероятность срыва и движения частиц, б/р; x_0 – вероятность срыва и движения частиц, б/р; $\Phi(x_0)$ – интеграл вероятностей, определяется по таблицам [Корн, Корн, 1978]; v_0 – начальная скорость влечения частиц (по формуле Романовского), м/с; f_0 – статический коэффициент трения, б/р; k_c – коэффициент перехода от донной скорости к средней, б/р; e – коэффициент экранирования частиц, б/р; p_b – плотность донных наносов в естественном залегании, $2 \cdot 10^3$ кг/м³; v_b – скорость влечения частиц, м/с; f_d – коэффициент динамического трения, б/р; N – характеристическое число турбулентного потока; k_{ϕ} – коэффициента формы частиц, б/р; v_d – осредненная скорость на уровне $d/2$ (на лежащие частицы) [Караушев, 1947], м/с; k_m – коэффициент заполнения макроструи вихрем [Зайцев, 1984], б/р; G_{vd} – среднее квадратичное отклонение скорости движения частицы, м/с; j_0 – параметр обтекания, функция коэффициента формы частиц k_{ϕ} , б/р.

При $k_{\phi} > 0.8$ $j_0 = \text{const} = 1.35$, иначе

$$j_0 = \frac{1}{10k_{\phi}^2 - 9.2k_{\phi} + 2.16} + 0.6.$$

Формулы общего расхода наносов

Общий расход наносов является функцией гидравлических характеристик потока – средней скорости потока, глубины, расхода воды, уклона, размера, гидравлической крупности и плотности частиц, а также касательного напряжения на твердой границе потока.

Некоторые приведенные ниже формулы получены на основе анализа размерностей и почти все – исходя из основной концепции сдвигающей силы потока.

Формула Янга (Yang S.Q.) и Лима (Lim S.Y.). Приведенная ниже формула получена с помощью анализа размерности для рек с песчаным дном [Yang, Lim, 2003]. В этой формуле общий расход наносов G (кг/с) связывается с касательным напряжением на дне τ (кг/(м·с²)), сдвигающей скоростью u^{*} (м/с), критической сдвигающей скоростью u^{*}_{cr} (м/с) и гидравлической крупностью w (м/с).

$$G = B \cdot k \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} \tau \frac{u^{*2} - u_{cr}^{*2}}{w},$$

где k – коэффициент пропорциональности, равный 12.5.

Формула Эккерса (Ackers P.) и Уайта (White W.R.) также получена в результате анализа размерности [Ackers, White, 1973]. Транспорт мелкодисперсного материала связан со сдвигающей скоростью потока, а транспорт более крупных частиц сопряжен со средней скоростью потока. Однако большое количество неопределенных параметров в формуле затрудняет расчеты. Общая концентрация наносов в потоке C_t записывается как

$$C_t = m_3 \left(\frac{F_{gr} - F_{gr.cr.}}{F_{gr}} \right)^{m_2} \left(\frac{v}{u^*} \right)^{m_1} \frac{d_{35} \rho_{грунта} / \rho_{воды}}{h},$$

$$F_{gr} = \frac{u^{*m_1}}{\sqrt{g d_{35} (\rho_{грунта} / \rho_{воды} - 1)}} \left[\frac{v}{\sqrt{32 \log \frac{ah}{d_{35}}}} \right]^{1-m_1},$$

где d_{35} – размер частиц обеспеченностью 35 %, u^* – динамическая скорость, м/с; a – коэффициент; $F_{gr.cr.}$ – значение параметра текучести F_{gr} в начале движения; m_1 , m_2 , m_3 – параметры, определяемые размерами частицы d .

Формула Карима (Karim M.F.) и Кеннеди (Kennedy J.F.). Карим и Кеннеди также получили формулу общего расхода наносов через теорию размерностей, поставив в зависимость общего расхода наносов от средней и динамической скорости потока, гидравлической крупности и среднего размера частиц d_{50} , м [Karim, Kennedy, 1983]

$$G = B \cdot k \left[\frac{v}{\sqrt{g (\rho_{грунта} / \rho_{воды} - 1) d_{50}}} \right]^{2.97} \left(\frac{u^*}{w} \right)^{1.47} \sqrt{g (\rho_{грунта} / \rho_{воды} - 1) d_{50}^3},$$

где k – коэффициент пропорциональности, равный 0.00139.

Формула Янга (Yang C.T.). Янг выдвинул гипотезу, что определяющим фактором концентрации наносов в аллювиальных руслах является удельная мощность потока, которая может быть определена как рассчитанная за единицу времени диссипация потенциальной энергии на единицу веса воды [Yang, 1979]. Отношение между удельной силой потока и общей концентрацией наносов C_t имеет вид

$$\log C_t = I_1 + J \log \frac{vI}{w},$$

$$J = 1.780 - 0.360 \log \frac{wd_{50}}{\nu} - 0.480 \log \frac{u^*}{w},$$

$$I_1 = 5.165 - 0.153 \log \frac{wd_{50}}{\nu} - 0.297 \log \frac{u^*}{w},$$

где w – гидравлическая крупность частиц, м/с; vI/w – безразмерная удельная мощность потока; ν – кинематическая вязкость, м²/с; I_1 и J – параметры, определяемые множественным регрессионным анализом по данным наблюдений.

Формула Энгелунда (Engelund F.) и Хансена (Hansen E.). Полученная в середине прошлого века формула Энгелунда – Хансена имеет вид [Engelund, Hansen, 1967]

$$G = \rho_{\text{грунта}} \cdot B \left(\frac{0.05|v|^5}{(\rho_{\text{грунта}}/\rho_{\text{воды}} - 1)\sqrt{gd_{50}C^3}} \right),$$

где d_{50} – средний диаметр частиц, м.

Представленная формула имеет относительно несложную запись и нередко используется отечественными исследователями в моделях двухфазных потоков.

Формула Молинаса (Molinas A.) и Ву (Wu B.) основана на сдвигающей силе потока [Molinas, Wu, 2001]. Уравнение Дарси – Вейсбаха решаемое совместно с выражением для силы трения дает следующее отношение между общей концентрацией наносов и результирующей силой потока ψ

$$C_t = \frac{1430(0.86 + \sqrt{\psi})\psi^{1.5}}{0.016 + \psi},$$

$$\psi = \frac{v^3}{\left(\frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{воды}}} - 1\right)ghw \left[\log \frac{h}{d_{50}}\right]^2}.$$

Формула Р. Бэгнольда представляет собой полуэмпирическую зависимость [Visser, 1995]

$$G = \frac{|\tau|}{C^2} \left(0.24 + 0.01 \frac{u^* C}{wg^{1/2}} \right) \rho_{\text{воды}},$$

где τ – касательное напряжение на дне, кг/(м·с²).

Формула И.Ф. Карасева В основе формулы полного расхода наносов лежат две зависимости для расходов взвешенных и влекомых наносов, полученные И.Ф. Карасевым [Карасев, 1975]. «Различие механизмов перемещения влекомых и взвешенных наносов в потоке выражается различной структурой слагаемых в квадратных скобках» [Карасев, 1975]. Общность механизмов перемещения состоит в едином процессе взаимодействия жидкой и твердой сред, характеризующейся мутностью взмыва [Карасев, 1975].

$$G = 0.755 Q B v h s_{\text{взм}} \left[\frac{v\sqrt{g}}{0.755v\sqrt{g} + 0.5wC} \text{Б}\epsilon + \frac{39.5d(v - v_{\text{н}})}{vh} \right],$$

$$s_{\text{взм}} = 0.0002\eta \left(\frac{\rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} \right) \frac{C^2 v^2}{g^2 h},$$

$$v_{\text{н}} = 1.15\sqrt{g}(hd)^{0.25},$$

$$\eta = 1.08 - 0.58 \left(\frac{v_c}{v} \right)^2,$$

$$v_c = 1.43 v_H,$$

$$B = \frac{wC + 0.7v\sqrt{g}}{12wC} \left(1 - e^{-\frac{12wC}{wC + 0.7v\sqrt{g}}} \right),$$

$$\varepsilon = 1 - 0.18 \frac{wC}{v\sqrt{g}},$$

где $s_{взм}$ – мутность взмыва; v_H – неразмывающая скорость, м/с; v_c – критическая скорость, м/с; η – вероятность срыва; ε – отношение наносонесущей части пульсаций к их общей совокупности; B – отношение средней по вертикали мутности к донной.

Формула В.Н. Гончарова для общего расхода наносов имеет вид (для условия $u^*/w < 2.5$) [Гончаров, 1962]

$$G = \rho_{\text{грунта}} \frac{1 + \varphi}{800} \frac{d}{h} \frac{v_H}{v} \left(\frac{v^3}{v_H^3} - 1 \right) \left(\frac{v}{v_H} - 1 \right) Q,$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}{0.9 \rho_{\text{воды}}} \frac{gd}{w^2}},$$

$$v_H = 0.96 \sqrt{gd^{0.4} (d + 0.0014)^{0.6} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.2}},$$

где v_H – неразмывающая скорость потока/ м/с.

Динамическая скорость рассчитывается как отношение касательного напряжения на границе к плотности воды

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{\text{ВОДЫ}}}}.$$

Касательные напряжения на дне в соответствии с квадратичным законом сопротивления записываются в виде

$$\tau = -\lambda |v|v,$$

$$\lambda = gn^2 h^{-1/3},$$

где λ – гидравлическое сопротивление на дне реки; n – коэффициент шероховатости русла.

Коэффициент Шези вычисляется по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}.$$

Некоторые формулы расхода взвешенных наносов

Рассмотрим несколько формул расхода взвешенных наносов $G_{\text{взв}}$.

Формула А.В. Караушева для взвешенных наносов крупностью $0.04 \leq d \leq 0.3$ мм, характеризующихся соотношением $u^*/w > 1.7$ [Рекомендации..., 2006]

$$G_{\text{взв}} = 1.12 \cdot 10^{-6} \rho_{\text{грунта}} \frac{v^2}{g^2 h} Q C^2 \left(\frac{v}{w_{\text{cp}}} \right)^{0.75},$$

$$w_{\text{cp}} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^m w_i p_i,$$

где d – средняя крупность частиц, мм; $w_{\text{ср}}$ – средняя гидравлическая крупность транспортируемых потоком фракций, м/с; m – число транспортируемых фракций; p_i – процентное содержание i -ой фракции с гидравлической крупностью w_i , %.

Формула Ван Рейна (*Van Rijn*) [Van Rijn, 1984]

$$G_{\text{взв}} = \alpha B \rho_{\text{грунта}} d_{50} v D_{gr}^{-0.6} \left\{ \frac{v - v_{\text{кр}}}{\left[\frac{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{воды}}} g d_{50} \right]^{0.5}} \right\}^{2.4},$$

$$D_{gr} = d_{50} \left[\frac{g}{v^2} \frac{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{воды}}} \right]^{1/3},$$

где α – коэффициент, принимающий значения от 0.008 до 0.012; B – ширина русла, м; d_{50} – средний диаметр частиц, м; $v_{\text{кр}}$ – критическая скорость потока, основанная на критерии Шильдса, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Критическая скорость потока зависит от крупности донных отложений. Для песка средней крупности $0.5 \leq d_{50} < 2.0$ мм

$$v_{\text{кр}} = 8.5 d_{50}^{0.6} \lg \left(\frac{12h}{6d_{50}} \right).$$

Для песка мелкой и средней крупности $0.1 < d_{50} < 0.5$ мм

$$v_{\text{кр}} = 0.19 d_{50}^{0.1} \lg \left(\frac{12h}{6d_{50}} \right).$$

Формула Р. Бэгнольда [Bagnold, 1966] основана на концепции энергетического баланса – мощность потока определяет энергию для транспорта наносов.

$$G_{\text{взв}} = 0.01\tau B \frac{v^2}{gw} \frac{\rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}},$$

где τ – касательное напряжение на дне, кг/(м·с²).

Формула Чанга – Симонса – Ричардсона (Chang – Simons – Richardson) [Sedaei, 2012]

$$G_{\text{взв}} = \rho_{\text{воды}} dBC_a \left(vI_1 - 2 \frac{u^*}{K} I_2 \right),$$

где I_1 и I_2 – параметры, зависящие от глубины и определяемые по номограммам Янга [Sedaei, 2012].

Формула И.Ф. Карасева [Карасев, 1975] получена для условия динамического равновесия между осаждением и взмывом

$$G_{\text{взв}} = QB\eta\varepsilon \frac{\rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} \frac{0.00015C^2v^3\sqrt{g}}{g^2h(0.755v\sqrt{g} + 0.5wC)},$$

где v_c – критическая скорость, м/с; η – вероятность срыва; ε – отношение наносонесущей части пульсаций к их общей совокупности; B – отношение средней по вертикали мутности к донной.

3.2.2. Вывод аналитической формулы расхода наносов

Для условий равномерного установившегося движения после некоторых преобразований этого уравнения получим, что расход наносов G , то есть масса твердого вещества, проходящая через поперечное сечение потока за единицу времени (кг/с), равен:

$$G = \frac{N_{act} m_{ч}}{\Delta t} = \frac{\left[\frac{cBv \cdot \Delta t}{g} - (1-f)mI \right]}{\Delta t},$$

где B – ширина потока, м. Или, если записать, что $m = \rho_{\text{воды}} hBv \cdot \Delta t$ и расход воды $Q = vhB$, (м³/с) получается

$$G = Q \left[\frac{c}{hg} - \rho_{\text{воды}} (1-f)I \right], \quad (3.7)$$

Таким образом, после сокращений и преобразований в формуле остались две основные группы членов – гравитационная составляющая ($\rho_{\text{воды}} mI$) и сопротивление грунта сдвигу или сила трения ($c/(hg) + \rho_{\text{воды}} fmI$).

Полученная формула (3.7) является аналитической. Расход наносов в (3.7) является общим, в него включены и взвешенные и влекомые наносы. Пересчет для влекомых или взвешенных наносов может быть осуществлен по известным соотношениям между последними, например, [Карасев, 1975]. Из этого уравнения следует, что расход наносов G зависит от физико-механических свойств грунта (сцепление грунта при сдвиге и коэффициента внутреннего трения) и от сдвигающей проекции силы тяжести водного потока.

Необходимо заметить, что в формуле (3.7) рассчитывается масса твердого вещества в воде, и эту массу надо привести к истинной массе твердого вещества

$$G' = G \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}.$$

Для плотности грунта равной 2700 кг/м^3 поправочный коэффициент составит 1.59. Таким образом, формула (3.7) примет вид

$$G = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{hg} - \rho_{\text{воды}} (1-f) I \right]. \quad (3.8)$$

Вопрос назначения параметров трения в формулах речной гидравлики для водотоков с типовыми гидравлико-морфометрическими характеристиками представляется неоднозначным [Шмакова, 2013 а; Шмакова, 2015]. Хорошо известны повсеместные рекомендации по назначению параметров шероховатости в формуле Шези. Этот параметр может быть определен согласно качественным признакам русла по таблицам. В отечественной литературе встречаются рекомендации по назначению коэффициента шероховатости в трудах М.Ф. Срибного [1932], И.Ф. Карасева [1994], наиболее полные рекомендации приведены в [Пособие к СНиП 2.05.03—84 «Мосты и трубы», 1992]. В США наиболее распространена таблицы параметров шероховатости Чоу [1969] и Braydlay [1960].

Однако в действительности, при математическом моделировании речных потоков параметр шероховатости как правило оценивается обратным путем в результате калибровки параметров гидродинамической модели руслового потока, реже – по формулам, аргументом в которых являются размеры выступов донных неоднородностей. Справедливости ради следует заметить, что коэффициент Шези, представляющий силу трения в формуле Шези, является функцией глубины потока. Но, как показывает практика расчетов, для унификации параметра шероховатости хотя бы для одного водотока в разные периоды водности этого оказывается недостаточно.

В первую очередь, последнее объясняется тем, что параметр шероховатости, являющийся выразителем сопротивления дна потоку, как и любой другой параметр

трения в формулах речной гидравлики является функцией целого ряда аргументов. И связь параметров трения с крупностью донных отложений не является исчерпывающей при определении его значения.

Очевидно, что сопротивление дна и берегов речного потока зависит помимо свойств подстилающей поверхности еще и от водности потока, геометрического масштаба и формы поперечного сечения русла (соотношение ширины русла и высоты берегов) (Рисунок 3.1).

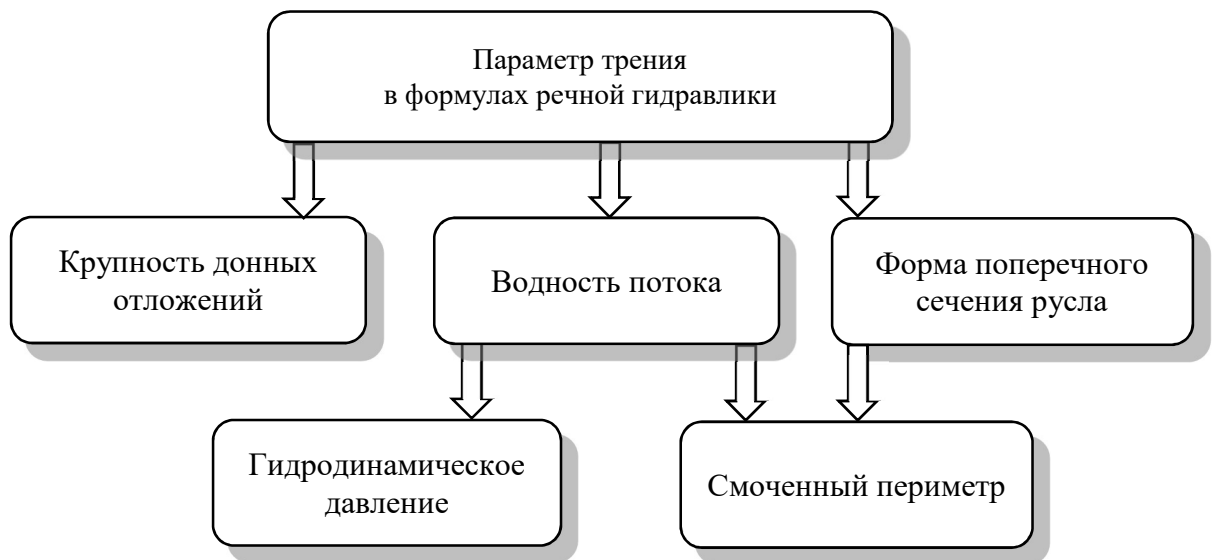


Рисунок 3.1 – Основные аргументы, определяющие значение параметра трения в формулах речной гидравлики

Так, при одинаковой водности потока, для разного соотношения ширины русла и высоты берегов значение смоченного периметра будет различным. Вследствие этого будет разной и площадь приложения силы потока, что приведет к разным значениям сопротивления на твердой границе потока. Например, у русла шириной 1 м и глубиной 10 м смоченный периметр будет равен 21 м, тогда как у русла шириной 10 м и глубиной 1 м смоченный периметр равен 12 м при одинаковой площади поперечного сечения 10 м^2 .

Для одного и того же поперечного сечения потока с увеличением водности последнего помимо увеличения смоченного периметра, увеличится также и давление потока на подстилающую поверхность (за счет увеличения сдвигающей

проекции силы тяжести потока и силы инерции как функции массы). В согласии с третьим законом Ньютона это приведет к пропорциональному увеличению сопротивления дна потоку. Эта связь проиллюстрирована численным экспериментом для некоторых формул расхода наносов в работе [Шмакова, 2018]. На примере нескольких водотоков для разных периодов водности показано увеличение значения параметра трения с увеличением водности.

Связь же параметров трения с крупностью донных отложений достаточно однозначна – дно, представленное крупными фракциями, оказывает большее сопротивление потоку, чем дно, выложенное меньшими по размеру фракциями, при прочих равных условиях.

Ввиду вышеизложенного, следует заметить, что рекомендации по назначению параметров трения в аналитической формуле расхода наносов являются достаточно условными и носят лишь ориентировочный характер. Помимо этого, известную сложность в этот процесс привносит погрешность измерения расхода наносов.

Для определения значений параметра f могут быть использованы зависимости для разных периодов водности, приведенные на Рисунке 3.2. В Таблице 3.1 поясняется категория крупности донных отложений. Для расчетов принимались данные наблюдений на реках бывшей территории СССР, опубликованных в Гидрологических Ежегодниках. Значения параметра c для связанного грунта (суглинки) в среднем по результатам оптимизации для расчетных рек равны 0.85, 0.505 и 1.55 кг/(м·с²) для периодов малой, средней и большой водности соответственно. Для несвязанного грунта для большинства расчетных рек в периоды средней и большой водности значения параметра c в результате оптимизации получались равными нулю. Для периода малой водности значения этого параметра при оптимизации определялись в диапазоне от нуля до несколько десятых кг/(м·с²). Следует заметить, что приведенные количественные оценки параметров f и c формулы (3.8) являются приближенными и требуют уточнений.

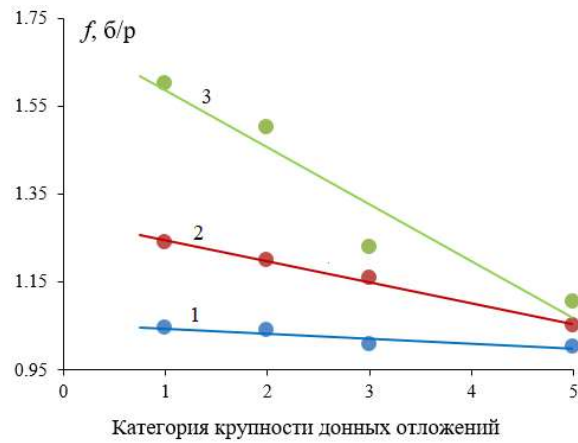


Рисунок 3.2 – Зависимость параметра f для разных периодов водности от категории крупности донных отложений (1– малая, 2 – средняя, 3 – большая водность)

Интегральные по отношению к типу донных отложений параметры f и c в формуле (3.8) представляют более устойчивую зависимость гидравлических переменных состояния потока и наносов в отличие от формул аналогичного назначения с включенными в них данными о крупности наносов. Это объясняется тем, что даже квантильные (различной обеспеченности) оценки крупности частиц нередко недостоверны и имеют высокую изменчивость в пределах одной фазы водности [Караушев, 1960; Великанов, 1962], тогда как оценка параметров трения в формуле (3.8) характеризует свойства донного грунта в среднем (интегрально) по поперечному сечению потока.

Таблица 3.1 – Категории крупности донного грунта

| Вид донных отложений | Категория донных отложений |
|----------------------|----------------------------|
| суглинки | 1 |
| песок | 2 |
| песчано-галечные | 3 |
| гравий | 4 |
| галька | 5 |

Важно заметить, что параметры формулы (3.8) оцениваются для конкретного гидрометрического створа при условии однообразной водохозяйственной деятельности вблизи створа. Если в последующие годы в пределах гидрометрического створа появилось иное водохозяйственное влияние на водоток, значения величин f и c изменятся. Также на значение параметров формулы (3.8) оказывает влияние и изменение гидравлической обстановки в гидрометрическом створе за счет ледовых явлений и зарастания русла. Общие рекомендации по назначению параметров формулы (3.8) могут служить некоторым ориентиром в расчетах стока наносов неизученных рек [Шмакова, 2012 б; Шмакова, 2013].

3.2.3. Апробация аналитической формулы расхода наносов для рек с разной формой движения наносов

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. Совместно с результатами расчетов по аналитической формуле представлены результаты расчетов по другим приведенным в настоящем разделе формулам. Это позволило провести сравнительный анализ формул, в результате которого выявить достоинства и недостатки приведенных формул, а также дать качественную оценку точности расчетов по аналитической формуле расхода наносов. Последнее очень важно, так как оценка качества расчетов по формулам расхода наносов усугубляется низкой точностью измерения этих величин (особенно влекомых). И, к сожалению, одним из умозрительных критериев качества может служить сопоставление с результатами расчетов по аналогичным формулам.

Сравнительный анализ формул расхода влекомых наносов для рек с крупнофракционными донными отложениями

Особенную ценность представляют данные наблюдений за влекомыми наносами на водотоках, произведенные в рамках уникальных авторских исследований твердого стока. К такому исследованию относятся наблюдения за режимом горной реки Ала-арча и измерение ее гидравлических характеристик, произведенные в середине 80-х годов прошлого столетия [Поздняков, 2012]. Расход влекомых наносов был измерен посредством разработанной Ш.Р. Поздняковым конструкцией регистратора движения наносов, основанной на регистрации ударов движущихся частиц о приемные устройства с последующим пьезометрическим преобразованием энергии ударов и специально разработанных конструкций удлиненных сетчатых батометров с гибким дном. Применение данных устройств для измерения расхода влекомых наносов на указанной реке позволило получить достаточно надежные количественные результаты, которые можно использовать для верификации соответствующих формул для вычисления расхода влекомых наносов.

Вычисления расхода влекомых наносов проводились по данным экспериментов на гидравлическом лотке [Клавен, Копалиани, 2011] и для горной реки Ала-арча, расположенной в Киргизском Алатау (Тянь-Шань) [Поздняков, 2012].

1. Лотки с гравийным дном [Клавен, Копалиани, 2011]

На основании опытов на гидравлическом лотке лаборатории ГГИ [Клавен, Копалиани, 2011] шириной 0.5 м с гравийным дном, была проведена серия экспериментов. Данные экспериментов опубликованы в книге А.Б. Клавена и З.Д. Копалиани [2011].

Гидравлические характеристики потока в экспериментах задавались в следующем диапазоне:

- расходы воды 20 – 150 л/с;
- средняя скорость потока 0.53 – 2.9 м/с;
- средняя глубина потока 0.05 – 0.3 м;

- уклон дна 0.003 – 0.03;
- относительная шероховатость (d/h) 0.025 – 0.2;
- средний диаметр донных отложений d_{50} % составил 6.5 мм.

2. Река Ала-арча [Поздняков, 2012]

Река Ала-арча представляет собой небольшой горный поток с половодьем в теплой части года. Основные гидравлично – морфометрические характеристики р. Ала-арча в створе устье р. Кашкасу (по данным наблюдений в 1985 и 1986 гг.):

- средняя скорость потока 2.11 – 2.68 м/с;
- средняя глубина 0.64 – 1.01 м;
- уклон водной поверхности 0.027 – 0.03;
- относительная шероховатость (d/h) 0.14 – 0.3;
- средний диаметр донных отложений d_{50} % составил 145 мм.

В период 1985 и 1986 гг. на реке были проведены измерения гидравлических характеристик потока и расхода влекомых наносов. Последнее осуществлялось посредством разработанного Ш.Р. Поздняковым [Поздняков, 2012] пьезоэлектрического регистратора движения крупнофракционных наносов (РДН).

3. Результаты вычислений

В представленных ниже Таблицах 3.2 – 3.4 приведены данные для расчета и результаты вычислений [Поздняков, Шмакова, 2016].

Следует заметить, что при расчетах расхода влекомых наносов по данным экспериментов на лотках и по данным наблюдений на р. Ала-Арча по аналитической формуле расхода наносов (3.8) были оценены параметры этой формулы. Значения этих параметров составили $f=0.99$ и $c=2.5$ для галечного русла реки Ала-Арча и $f=1.3$ и $c=0.1$ для гравийного дна лотка.

Наименьшие значения среднего относительного отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми расходами влекомых наносов для данных экспериментов на лотках составили 57, 49 и 32 % по формулам Позднякова,

Шоклича и (3.8), для реки Ала-Арча – 42 % по формуле (3.8) и 65 % по формуле, рекомендованной ВСН-83.

Таблица 3.2 – Данные для расчета расхода влекомых наносов по данным экспериментов на лотках [Клавен, Копалиани, 2011] и результаты вычислений (средний диаметр наносов 6.5 мм; ширина лотка 0.5 м)

| Уклон, б/р | Глубина, м | Скорость, м/с | Расход воды, м ³ /с | Расход наносов измеренный, кг/с | Расход наносов по ф-ле Шоклича, кг/с | Расход наносов по ф-ле Шамова, кг/с | Расход наносов по ф-ле Егизарова, кг/с | Расход наносов по ф-ле ВСН-83, кг/с | Расход наносов по ф-ле Гришанина, кг/с | Расход наносов по ф-ле Леви, кг/с | Расход наносов по ф-ле Гончарова, кг/с | Расход наносов по ф-ле Позднякова, кг/с | Расход наносов по ф-ле Шамаковой, кг/с |
|------------|------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-----------------------------------|--|---|--|
| 0.0070 | 0.150 | 1.070 | 0.080 | 0.143 | 0.05277 | 0.08 | 1.00 | 0.00073 | 0.000166 | 0.41 | 0.03 | 0.250 | 0.207 |
| 0.0070 | 0.230 | 1.140 | 0.128 | 0.225 | 0.12996 | 0.08 | 1.60 | 0.00157 | 0.000167 | 0.45 | 0.03 | 0.244 | 0.211 |
| 0.0070 | 0.200 | 1.280 | 0.128 | 0.200 | 0.12996 | 0.15 | 1.60 | 0.00142 | 0.000329 | 0.81 | 0.06 | 0.282 | 0.245 |
| 0.0200 | 0.180 | 1.610 | 0.150 | 1.172 | 1.07449 | 0.48 | 3.18 | 0.01560 | 0.001040 | 2.33 | 0.18 | 0.363 | 0.290 |
| 0.0300 | 0.190 | 1.570 | 0.150 | 1.800 | 2.04331 | 0.41 | 3.89 | 0.03953 | 0.000895 | 2.04 | 0.15 | 0.350 | 0.248 |
| 0.0300 | 0.110 | 1.810 | 0.100 | 1.300 | 1.32997 | 1.22 | 2.59 | 0.01798 | 0.002441 | 4.60 | 0.44 | 0.455 | 0.321 |
| 0.0200 | 0.090 | 1.730 | 0.078 | 0.702 | 0.51536 | 1.17 | 1.65 | 0.00499 | 0.002299 | 4.08 | 0.42 | 0.457 | 0.326 |
| 0.0200 | 0.070 | 1.850 | 0.075 | 0.690 | 0.49206 | 1.93 | 1.59 | 0.00403 | 0.003702 | 5.91 | 0.69 | 0.522 | 0.410 |
| 0.0200 | 0.060 | 2.50 | 0.075 | 0.619 | 0.49206 | 7.88 | 1.59 | 0.00361 | 0.015073 | 21.61 | 2.76 | 0.738 | 0.483 |
| 0.0300 | 0.070 | 2.900 | 0.100 | 1.823 | 1.32997 | 13.03 | 2.59 | 0.01310 | 0.025223 | 37.88 | 4.57 | 0.819 | 0.531 |
| 0.0300 | 0.075 | 2.00 | 0.075 | 1.102 | 0.97331 | 2.55 | 1.95 | 0.01031 | 0.004938 | 7.99 | 0.91 | 0.554 | 0.369 |
| 0.0300 | 0.055 | 1.740 | 0.047 | 0.720 | 0.57384 | 1.79 | 1.22 | 0.00520 | 0.003402 | 4.98 | 0.63 | 0.527 | 0.324 |
| 0.0300 | 0.050 | 1.600 | 0.040 | 0.482 | 0.47397 | 1.35 | 1.04 | 0.00414 | 0.002542 | 3.64 | 0.47 | 0.499 | 0.305 |
| 0.0300 | 0.075 | 1.270 | 0.047 | 0.720 | 0.57384 | 0.34 | 1.22 | 0.00646 | 0.000652 | 1.18 | 0.13 | 0.352 | 0.232 |
| 0.0100 | 0.090 | 1.060 | 0.048 | 0.200 | 0.05127 | 0.13 | 0.72 | 0.00067 | 0.000238 | 0.50 | 0.05 | 0.280 | 0.208 |
| 0.0100 | 0.085 | 1.210 | 0.051 | 0.143 | 0.05951 | 0.25 | 0.76 | 0.00068 | 0.000472 | 0.91 | 0.09 | 0.324 | 0.235 |
| 0.0100 | 0.075 | 0.85 | 0.032 | 0.132 | 0.00734 | 0.05 | 0.48 | 0.00039 | 0.000090 | 0.20 | 0.02 | 0.235 | 0.168 |
| 0.0100 | 0.055 | 0.800 | 0.022 | 0.105 | —* | 0.05 | 0.33 | 0.00022 | 0.000088 | 0.18 | 0.02 | 0.242 | 0.159 |
| 0.0100 | 0.110 | 1.270 | 0.070 | 0.200 | 0.11168 | 0.25 | 1.05 | 0.00112 | 0.000487 | 1.01 | 0.09 | 0.319 | 0.247 |
| 0.0100 | 0.140 | 1.470 | 0.099 | 0.405 | 0.19130 | 0.39 | 1.48 | 0.00188 | 0.000810 | 1.73 | 0.15 | 0.349 | 0.271 |
| 0.0100 | 0.195 | 1.450 | 0.145 | 0.580 | 0.31760 | 0.28 | 2.17 | 0.00347 | 0.000608 | 1.43 | 0.11 | 0.321 | 0.278 |
| 0.0050 | 0.210 | 1.430 | 0.150 | 0.414 | 0.07388 | 0.25 | 1.59 | 0.00082 | 0.000542 | 1.30 | 0.09 | 0.312 | 0.278 |
| 0.0050 | 0.090 | 0.880 | 0.040 | 0.083 | —* | 0.05 | 0.42 | 0.00012 | 0.000092 | 0.22 | 0.02 | 0.232 | 0.177 |
| 0.0050 | 0.130 | 1.150 | 0.075 | 0.167 | 0.00107 | 0.13 | 0.79 | 0.00029 | 0.000266 | 0.60 | 0.05 | 0.278 | 0.228 |
| 0.0050 | 0.165 | 1.340 | 0.110 | 0.360 | 0.03505 | 0.22 | 1.16 | 0.00051 | 0.000469 | 1.08 | 0.08 | 0.307 | 0.261 |
| 0.0030 | 0.130 | 1.000 | 0.065 | 0.080 | —* | 0.07 | 0.53 | 0.00008 | 0.000131 | 0.32 | 0.03 | 0.242 | 0.199 |
| 0.0030 | 0.240 | 1.250 | 0.150 | 0.450 | 0.00179 | 0.12 | 1.23 | 0.00029 | 0.000258 | 0.67 | 0.04 | 0.266 | 0.246 |
| 0.0038 | 0.220 | 1.360 | 0.150 | 0.428 | 0.02795 | 0.19 | 1.38 | 0.00046 | 0.000414 | 1.02 | 0.07 | 0.294 | 0.267 |
| 0.0050 | 0.230 | 1.200 | 0.138 | 0.389 | 0.06223 | 0.10 | 1.46 | 0.00081 | 0.000217 | 0.57 | 0.04 | 0.257 | 0.232 |
| 0.0041 | 0.227 | 1.180 | 0.142 | 0.260 | 0.03296 | 0.09 | 1.36 | 0.00053 | 0.000201 | 0.53 | 0.04 | 0.254 | 0.244 |
| 0.0028 | 0.265 | 1.070 | 0.142 | 0.105 | —* | 0.05 | 1.13 | 0.00026 | 0.000108 | 0.31 | 0.02 | 0.223 | 0.211 |
| 0.0030 | 0.176 | 1.560 | 0.138 | 0.414 | —* | 0.43 | 1.13 | 0.00022 | 0.000913 | 2.05 | 0.16 | 0.353 | 0.311 |

* — в рассчитанных расходах наносов имели место отрицательные значения.

На Рисунке 3.3 приведены зависимости наблюдаемых на реке Ала-Арча и рассчитанных по формуле, рекомендованной ВСН-83 и формуле (3.8) расходов наносов, а на Рисунке 3.4 – зависимости наблюдаемых на лотках и рассчитанных по формулам Шоклича, Гончарова, Позднякова и формуле (3.8) расходов наносов.

Таблица 3.3 – Данные для расчета расхода влекомых наносов по р. Ала-арча [Поздняков, 2012] и результаты вычислений (средний диаметр наносов 145 мм)

| Уклон, б/р | Глубина, м | Скорость, м/с | Ширина, м | Расход воды, м ³ /с | Расход наносов по формуле Шоклича | Расход наносов по формуле Гончарова | Расход наносов по формуле Позднякова | Расход наносов по ф-ле Шамова, кг/с | Расход наносов по ф-ле Егизарова, кг/с | Расход наносов по ф-ле ВСН-83, кг/с | Расход наносов по ф-ле | Гришанина, кг/с | Расход наносов по ф-ле Гончарова, кг/с | Расход наносов по ф-ле Позднякова, кг/с | Расход наносов по ф-ле Шмаковой, кг/с |
|------------|------------|---------------|-----------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|------------------------|-----------------|--|---|---------------------------------------|
| 0.030 | 0.71 | 2.18 | 10.85 | 16.80 | 2.08 | 40.83 | 1.11 | 19.5 | 1.27 | 0.00297 | 4.44 | 0.32 | 1.57 | | |
| 0.030 | 0.75 | 2.24 | 10.77 | 18.10 | 1.60 | 44.83 | 1.33 | 21.0 | 1.42 | 0.00399 | 4.92 | 0.79 | 1.15 | | |
| 0.030 | 0.75 | 2.50 | 10.83 | 20.30 | 1.23 | 51.43 | 3.35 | 23.5 | 1.59 | 0.01591 | 9.65 | 2.54 | 1.28 | | |
| 0.030 | 0.74 | 2.13 | 10.85 | 17.10 | 1.51 | 41.74 | 0.78 | 19.8 | 1.33 | 0.00092 | 3.60 | 0.41 | 1.21 | | |
| 0.030 | 0.79 | 2.42 | 10.57 | 20.20 | 0.96 | 51.37 | 2.38 | 23.4 | 1.64 | 0.00997 | 7.36 | 9.98 | 0.73 | | |
| 0.030 | 0.73 | 2.28 | 10.51 | 17.50 | 0.70 | 43.26 | 1.60 | 20.3 | 1.35 | 0.00579 | 5.55 | 0.67 | 1.37 | | |
| 0.030 | 0.72 | 2.60 | 10.58 | 19.80 | 0.76 | 50.15 | 4.53 | 23.0 | 1.51 | 0.02343 | 12.28 | 6.10 | 1.70 | | |
| 0.030 | 0.76 | 2.22 | 10.79 | 18.20 | 0.81 | 45.12 | 1.18 | 21.1 | 1.44 | 0.00312 | 4.58 | 0.45 | 1.02 | | |
| 0.030 | 0.78 | 2.34 | 10.52 | 19.20 | 0.60 | 48.39 | 1.82 | 22.3 | 1.55 | 0.00679 | 6.06 | 0.57 | 0.82 | | |

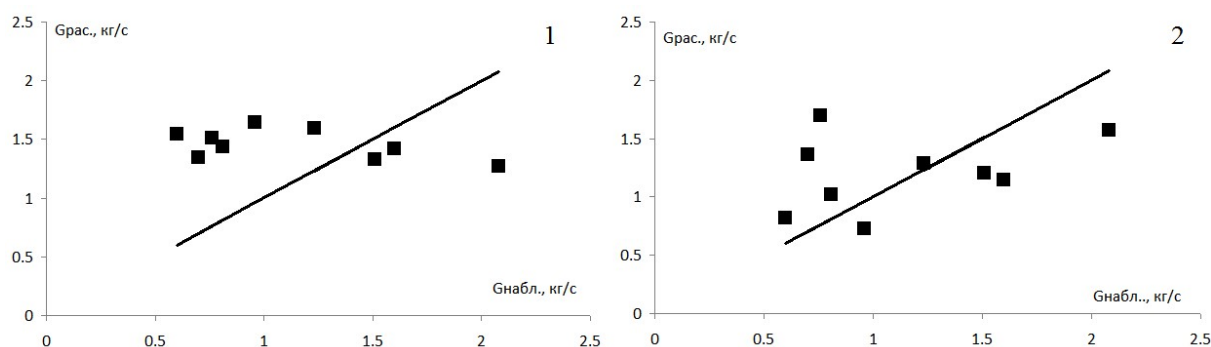


Рисунок 3.3 – Зависимости наблюдаемых на реке Ала-Арча и рассчитанных по формуле, рекомендованной ВСН-83 – 1 и формуле (3.8) – 2 расходов наносов

Таблица 3.4 – Средние относительные отклонения между рассчитанными по разным формулам и наблюдаемыми расходами влекомых наносов, %

| Формулы расхода влекомых наносов | Среднее относительное отклонение, % | |
|---|-------------------------------------|-------------|
| | лоток | р. Ала-арча |
| А. Шоклич | 49* | 4730 |
| Г.И. Шамо́в | 113 | 145 |
| И.В. Егиазаров | 292 | 2100 |
| Формула из ВСН-83 для рек, с $I > 0.01$ | 100** | 65 |
| К.В. Гришанин | 100** | 100** |
| В.Н. Гончаров | 77 | 600 |
| И.И. Леви | 414 | –* |
| Ш.Р. Поздняков | 57 | 223 |
| Аналитическая формула расхода наносов (3.8) | 32 | 42 |

* – в рассчитанных расходах наносов имели место отрицательные значения;

** – рассчитанные расходы наносов близки к нулю.

Таким образом, в результате выполненного исследования получен сравнительный анализ девяти расчетных формул расхода влекомых наносов в приложении для рек с крупнофракционными донными отложениями. Вычисления проводились по данным экспериментов на гидравлических лотках и для горной реки Ала-Арча. Уникальность вычисления расхода наносов на данной реке представлена тем, что результаты наблюдений за гидравлическим режимом обеспечены качественной информацией о расходах влекомых наносов на этом водотоке [Поздняков, 2012].

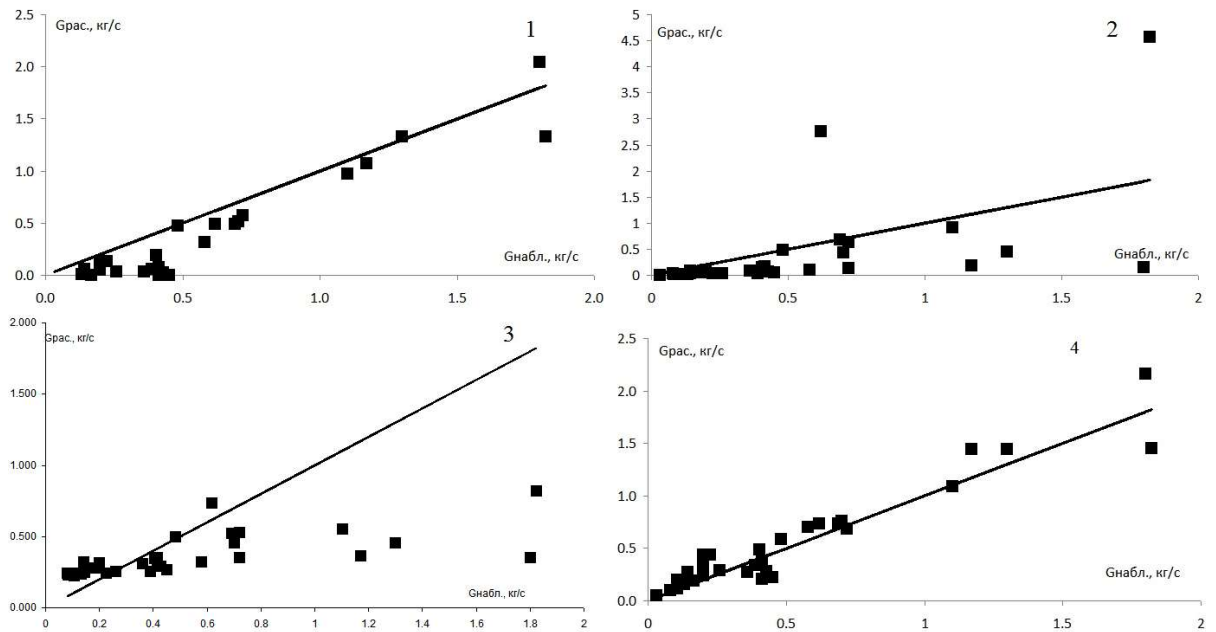


Рисунок 3.4 – Зависимости наблюдаемых на лотках и рассчитанных расходов наносов по формулам Шоклича – 1; Гончарова – 2; Позднякова – 3; (3.8) – 4

Сравнительный анализ формул общего расхода наносов

Из всех приведенных выше формул общего расхода наносов для последующих расчетов были приняты аналитическая формула расхода наносов (3.8), формулы Карима и Кеннеди, Янга, Энгелунда и Хансена, Молиаса и Ву, Р. Бэгнольда, Карасева и Гончарова. Для прочих формул данные натурных наблюдений представлены в недостаточном объеме, что затрудняет оценку некоторых параметров.

В качестве расчетного материала использовались данные наблюдений на 15 гидрометрических створах, расположенных на американских реках штатов Аляска, Айдахо, Колорадо, Вашингтон и Висконсин. Наблюдения на этих водотоках проводились в 70 – 80 годах прошлого столетия и результаты исследований представлены в отчете «Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams». Этот отчет опубликован на официальном сайте Геологической службы Министерства внутренних дел США и находится в свободном доступе [<http://pubs.usgs.gov/of/1989/0067/report.pdf>].

В отчете представлены данные о взвешенных и влекомых наносах, измеряемых почти одновременно. Кроме того, в отчете приводятся гидравлические переменные состояния, и гранулометрический анализ донных отложений и наносов.

«Данные, многие из которых не были опубликованы ранее, были измерены с помощью различных частных лиц и организаций... Несмотря на известные проблемы выборки, данные, вероятно, являются лучшими из доступных в настоящее время» [<http://pubs.usgs.gov/of/1989/0067/report.pdf>] (на 1989 год).

В отчете приводятся результаты наблюдений на девяноста трех водотоках, однако, наиболее полные данные, необходимые для расчета, представлены только для пятнадцати рек. Всего в расчетах использовались данные 252 измерений. Диапазон основных гидравлических характеристик расчетных рек, в пределах которых проводились расчеты, приведен в Таблице 3.5.

В Таблице 3.6 приводятся средние относительные отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми расходами наносов.

Среднее относительное отклонение по всем исследуемым водотокам (табл. 3.5) составило от 55 % (аналитическая формула расхода наносов) до 72 % (формула Энгелунда – Хансена). Формулы Янга, Молинаса и Ву, Карасева и Гончарова показали плохие результаты (превышение над наблюдаемыми расходами наносов составило более 1000 %, также имели место отрицательные значения), поэтому данные о расчетах по этим формулам в Таблице 3.6 не приводятся.

На Рисунке 3.5 приведены зависимости рассчитанных по приведенным выше формулам и наблюдаемых расходов наносов по исследуемым водотокам. Как видно из графиков, точки наблюдаемых и рассчитанных по формулам расходов наносов лежат практически на биссектрисе. Малые значения расходов наносов лучше вычисляются по формулам Карима-Кеннеди и Энгелунда, но, в то же время, точки наблюдаемых и рассчитанных по формуле Энгелунда расходов наносов имеют больший разброс и систематическое отклонение в сторону занижения рассчитанных расходов наносов для больших значений расходов наносов.

Таблица 3.5 – Основные гидравлические характеристики расчетных рек

| № | Гидрометрический створ | Уклон, б/р | Расход воды, м ³ /с | Скорость, м/с | Глубина, м | Ширина, м | $G_{вз}$, кг/с | $G_{вл}$, кг/с | $G_{общ}$, кг/с |
|----|--|------------|--------------------------------|---------------|------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------|
| 1 | Susitna River near Talkeetna, Alaska | 0.00146 | 612-1160 | 1.8-2.7 | 1.7-2.3 | 183-202 | 197-849 | 2.26-10.4 | 199-859 |
| 2 | Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska | 0.00131 | 564-946 | 2.0-2.5 | 2.5-3.1 | 108-123 | 462-1690 | 26.9-145 | 488-1835 |
| 3 | Tanana River at Fairbanks, Alaska | 0.000467 | 1010-2020 | 1.3-1.9 | 2-2.9 | 296-469 | 2410-10030 | 16.3-89.4 | 2426-10119 |
| 4 | Snake River near Anatone, Wash | 0.001033 | 1990-3770 | 2.4-3.3 | 4.7-5.8 | 181-197 | 61.6-1270 | 1.07-58.7 | 62.67-1328 |
| 5 | Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Wash. | 0.00311 | 112-248 | 1.5-3.1 | 0.77-1.5 | 61-70 | 538-5820 | 33-232 | 682-5901 |
| 6 | Fork Toutle River near Kid Valley, Wash. | 0.0037 | 110-185 | 2.4-2.8 | 0.85-1.1 | 56 -59 | 1590-4980 | 110-338 | 1883-5090 |
| 7 | Clearwater River at Spalding, Idaho | 0.000312 | 847-1810 | 1.4-2.5 | 4.3-5.1 | 135-143 | 15.8-124 | 0.578-6.54 | 16.38-130.54 |
| 8 | Yampa River at Deerloge Park, Colo | 0.000673 | 108-447 | 0.81-1.3 | 1.5-3.9 | 90-93 | 113-998 | 3.6-13.2 | 122.3-1008 |
| 9 | Wisconsin River at Muscods, Wis. | 0.000311 | 114-714 | 0.49-0.88 | 0.71-2.6 | 278-310 | 1.42-20 | 1.76-23.3 | 3.18-43.3 |
| 10 | Black River near Galesville, Wis. | 0.000221 | 20.1-80.7 | 0.44-0.54 | 0.55-1.4 | 72-122 | 0.422-5.5 | 1.28-4.09 | 1.702-9.59 |
| 11 | Chippewa River at Durand, Wis. | 0.000326 | 132-884 | 0.77-1.1 | 1.3-3.2 | 215-244 | 2.78-64.5 | 5.52-23.3 | 8.3-87.8 |
| 12 | Chippewa River near Pepin, Wis. | 0.000309 | 118-391 | 0.57-0.86 | 10.76-1.8 | 229-274 | 2.24-45.7 | 2.89-14.7 | 5.13-60.4 |
| 13 | North Fork of Lick Creek near Yellow Pine, Idaho | 0.00666 | 1.28-4.25 | 0.52-0.95 | 0.32-0.51 | 7.3-8.8 | 0.00294-0.0978 | 0.0005-0.0292 | 0.00344-0.127 |
| 14 | South Fork of Salmon River near Cascade, Idaho | 0.00695 | 22-77.5 | 0.62-1.3 | 1.1-1.7 | 31.5-34.5 | 0.132-4.11 | 0.00632-6.42 | 0.138-10.53 |
| 15 | Chippewa River near Caryville, Wis. | 0.000213 | 117-779 | 0.45-1.1 | 1.4-2.8 | 185-247 | 0.936-16.4 | 0-13.5 | 0.936-29.9 |

В целом, результаты расчета общего расхода наносов дают значительно меньшую ошибку, чем расчеты расхода влекомых наносов. Это объясняется тем, что в приведенных выше формулах связь расхода наносов и гидравлических

характеристик потока прописана в согласии с общими представлениями о физике процесса перемещения твердого вещества в речных потоках, основной движущей силой которого является сдвигающая проекция силы тяжести потока, которой противостоит сопротивление грунта сдвигу на твердой границе потока.

Значение параметра шероховатости, задействованное во многих формулах, для каждого водотока и для каждой формулы подбиралось отдельно путем оптимизации результата. Причем, значение параметра шероховатости для разных формул для одного и того же водотока может различаться на несколько порядков. Это говорит о том, что физический смысл этого параметра далек от его первоначального назначения и он в ряде случаев выполняет функцию эмпирического коэффициента.

Значения параметров f и c в аналитической формуле расхода наносов также назначались в результате подбора. Но, в отличие от коэффициента шероховатости, значение коэффициента внутреннего трения f в среднем близко к единице.

Таблица 3.6 – Средние относительные отклонения между наблюдаемыми и рассчитанными по разным формулам расходами наносов, %

| № | Гидрометрический створ | Аналит ф-ла | Карим и Кеннеди | Энгелунд - Хансен | Бэгнольд |
|---|--|-------------|-----------------|-------------------|----------|
| 1 | Susitna River near Talkeetna, Alaska | 34 | 40 | 43 | 40 |
| 2 | Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska | 25 | 33 | 35 | 33 |
| 3 | Tanana River at Fairbanks, Alaska | 28 | 33 | 36 | 37 |
| 4 | Snake River near Anatone, Wash | 85 | 57 | 57 | 60 |
| 5 | Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Wash. | 38 | 247 | 307 | 144 |
| 6 | Fork Toutle River near Kid Valley, Wash. | 36 | 19 | 21 | 25 |

Продолжение Таблицы 3.6.

| № | Гидрометрический створ | Аналит ф-ла | Карим и Кеннеди | Энгелунд - Хансен | Бэгнольд |
|---|-------------------------------------|-------------|-----------------|-------------------|----------|
| 7 | Clearwater river at Spalding, Idaho | 52 | 79 | 92 | 53 |

| | | | | | |
|---------------------|--|-----|----|-----|----|
| 8 | Yampa River at Deerloge Park, Colo | 60 | 79 | 82 | 70 |
| 9 | Wisconsin River at Muscods, Wis. | 44 | 73 | 78 | 55 |
| 10 | Black River near Galesville, Wis. | 30 | 37 | 48 | 55 |
| 11 | Chippewa River at Durand, Wis. | 38 | 37 | 36 | 75 |
| 112 | Chippewa River near Pepin, Wis. | 45 | 96 | 110 | 83 |
| 13 | North Fork of Lick Creek near Yellow Pine, Idaho | 110 | 44 | 44 | 68 |
| 14 | South Fork of Salmon River near Cascade, Idaho | 130 | 43 | 44 | 83 |
| 15 | Chippewa River near Caryville, Wis. | 67 | 44 | 47 | 77 |
| Среднее значение, % | | 55 | 64 | 72 | 64 |

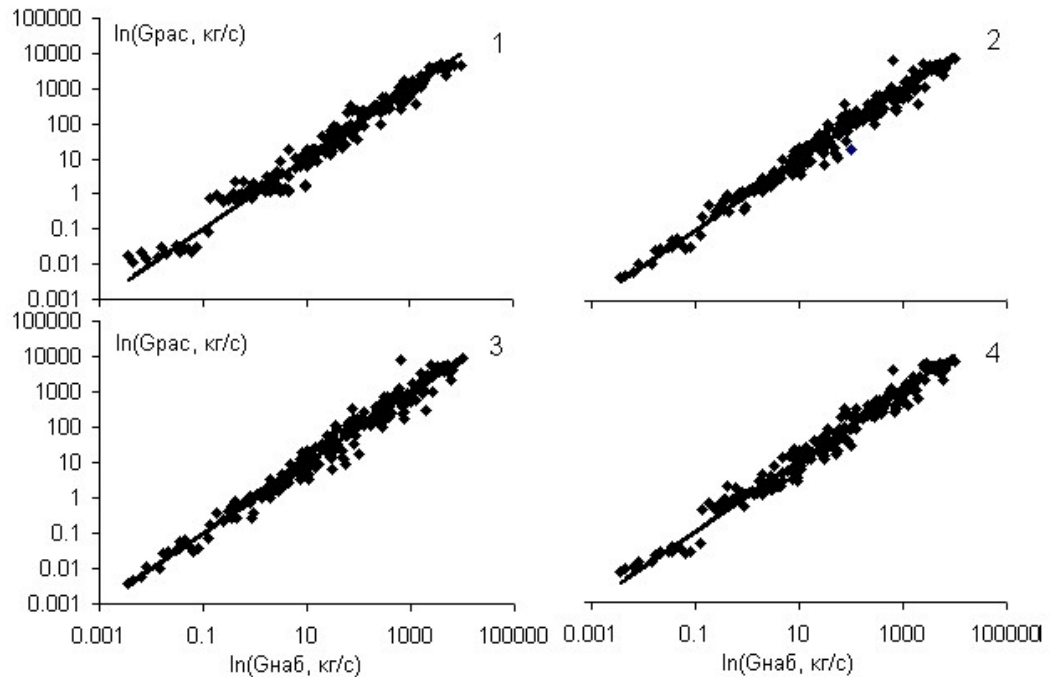


Рисунок 3.5 – Наблюдаемые и рассчитанные по аналитической формуле расхода наносов – 1, формулам Карима-Кеннеди – 2, Энгелунда-Хансена – 3 и Бэгнольда – 4

Сравнительный анализ формул расхода взвешенных наносов

Примем для расчетов все приведенные в настоящей работе формулы расхода взвешенных наносов за исключением формулы Чанга – Симонса – Ричардсона по

причине того, что определение некоторых параметров этой формулы представляется затруднительным.

В связи с тем, что водотоки, по данным наблюдений которых будут проведены расчеты, имеют преимущественно сток взвешенных наносов, для расчетов используем также и формулы общего расхода наносов G , показавшие хороший результат в расчетах, приведенных в вычислениях общего расхода наносов.

В качестве объектов исследования было выбрано шесть североамериканских рек, результаты расчетов общего расхода наносов по которым приводились выше. Эти реки характеризуются крайне незначительным вкладом расхода влекомых наносов в общий расход наносов. Этот вклад составляет от 0.3 до 9.5 %, то есть находится в пределах точности измерения. Основные гидравлические характеристики расчетных рек приводятся в Таблице 3.5.

В Таблице 3.7 приводятся средние относительные отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми расходами наносов, а на Рисунке 3.6 приведены зависимости наблюдаемых и рассчитанных расходов взвешенных наносов.

Среднее относительное отклонение по всем исследуемым водотокам (Таблица 3.7) составило от 41 % (аналитическая формула расхода наносов) до 97 % (формула Энгелунда – Хансена). Расчеты по формуле И.Ф. Карасева показали большие отклонения – превышение над наблюдаемыми расходами наносов для ряда водотоков составило более 1000 %. Результаты одного порядка точности (в пределах 40–60 %) показали аналитическая формула расхода наносов, формулы А.В. Караушева, Бэгнольда и Ван Рейна.

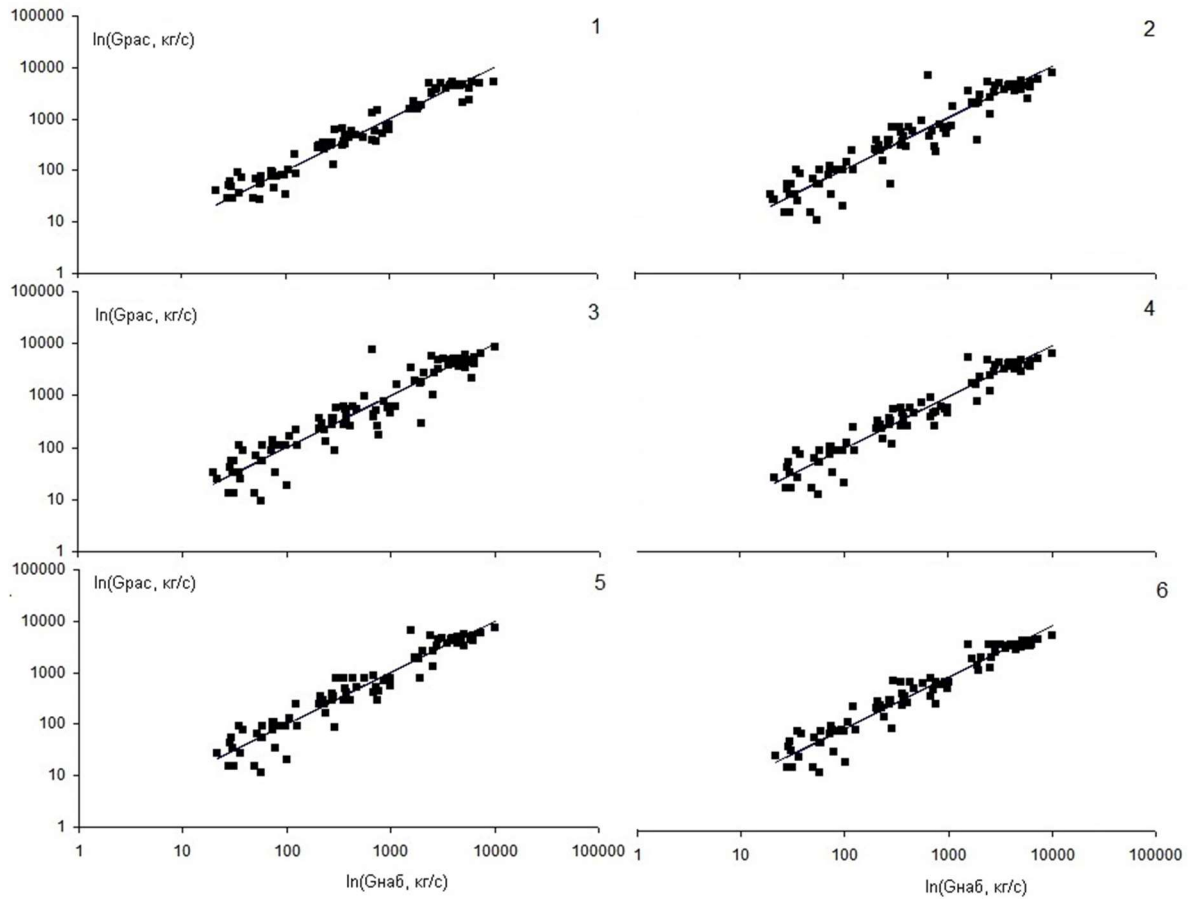


Рисунок 3.6 – Зависимости наблюдаемых и рассчитанных расходов взвешенных наносов по аналитической формуле – 1, по формулам: Карима – Кеннеди – 2, Энгелунда – Хансена – 3, Бэгнольда – 4, Ван Рейна – 5, А.В. Караушева – 6

Таблица 3.7 – Средние относительные отклонения между наблюдаемыми и рассчитанными по разным формулам расходов наносов, %

| № | Гидрометрический створ | Аналитич. Ф-ла | Карим и Кеннеди | Энгелунд - Хансен | Бэгнольд | Ван Рейн | И. Ф. Карасев | А.В. Караушев |
|---------------------|--|-------------------|--------------------|----------------------|----------|----------|---------------|------------------|
| 1 | Susitna River near Talkeetna, Alaska | 34 | 40 | 43 | 39 | 38 | 36 | 35 |
| 2 | Tanana River at Fairbanks, Alaska | 28 | 33 | 36 | 29 | 31 | 273 | 28 |
| 3 | Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Wash. | 38 | 247 | 307 | 110 | 120 | >1000 | 64 |
| 4 | Fork Toutle River near Kid Valley, Wash. | 36 | 19 | 21 | 26 | 24 | 850 | 25 |
| 5 | Clearwater River at Spalding, Idaho | 52 | 79 | 92 | 71 | 76 | 86 | 70 |
| 6 | Yampa River at Deerloge Park, Colo | 60 | 79 | 82 | 74 | 86 | >1000 | 85 |
| Среднее значение, % | | 41 | 83 | 97 | 58 | 62 | – | 51 |

Выводы по сравнительному анализу формул расхода наносов

Основой успешного моделирования мутности воды, общего транспорта наносов в речном потоке является правильное понимание и соответствующая математическая интерпретация этих явлений и процессов. При имеющемся многообразии формул расхода влекомых наносов, достаточном количестве формул общего расхода наносов и относительно небольшом наборе формул расхода взвешенных наносов качество расчетов по этим формулам является очевидно недостаточным. Большая погрешность расчетов расхода наносов объясняется отсутствием физически обоснованной концепции транспорта наносов, а также тем, что многие формулы получены для определенных гидравлических и морфометрических условий, то есть не являются универсальными. Определенный вклад в несоответствие рассчитанных и наблюдаемых значений привносит также и точность измерения расхода взвешенных и влекомых наносов.

3.3. Некоторые вопросы построения расчетных схем оценки твердого стока водных объектов

Для решения геоэкологических задач, связанных с текущей и прогнозной оценкой состояния водных объектов, одним из важных показателей является оценка твердого стока в его различных приложениях – статическом (мутность воды), динамическом (расход наносов), косвенно динамическом (переформирования отметок дна и берегов, заиление). Примером актуальнейшей геоэкологической задачи, связанной с оценкой твердого стока, является экологическая катастрофа дельты реки Меконг [Чан, 2019]. Сокращение твердого стока в результате непродуманной интенсивной водохозяйственной деятельности в русле реки Меконг и на ее водосборе привело к активному сокращению площади дельты, а также проникновению по системам каналов и проток морских соленых

вод вглубь дельты. Все это негативно влияет на агро– и рыбохозяйственную деятельность на территории дельты [Чан, 2019].

В настоящее время существует несколько сотен формул расходов взвешенных и влекомых наносов. Некоторые исследователи выделяют следующие группы формул расчета расхода влекомых наносов [Шмакова, 2013]:

1. Зависимость расхода наносов от гидравлических характеристик потока $G=f(v, h, I)$ (Шамов, Леви, Гончаров, Гришанин);
2. Связь расхода наносов с водностью (расходом воды) потока $G=f(Q)$ (Мейер-Петер, Шоклич);
3. Связь расхода наносов с влекущей силой потока $G=f(\tau=\rho ghI)$ (Егиазаров);
4. Формулы, где прописан стохастический характер движения наносов (Эйнштейн, Великанов).

Расхождение между наблюдаемыми и рассчитанными по этим формулам расходами наносов может составить тысячи процентов. Большая погрешность расчетов расхода наносов объясняется следующим (Рисунок 3.7):

1. Формулы получены на основании измеренных расходов наносов. Последние измеряются с большой погрешностью:
 - Измерение движущихся в речном русле наносов обычно приходится только на взвешенную фракцию.
 - Измерение речных наносов проводится с большой степенью дискретности.
 - Низкая инструментальная и методическая точность измерения речных наносов.
2. В формулах отсутствует физически обоснованная концепция транспорта наносов.
3. Формулы получены для определенных гидравлических и морфометрических условий, то есть не являются универсальными.

Отсутствие физически обоснованной концепции транспорта наносов для эмпирических формул выражается в том, что эти формулы основаны на опосредованных причинах транспорта наносов. Такие причины являются лишь

следствием основных факторов, определяющих как транспорт наносов, так и движение потока в целом.

В полуэмпирических и теоретических формулах расхода наносов процесс рассматривается на уровне движения отдельной частицы. Недостатки такого подхода состоят в следующем:

Требуется задание детальной гидравлической и морфометрической информации о водотоке;

Возникают проблемы с пограничной формой перемещения частицы (взвешенные и влекомые). Так как способ перемещения частицы может стремительно меняться, то непонятно, учитывать или нет массу данной частицы в общей массе донных (взвешенных) наносов;

Процесс движения наносов рассматривается на более низком, в отличие от массового транспорта наносов, структурном уровне. Однако известно, что на разных структурных уровнях процесс развивается по своим законам [Знаменская, 1992]. То есть нельзя на уровне движения отдельной частицы проводить обобщение для всей массы твердого вещества, проходящего через поперечное сечение потока за единицу времени.



Рисунок 3.7 – Основные недостатки формул расхода наносов

Таким образом, при разработке математических моделей двухфазного массопереноса в речном потоке и выводе соответствующих формул должны быть выбраны следующие методологические ориентиры построения расчетных схем транспорта наносов:

1. Учет влияния погрешности определения аргументов на расчетную погрешность функции, что обеспечивается минимумом аргументов и простой структурой расчетного выражения.
2. Устойчивость гидродинамического процесса, которая выражается в критерии устойчивости как отношения Лохтина–Великанова hI/d , где h – средняя глубина потока, м; I – средний уклон, б/р; d – характерный размер частиц.
3. Выбор оптимального масштаба описания двухфазного массопереноса.

1. Оценка вероятности ошибки расчетных формул. Помимо адекватности математической аппроксимации физического процесса переноса твердого вещества в потоке, рассчитываемая функция также характеризуется дисперсией. Эту дисперсию формируют неточности измерения или определения аргументов, входящих в расчетную формулу. Неточности же, согласно действующему ГОСТ Р 8.563–2009 складываются из методической и инструментальной составляющих погрешности измерений, а также погрешности, вносимой оператором.

То есть, рассчитанная величина расхода наносов «должна отражать в себе неточность аргументов и поэтому также должна быть представлена каким-то рядом значений, который будет иметь свое среднее и дисперсию» [Великанов, 1962]. После разложения выражения для дисперсии расчетной функции в ряд Тэйлора приближенное значение дисперсии σ_G будет равно

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum \left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial G}{\partial x_j} \right) \text{cov}(x_i, x_j),$$

где σ_{x_i} – ошибка определения аргумента x_i . Для независимых аргументов $\text{cov}(x_i, x_j) = 0$.

Таким образом, зная дисперсии аргументов формулы, а также значение ковариаций между ними, возможно вычислить дисперсию функции [Великанов, 1962]. Так, функция «определяется границами того интервала, внутри которого с заданной вероятностью она находится» [Великанов, 1962]. При этом, вероятность ошибки расчета будет равна (принимая в качестве допущения рассчитанное значение величины расхода наносов за среднее)

$$\delta_G = \frac{\sigma_G}{G} 100\%.$$

Очевидно, чем сложнее структура формулы, больше аргументов и их различных комбинаций, тем будет больше вероятность ошибки.

Оценим вероятность ошибки некоторых приведенных выше формул расхода наносов, имеющих относительно простую структуру. В качестве расчетного материала примем данные наблюдений на Tanana River at Fairbanks, Alaska. Значения ковариации между парными величинами переменных состояния потока расчетной реки будут равны $\text{cov}(Q, h)=15.21$; $\text{cov}(Q, v)=7.81$; $\text{cov}(v, h)=-0.00054$. Прочие пары аргументов рассматриваемых расчетных формул в качестве допущения полагаются независимыми.

Наблюдения на исследуемом водотоке приходятся на 80-е годы прошлого века и предполагают соответствующую инструментальную и методическую основу. Принимая во внимание приведенные в разных источниках по гидрометрическим стандартам данные по погрешностям определения гидравлических переменных состояния потока (Q, v, h, B, D), будем полагать среднюю погрешность каждой из этих величин 10 %. Понятно, что назначенные значения погрешностей носят определенно условный характер и являются лишь численным ориентиром для дальнейших расчетов. В Таблице 3.8 представлены расчеты вероятной ошибки $\delta_G, \%$ по приведенным выше формулам расхода наносов.

Как видно из Таблицы 2.8, в зависимости от структуры формулы меняется вклад погрешности определения аргумента в вероятность ошибки функции. Меньшую вероятность ошибки показала аналитическая формула наносов, в которой абсолютный показатель степени аргументов равен единице.

Вполне очевидно, что полученные результаты (Таблица 3.8) прямым образом связаны со средним относительным отклонением между рассчитанными и наблюдаемыми значениями расхода наносов (Таблица 3.7) – формулы с меньшей вероятностью ошибки показывают при расчетах лучшее соответствие наблюдаемым значениям.

Таблица 3.8 – Оценка вероятной ошибки $\delta_G, \%$

| Формулы | $\delta_G, \%$ |
|---------------------------------------|----------------|
| Аналитическая формула расхода наносов | 11 |
| Формула Бэгнольда | 42 |
| Формула А.В. Караушева | 32 |
| Формула Энгелунда-Хансена | 54 |
| Формула Карима-Кеннеди | 48 |

2. Устойчивость гидродинамического процесса. Представленные в данной работе методы основаны на аналитической формуле расхода наносов, которая в свою очередь является следствием основного уравнения модели движения воды и твердого вещества при условии равномерного установившегося движения речного потока. Вполне очевидно, что динамику наносов в неустойчивом русле при неустановившемся неравномерном движении описать однозначной зависимостью без привлечения дифференциальных уравнений, учитывающих эту динамику, невозможно.

Таким образом, аналитическая формула расхода наносов, как и прочие формулы расхода наносов, ориентированы на описание устойчивого русла согласно критерию Лохтина–Великанова, приведенному выше. Такой подход позволяет избежать неточностей, приносимых в расчетные схемы введением данных о характерных размерах частиц. При этом постановка вопроса для условия устойчивого русла характерна для геоэкологических задач, практическая реализация которых приведена в данной работе.

Рассмотрим несколько соотношений речной гидравлики с учетом критерия устойчивости Лохтина–Великанова. Для устойчивого русла этот критерий будет стремиться к единице

$$\frac{d}{Ih} \rightarrow 1,$$

где h – средняя глубина, м; I – уклон, б/р; d – характерный размер частиц, мм.

Тогда

$$I \approx \frac{d}{h}.$$

Формула Штриклера для параметра шероховатости n

$$n = \frac{0.15}{\sqrt{g}} d^{1/6},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Формула Маннинга для коэффициента Шези C

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}.$$

Тогда уравнение Маннинга-Штриклера

$$C = \frac{\sqrt{g}}{0.15} \frac{h^{1/6}}{d^{1/6}}.$$

Гидравлическая крупность ω , м/с [Караушев, 1960]

$$\omega = K \sqrt{dg}.$$

где K – коэффициент пропорциональности, б/р.

Формула транспортирующей способности может быть представлена как функция средней скорости потока [Великанов, 1955] или как функция динамической скорости [Баренблатт, 1953]. В первом случае полагается, что энергия на транспортировку твердого вещества в речном потоке определяется влекущей силой потока и транспортируемая концентрация будет пропорциональна

уклону в степени $1/2$. Во втором случае энергия на транспортировку твердого вещества в речном потоке определяется турбулентной энергией и транспортируемая концентрация будет пропорциональна уклону в первой степени. В общем виде транспортирующая способность потока (концентрация) S , $\text{м}^3/\text{м}^3$ [Bogárdi, 1974] может быть представлена выражением

$$S \sim \frac{v^{*3}}{\omega h g},$$

где v^* – динамическая скорость потока, $\text{м}/\text{с}$.

Формула для динамической скорости

$$v^* = \sqrt{ghI}.$$

Тогда при выражении транспортирующей концентрации с учетом критерия Лохтина–Великанова получается, что транспортируемая концентрация твердого вещества пропорциональна уклону первой степени

$$S \sim \frac{v^{*3}}{\omega h g} = \frac{g^{3/2} h^{3/2} I^{3/2}}{hgKd^{1/2} g^{1/2}} = \frac{h^{1/2} I^{3/2}}{Kd^{1/2}} = \frac{I}{K} \sim I.$$

Таким образом, для устойчивого русла с учетом критерия Лохтина–Великанова, показатели крупности частиц – гидравлическая крупность и характерный размер частиц – не являются определяющими в представлении зависимости транспорта наносов от гидравлических переменных состояния.

3. Масштаб процесса. В речной гидравлике можно выделить два основных подхода к описанию процессов, происходящих в двухфазном потоке – гидравлический и интегральный. Гидравлический подход представляет собой взаимосвязанный комплекс переменных состояния потока, полученный для

условий точного задания последних в точке или на вертикали или для выбранного фрагмента струи.

Расчетные схемы, разработанные в условиях детализации морфометрических и гидравлических исходных данных имеют известную ценность для исследования процесса точечного массопереноса и могут быть распространены на устойчивые равномерные участки каналов, имеющие однородную скоростную структуру. Однако, при численной реализации подобного рода схем на неравномерные участки русла, точность вычислений как правило, не высока [Лепихин, 2019].

Интегральный подход состоит в представлении исходных данных в виде средних интегральных значений гидравлических переменных состояния потока – скорости и глубины. Структура расчетных схем при этом более устойчива, параметры в этих схемах имеют более узкий диапазон значений. Такой подход более жизнестоек к использованию в условиях неравномерности и неустойчивости речного потока, что подтверждается и рядом других исследователей. Например, «вследствие сложного характера движения отдельных частиц жидкости уравнения движения при турбулентном режиме нельзя применять для одной отдельной частицы, а надо писать их для достаточно большого количества частиц, что фактически сводится к осреднению уравнений движения» [Дмитриевский В.И., 1962]. Таким образом, представленные подходы отличаются концептуально в вопросе рассматриваемого масштаба процесса двухфазного массопереноса.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для решения конкретной задачи должны использоваться расчетные схемы, разработанные для определенного структурного уровня процесса двухфазного массопереноса.
2. Расчетная схема должна иметь достаточно простую структуру и обеспечиваться данными стандартных гидрометрических наблюдений.
3. При построении расчетной схемы должно быть понимание различий в определении процесса и явления. Любой процесс предполагает определенную изменчивость в переменных состояния явления и описывается дифференциальными уравнениями. Явление же показывает взаимосвязь

переменных состояния в условиях стационарности и равномерности протекания процесса. Так, формулы расхода наносов описывают статическое сопряжение переменных состояния потока в фиксированный момент времени, а значит предполагается динамическое равновесие в системе «речной поток – донные отложения – наносы». Это равновесие критериально представлено соотношением Лохтина – Великанова, приведенным выше.

Все представленные выше методологические ориентиры или принципы научного исследования, полностью лежат в основе представленной в данной работе аналитической формуле общего расхода наносов и частично в формулах расхода наносов Бэгнольда, Карима-Кеннеди и Энгелунда-Хансена, объясняя хорошее соответствие рассчитанных по этим формулам и наблюдаемых значений расхода наносов.

3.4. Транспортирующая способность потока

Транспортирующая способность потока – это максимальный расход наносов, который может перенести поток при фиксированном расходе воды. Транспортирующая способность потока определяет процесс переотложения наносов в русле – основной фактор русловых процессов. При расходе наносов меньшем, чем транспортирующая способность потока, происходит вовлечение в движение донных отложений, размыв дна. При расходе наносов, начинающем превышать транспортирующую способность потока, происходит оседание движущихся наносов, увеличение отметок дна. Если фактический расход наносов в речном потоке соответствует его транспортирующей способности, то между процессами взвешивания и осаждения наносов наблюдается динамическое равновесие.

Учет соответствия между стоком наносов и характером русловых процессов определяет точность и надежность прогнозов русловых деформаций. «Это позволит предвидеть возможные изменения морфодинамических типов русел,

параметров их живых сечений и скоростей размывов берегов и дна» [Чалов, 2011 б].

Известно, что для оценки расхода взвешенных и влекомых наносов существует достаточно много формул. Все эти формулы представляют собой зависимости количества перемещаемого вещества от переменных состояния потока. Часто эти формулы получены для отдельных водотоков или обобщены для рек одного типа. Также, наличие в формулах эмпирических коэффициентов, физический смысл которых нередко не ясен, сужает область применения этих формул. Однако именно оптимизация значений эмпирических коэффициентов позволяет минимизировать отклонение между результатами вычислений по расчетной формуле и данными наблюдений для отдельного расчетного створа.

При выводе же формулы транспортирующей способности потока сложно ориентироваться на данные наблюдений на конкретной реке, так как не на всех водотоках и не для всех периодов водности достигается предельное насыщение потока наносами.

Одним из определяющих факторов вовлечения частицы наносов в поток является режим турбулентности речного потока – пульсации скорости оказывают взвешивающее и поддерживающее в потоке действие на частицы. Но известно, что нахождение в потоке твердого вещества значительно уменьшает пульсации скоростей, течение становится относительно упорядоченным. Тогда как при прочих равных условиях осветленный поток, располагая большой размывающей способностью русла, имеет более турбулентный режим движения.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что степень насыщения потока наносами имеет нелинейную зависимость от средней скорости потока и зависит, помимо прочего, от режима движения потока.

Таким образом, при выводе формулы транспортирующей способности потока должны приниматься во внимание не только зависимость количества перемещаемого вещества от гидравлических переменных состояния потока, но и факторы, определяющие предельное насыщение жидкости взвесями. К этим факторам можно отнести взвешивающую способность потока, критерии Фруда и

Рейнольдса, а также наличие в потоке мелких фракций. Известно, что высокое содержание мельчайших частиц увеличивает вязкость воды и, как следствие, влияет на способность потока к транспорту более крупных фракций. Таким образом, «предел насыщения потока наносами зависит как от гидравлики потока, так и от состава транспортируемых наносов» [Караушев, 1960].

Формулы транспортирующей способности потока

Приведем несколько формул для количественной оценки транспортирующей способности потока G_{max} , кг/с, по которым в дальнейшем будут проводиться расчеты.

Формула *Е.А. Замарина* для гидравлической крупности $0.002 < \omega < 0.008$ м/с [Замарин, 1951]

$$G_{max} = Q \cdot 0.022 \left[\frac{v}{\omega} \right]^{\frac{3}{2}} \sqrt{hI}. \quad (3.9)$$

Формула *В.Н. Гончарова* [Гончаров, 1962], рекомендуемая в СО 34.21.204–2005 [2006] для расчета транспортирующей способности потока при условии $u^*/\omega < 2.5$ имеет вид

$$G_{max} = \rho_{\text{грунта}} Q \frac{1 + \varphi}{800} \frac{d}{h} \frac{v_n}{v} \left(\frac{v^3}{v_n^3} - 1 \right) \left(\frac{v}{v_n} - 1 \right), \quad (3.10)$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}{0.9 \rho_{\text{воды}}} \frac{gd}{\omega^2}},$$

$$v_n = 0.96 \sqrt{gd^{0.4}(d + 0.0014)^{0.6}} \left(\frac{h}{d}\right)^{0.2}$$

где v_n – неразмывающая скорость потока, м/с;

Область применения формулы В.Н. Гончарова обоснована опытами при условиях: $10 \leq h/d \leq 1550$ ($8.7 \leq h/d_{95} \leq 500$); $1 \leq v/v_n \leq 1.8$.

Формула Р. Бэгнольда [Visser, 1995]

$$G_{max} = Q \rho_{грунта} \frac{\rho_{воды}}{\rho_{грунта} - \rho_{воды}} \frac{C_f v^2}{gh} \left(\frac{0.13}{f - I} + \frac{0.01}{\omega/v - I} \right), \quad (3.11)$$

$$C_f = \left(\frac{k}{\ln(12h/\Delta)} \right)^2,$$

$$\Delta = \begin{cases} 3d_{90} & \text{при } \frac{\rho_{воды}}{\rho_{грунта} - \rho_{воды}} \frac{u_*^2}{gh} < 1 \\ 3 \frac{\rho_{воды}}{\rho_{грунта} - \rho_{воды}} \frac{u_*^2}{gh} d_{90} & \text{при } \frac{\rho_{воды}}{\rho_{грунта} - \rho_{воды}} \frac{u_*^2}{gh} \geq 1 \end{cases},$$

где k – постоянная Кармана, равная 0.41; Δ – эффективная высота выступов шероховатости; d_{90} и d_{95} – диаметр частиц 90 и 95 % обеспеченности соответственно, мм.

Формула (3.11) представляет собой сумму транспортирующей способности потока для взвешенных и донных наносов.

Вывод формулы транспортирующей способности потока

При планировании различных водохозяйственных мероприятий часто необходимо располагать о максимальной мутности потока при заданном расходе воды для естественного фона. Однако, формулы расчета максимальной

взвесенесущей нагрузки потока (транспортирующей способности последнего) часто бывают несостоятельны в части точности вычислений. Это объясняется тем, что эти формулы получены в основном для деривационных каналов, имеющих однородные геометрию и подстилающую поверхность. Для условий естественных водотоков оптимизация структуры и калибровка параметров таких формул затруднена по причине того, что не вполне ясно момент достижения речным потоком максимальной взвесенесущей нагрузки.

Очевидно, что один и тот же расход воды способен перенести количество наносов $G=[0; G_{max}]$, где G_{max} – максимально возможное количество наносов, переносимое данным расходом воды за единицу времени или транспортирующая способность потока. При $G=0$ поток будет осветленным и его скорость будет минимальной, а глубина возрастет. При $G=G_{max}$ скорость возрастет, а глубина потока уменьшится [Vanoni, 1963; Vanoni, 1980]. Причем каждому крайнему случаю соответствует один и тот же расход воды ($Q=const$). Очевидно, что заданный расход воды при постоянной ширине потока может быть получен различными сочетаниями глубины и скорости. Отложив по одной оси скорость, а по другой глубину потока и, нанеся на этот график точки, соответствующие одному значению расхода воды $h_i \cdot v_i = Q/B = const$ при ширине потока $B = const$, получится функция, представляющая **фазовое гидравлическое пространство потока** (пространство состояний системы). Каждому сочетанию глубины и скорости ($h_i \cdot v_i = Q/B = const$) будет соответствовать расход наносов G_i . 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, определяющую соотношение скорости и глубины потока. Транспортирующий потенциал потока меньше или равен транспортирующей способности потока (при постоянном расходе воды).

Крайние точки полученной функции определяются физикой процесса, и им соответствуют состояния осветленного потока (h_{max}, v_{min}) с одной стороны и транспортирующей способности потока (h_{min}, v_{max}) с другой стороны.

Очевидно, что область осветленного потока будет характеризоваться максимальной неразмывающей скоростью, тогда как область максимальной взвесенесущей нагрузки на поток – минимальной заиляющей скоростью.

Фазовое гидравлическое пространство характеризуется морфометрией русла и характером подстилающей поверхности, а транспортирующий потенциал потока определяется в соответствии с количеством поступившего в поток твердого вещества. Вид функции, аппроксимирующей фазовое гидравлическое пространство, определяется формой поперечного сечения, а сама функция представляет собой соотношение скорости и глубины для постоянного расхода воды в расчетном створе. На Рисунке 3.8 приведен пример фазового гидравлического пространства для русла прямоугольной формы.

За основу при выводе формулы транспортирующей способности потока примем аналитическую формулу общего расхода наносов (3.8).

Расход наносов G и глубина в формуле (3.8) взаимосвязаны между собой, то есть потоку при фиксированном расходе воды и уклоне соответствует именно та глубина, которая определяется текущей взвесенесущей нагрузкой потока. То есть при увеличении расхода наносов скорость потока увеличится, а глубина уменьшится. Это подтверждается и данными экспериментов, приведенными на Рисунок 3.9 [Vanoni, 1980].

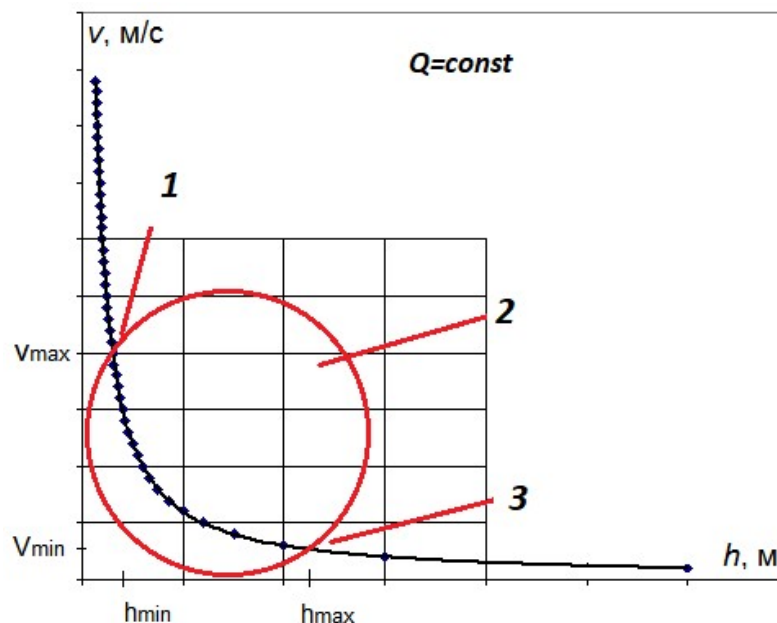


Рисунок 3.8 – Фазовое гидравлическое пространство потока в расчетном створе при $Q=\text{const}$ (1 – область максимальной взвесенесущей нагрузки на поток; 2 – область физически возможных значений; 3 – область осветленного потока)

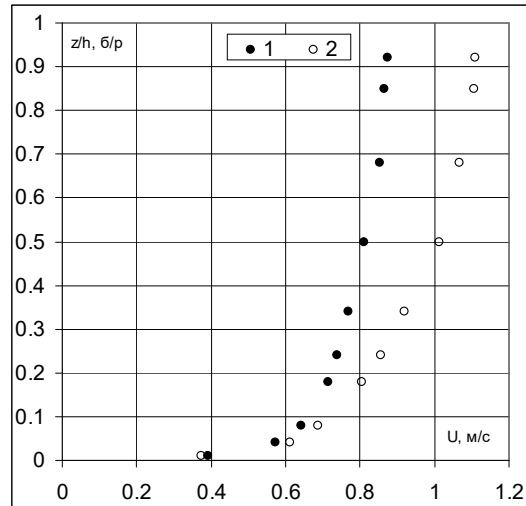


Рисунок 3.9 – Распределение осредненных скоростей U в потоке чистой воды (1) и в потоке со взвесью (2) по относительной глубине потока z/h [Vanoni, 1963; Vanoni, 1980]

Изложенное выше дает основание полагать транспортирующую способность потока G_{max} равной расходу наносов при максимальном значении скорости потока (и минимальной глубине) для заданного расхода воды, то есть

$$G_{max} = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{h_{min} g} - (1-f) \rho_{\text{воды}} I \right], \quad (3.12)$$

где h_{min} – минимально возможная глубина при фиксированном расходе воды, уклоне и крупности донных отложений, м.

Минимально возможная глубина обусловлена морфометрией русла и расходом воды. Уменьшение h_{min} уже практически невозможно, так как в пределах

значения этой глубины будет происходить интенсивное оседание взвешенного вещества на дно.

Таким образом, расчет транспортирующей способности потока предваряет оценка величин h_{min} или v_{max} .

Для оценки граничной, так называемой заиляющей, скорости v_{max} , при которой, при которой смесь в потоке либо осаждается, либо меняется качественное состояние потока – поток становится вязким, можно использовать, например, выражение [Лямаев, 1988]

$$v_{max}^2 = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} \frac{1}{2} gh. \quad (3.13)$$

Согласно формуле (2.13) минимальная глубина потока будет равна

$$h_{min} = \sqrt[3]{2 \frac{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{грунта}}} \frac{Q^2}{B^2 g}}. \quad (3.14)$$

Тогда выражение для транспортирующей способности потока (3.11) с учетом формулы (3.14) примет вид

$$G_{max} = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{g \sqrt[3]{2 \frac{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{грунта}}} \frac{Q^2}{B^2 g}}} - (1-f)\rho_{\text{воды}} I \right]. \quad (3.15)$$

Таким образом, полученная аналитическая формула транспортирующей способности потока (3.15) 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].

Следует заметить, что полученная формула (3.15) имеет некоторые ограничения для расчетов. При значении параметра $c=0$ (как и получалось при оптимизации параметров формулы для некоторых водотоков), определяющей переменной состояния расхода наносов является расход воды.

В качестве основы для дальнейших расчетов приняты данные наблюдений на 15 гидрометрических створах североамериканских рек, данные о которых приводятся выше.

Примеры фазового гидравлического пространства

На примере некоторых североамериканских рек, имеющих прямоугольную форму поперечно сечения расчетного створа, проиллюстрируем фазовое гидравлическое пространство. Прямоугольная форма поперечного сечения подтверждается линейным характером связи $Q=f(h)$.

На Рисунке 3.10 приведены графики связи средней глубины потока и расхода воды. Красными линиями обозначены области с одинаковыми расходами воды и соответствующими этим расходам разными значениями глубин. В пределах каждой области расходы воды различаются не более чем на 3 %, что значительно выше точности измерения этой величины. Это дает основание полагать значение расхода воды в пределах выделенной области постоянным и рассматривать средние глубины (и скорости течения) потока в виде переменных относительно этого расхода воды.

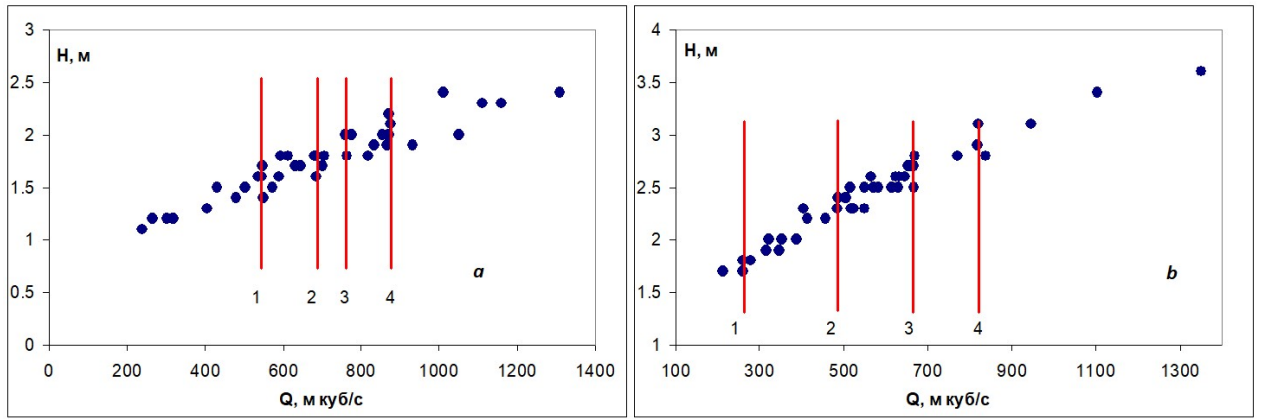


Рисунок 3.10 – Графики связи средней глубины потока и расхода воды (a – Susitna River near Talkeetna; b – Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska)

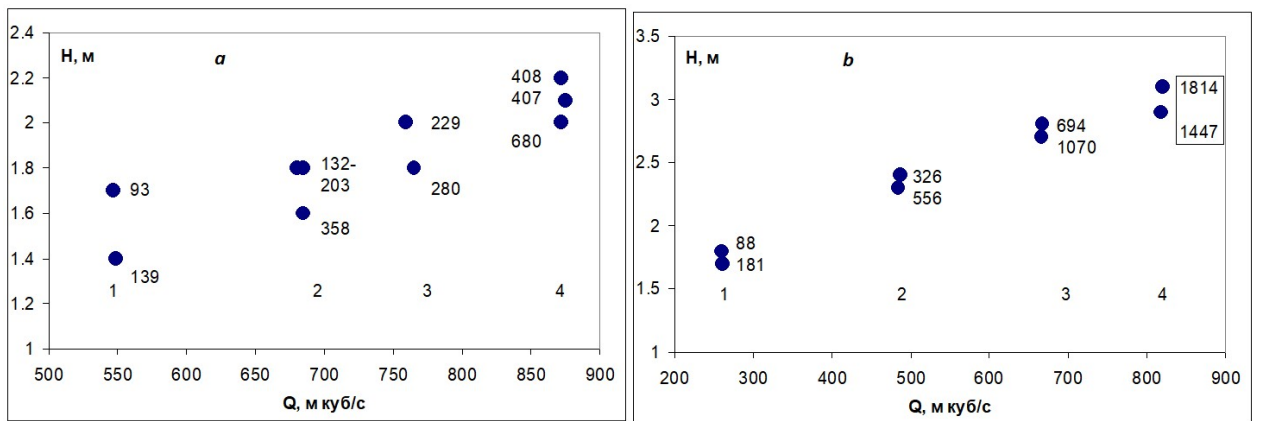


Рисунок 3.11 – Поле точек, соответствующее выделенным участкам на рисунке 3.10 (a – Susitna River near Talkeetna; b – Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska)

На Рисунке 3.11 представлено поле точек, соответствующее выделенным участкам на Рисунке 3.10 с подписанными значениями общего расхода наносов, кг/с. В основном (в 80 % случаев), для всех рассматриваемых областей малым значениям глубины в пределах одного и того же расхода воды соответствует большее значение общего расхода наносов. Это является подтверждением концепции представленной выше теории фазового гидравлического пространства.

Качественная оценка

В основу дальнейших расчетов положены формулы транспортирующей способности потока (3.9) – (3.12) и (3.15). Основным критерием качества вычислений будет служить условие того, что наблюдаемые значения общего расхода наносов не будут превышать рассчитанные значения этой величины. Такая, несколько условная и скорее качественная оценка корректности работы формул объясняется тем, что для расчетных водотоков отсутствует информация о достижении взвесенесущей нагрузки потока своих максимально возможных величин. Или, иными словами, нет ясности – соответствует ли измеренный расход наносов $G_{наб}$ транспортирующей способности потока G_{max} . Подобный качественный анализ допускается и, например, в СО 34.21.204-2005 [2006] – «в этом случае верхняя огибающая характеризует транспортирующую способность потока».

Эта качественная оценка дополняется еще одним требованием – рассчитанные значения должны в разумных пределах отклоняться от измеренных. То есть рассчитанные максимальные расходы наносов $G_{max\ рас}$ по своему значению должны соответствовать гидравлическим условиям водотока.

В общем виде изложенные условия соответствия можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{наб} \leq G_{max\ рас} \leq k \cdot G_{наб} \\ k \in \left[1, \frac{G_{max}}{G_{наб}} \right] \end{array} \right. , \quad (2.16)$$

где k – коэффициент, определяющий степень наполненности русла перемещаемыми наносами (по результатам наблюдений), б/р.

Для формулы (3.15) параметры трения приняты равными тем параметрам, которые были оптимизированы для периода большой и средней водности в расчетах по аналитической формуле расхода наносов. Ввиду того, что для

некоторых водотоков в результате подбора параметр $c=0$, то в расчетах были задействованы данные измерений только для половины расчетных водотоков.

Для формулы Бэгнольда коэффициент внутреннего трения подбирался таким образом, чтобы условия соответствия (3.16) соблюдались самым оптимальным образом.

Выполнение условий применимости формулы Гончарова имело место лишь для семи из пятнадцати водотоков, а для формулы Замарина для тринадцати водотоков.

В Таблице 3.9 приведены относительное количество случаев неперевышения $\delta, \%$ наблюдаемых значений расхода наносов рассчитанными, средние относительные отклонения $\sigma_{\text{общ}}, \%$ (между рассчитанными значениями транспортирующей способности потока и наблюдаемого общего расхода наносов) и $\sigma_{\text{min}}, \%$ (только между рассчитанными значениями транспортирующей способности потока, не превышающими наблюдаемые, и наблюдаемого общего расхода наносов). Последний показатель иллюстрирует степень отклонения в сторону явно ошибочного расчета – поскольку расчет G_{max} предполагает выполнение условия (3.16).

На графиках, приведенных на Рисунке 3.12 наглядно представлены результаты вычислений по четырем расчетным формулам. Степень качественного соответствия рассчитанных значений общего расхода наносов наблюдаемым значениям демонстрирует превышение рассчитанных точек над линиями биссектрис.

Таблица 3.9 – Результаты расчетов по формулам транспортирующей способности потока

| Формула | $\delta, \%$ | $\sigma_{\text{общ}}, \%$ | $\sigma_{\text{min}}, \%$ |
|-----------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| Замарина | 45 | 555 | 671 |
| Гончарова | 38 | 819 | 882 |
| Бэгнольда | 24 | 849 | 434 |

| | | | |
|-------|----|----|----|
| (5.7) | 33 | 87 | 66 |
|-------|----|----|----|

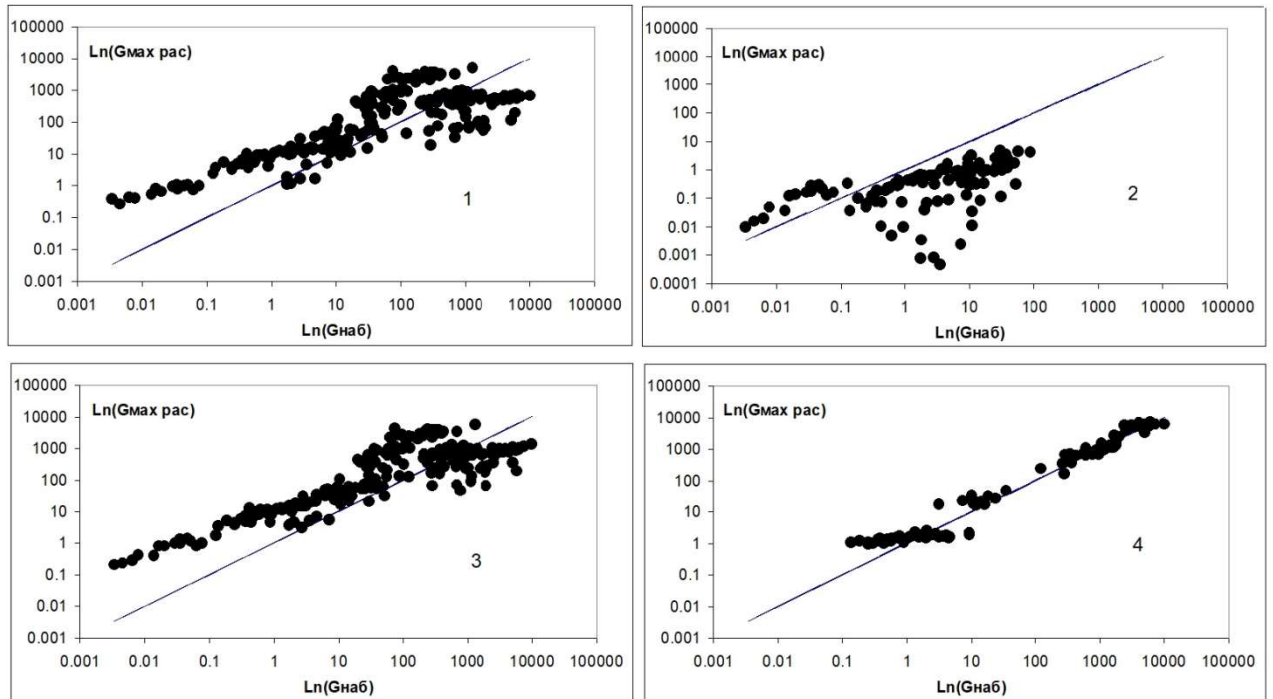


Рисунок 3.12 – Результаты вычислений транспортирующей способности потока по формулам: 1 – Замарина; 2 – Гончарова; 3 – Бэгнольда; 4 – (2.15)

Результаты расчетов, приведенные выше, проиллюстрировали в обобщенном виде то, что в основном (55 – 76 %) рассчитанные значения расходов наносов превышают наблюдаемые значения. Однако наиболее соответствуют порядку величин наблюдаемых расходов наносов значения, рассчитанные по формуле (3.15) – отклонение $\sigma_{\text{общ}}$ 87 %. Для этой же формулы получены и наиболее адекватные значения показателя σ_{min} – 66 %.

Количественная оценка

В основу расчетов для проведения количественной оценки качества расчетных формул легло сопоставление рассчитанных по приведенным выше формулам и наблюдаемых значений транспортирующей способности потока. Для

расчетных водотоков при наблюдаемой средней глубине потока по формуле (3.13) были рассчитаны минимальные незаиляющие скорости потока v_{max} . Эти скорости были сопоставлены с наблюдаемыми скоростями v , которым соответствуют средние глубины. При примерном равенстве скоростей v и v_{max} можно предполагать, что измеренный расход наносов является транспортирующей способностью потока $G_{max \text{ нагл}}$. Выявленные значения $G_{max \text{ нагл}}$ сравнивались со значениями G_{max} , рассчитанными по формулам транспортирующей способности потока, приведенным выше.

В Таблице 3.10 приведены данные для расчета и результаты вычислений для створа Fork Toutle River near Kid Valley. Для этого створа, единственного из всех расчетных створов, значения v и v_{max} показали достаточную близость. Расхождение между значениями этих величин находится в пределах 1 – 15 %. Вычисления G_{max} проводились по всем приведенным в работе формулам за исключением формулы Гончарова ввиду несоблюдения условий применимости этой формулы для расчетного водотока.

Как видно из Таблицы 3.10, наилучшее соответствие наблюдаемых и рассчитанных значений транспортирующей способности потока показала формула (3.15). Среднее относительно отклонение для этой формулы составило 29 %. Для формул Замарина и Бэгнольда рассчитанные значения G_{max} оказались существенно ниже наблюдаемых.

Таблица 3.10 – Данные для расчета и результаты вычислений транспортирующей способности потока, Fork Toutle River near Kid Valley

| Q , м ³ /с | v_{max} , м/с | v , м/с | B , м | h , м | $G_{max \text{ нагл}}$, кг/с | G_{max} , кг/с | | |
|-------------------------|-----------------|-----------|---------|---------|-------------------------------|------------------|----------|--------|
| | | | | | | Замарин | Бэгнольд | (3.15) |
| 185 | 2.9 | 2.8 | 56 | 1.1 | 5090 | 110 | 352 | 3367 |
| 110 | 2.6 | 2.4 | 56 | 0.9 | 1883 | 53 | 181 | 1953 |

| | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|----|------|------|----|-----|------|
| 123 | 2.6 | 2.6 | 56 | 0.85 | 2045 | 64 | 269 | 2417 |
| 147 | 2.6 | 2.4 | 59 | 0.85 | 1714 | 69 | 260 | 2607 |
| 153 | 2.8 | 2.4 | 59 | 0.98 | 1978 | 71 | 225 | 2348 |

Многие формулы транспортирующей способности потока и минимальной незаилающей скорости были получены опытным путем для каналов в условиях максимальной загруженности потока наносами. Для естественных же водотоков выбор формулы транспортирующей способности потока, оптимизация параметров формулы крайне затруднены из-за отсутствия данных достоверных наблюдений за предельно возможным расходом наносов в потоке. Ввиду этого, расчеты, приведенные в данной главе, носят несколько условный характер. Но при этом, полученные результаты как раз и демонстрируют незаконченность теоретических исследований в изучении транспортирующей способности естественных водотоков.

3.5. 2D модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме

Спектр моделей, описывающих внутриводоемные процессы достаточно широк. Как отмечалось в первой главе, это и одномерные, двумерные или трехмерные гидродинамические модели, и балансовые (нульмерные) модели, и экологические модели, основанные на различных эмпирических закономерностях, установленных в процессе изучения и обработки результатов натурных наблюдений. Достаточно подробный обзор существующих моделей экосистем пресноводных озер представлен в работах В.В. Меншуткина, Л.А. Руховца и Н.Н. Филатова [2013, 2014], а также в ряде зарубежных обзорных публикаций [Jørgensen, 1994; 2008; Hutter et al., 2011] и многих других научных работах.

Совместно со специалистами Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН выполнен ряд работ по трехмерному моделированию гидродинамики и переноса консервативной примеси в Чудско-Псковском озере и в Невской губе, фактически являющейся в настоящее время

пресноводным водоемом. Инструментом для моделирования послужила трехмерная модель общей циркуляции океана Принстонского Университета (POM – Princeton Ocean Model) [Blumberg, Mellor, 1987], адаптированная к условиям изучаемых пресноводных водоемов.

При очевидных достоинствах трехмерных моделей, область их применения ограничивается двумя важными с практической точки зрения обстоятельствами: во-первых, они являются затратными в вычислительном отношении и, во-вторых, они требуют подробной информации о моделируемом объекте. В частности, трехмерные модели требуют данных о распределении глубин в озере, а в задаче краткосрочного прогноза состояния озера необходимо иметь также данные измерений начального состояния. Таким образом, трехмерные модели целесообразно применять к водным объектам, обеспеченным достаточным количеством наблюдений. В то же время, подавляющее большинство водоемов характеризуются дефицитом информации об их характеристиках. Ввиду указанной причины для широкого круга задач, связанных с необходимостью оценки массопереноса по акватории мелководных озер, широкое распространение получили двумерные модели, основанные на уравнениях мелкой воды [Стокер, 1959; Вольцингер, Пясковский, 1977]. Следует отметить, что в отечественных исследованиях теоретический метод построения плановых внутриводоемных течений был представлен еще в 1931 г. [Бернадский, Проскуряков, 1931]. Этот метод основан на решении динамического уравнения транзитной струи и фактически является модификацией современных уравнений мелкой воды. В классической гидродинамической и гидравлической практике уравнения плановых течений или уравнения мелкой воды представляются двумерным вариантом уравнений Сен-Венана. Уравнения плановых течений получаются интегрированием по глубине уравнений Навье — Стокса. Условие применимости этих уравнений – значительное превосходство горизонтального масштаба над вертикальным. При этом полагается, что горизонтальные скорости одинаковы по всей глубине [<http://kiwi.atmos.colostate.edu/group/dave/pdf/ShallowWater.pdf>].

В зависимости от поставленной задачи, при расчетах заиления водохранилищ или перестроении дна мелких водоемов гидродинамические уравнения дополняются формулами расхода наносов либо членами, описывающими динамику твердой фазы взвешенного потока [Зиновьев и др., 1992; Кондратьев, Шмакова, 2017 б; Рахуба, Шмакова, 2018; Кондратьев, Шмакова, 2018 а].

Двумерная модель гидродинамики и транспорта наносов в мелководном водоеме (Свидетельство о государственной регистрации №2018615451 от 08.05.2018) разработана в Институте озераедения РАН и основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке [Филатов Н.Н., 1983; Рахуба, 2012] и аналитической формулы расхода наносов (3.8) [Шмакова, 2013], что позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(U^2/H)}{\partial x} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial x} = aV + c_a \frac{\rho_a}{\rho_{\text{воды}}} W_x W + D \frac{\partial U^2}{\partial^2 x} - g \frac{UV_{\text{рез}}}{C^2 H^2},$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2/H)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial y} = -aU + c_a \frac{\rho_a}{\rho_{\text{воды}}} W_y W + D \frac{\partial V^2}{\partial^2 y} - g \frac{VV_{\text{рез}}}{C^2 H^2}, \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0,$$

$$G = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{Hg} - (1-f) \rho_{\text{воды}} I \right],$$

где t – время, с; x и y – координаты, м; U и V – полные потоки по координатным направлениям x и y соответственно, м²/с; $V_{\text{рез}}$ – результирующий полный поток, м²/с; h – невозмущенная глубина, м; z – уровень на свободной поверхности, м; $H=(h+z)$ – полная глубина, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $a = 2\omega \sin\varphi$

– параметр Кориолиса; $\omega = 2\pi/\text{сут}$ – угловая скорость вращения Земли, рад/сут; φ – географическая широта, град; c_a – коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, б/р; ρ_a – плотность атмосферы, кг/м³; $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды, кг/м³; W_x и W_y – компоненты составляющей скорости ветра по координатным направлениям x и y соответственно, м/с; W – результирующий вектор скорости ветра, м/с; C – коэффициент Шези, м^{0.5}/с; D – коэффициент горизонтального турбулентного обмена, б/р; где $\rho_{\text{воды}}$ и $\rho_{\text{грунта}}$ – плотности воды и грунта, кг/м³; $Q = B \cdot V_{\text{рез}}$ – расход воды в расчетной ячейке, м³/с; I – уклон дна, б/р; f – коэффициент внутреннего трения, б/р; c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); B – ширина расчетной ячейки, м.

Коэффициент Шези рассчитывается по формуле Маннинга: $C = \frac{H^{1/6}}{n}$, где n – параметр шероховатости, б/р. Граничные условия на твердых боковых границах для полных потоков заданы условиями поглощения $U=0$, $V=0$. Уровень определяется из уравнения неразрывности. Граничные условия на открытых боковых границах заданы следующим образом: для стока – условия излучения; для источника – функция времени $U=f_1(t,x,y)$, $V=f_2(t,x,y)$.

Совместное решение представленных выше уравнений мелкой воды и аналитической формулы расхода наносов позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища.

Параметры формулы (3.8) оцениваются по данным гидрометрических наблюдений на притоках в водоем либо определяются по рекам-аналогам.

Уравнения мелкой воды (3.17) решаются полунеявной конечно-разностной схемой – градиенты уровня и придонное трение аппроксимируются неявно, а адвективные члены, сила Кориолиса и горизонтальный турбулентный обмен явно. Система уравнений (3.17) решается расщеплением по временному слою уравнений движения (уравнение для U на первом временном слое, уравнение для V на – втором) и последующему решению таковых методом трехточечной прогонки по координатным направлениям. Уравнение неразрывности решается явно.

При изменении гидродинамических характеристик потока меняется и его транспортирующий потенциал в отдельных ячейках. В зависимости от изменения транспортирующего потенциала соответствующая масса наносов или осаждается на дно, или, наоборот, вымывается с площади, характеризуемой размером ячейки. Так, масса осажденного на дно (или размытого) твердого вещества Δ (кг) в расчетной ячейке $[i, j]$ за период времени T рассчитывается по формуле

$$\Delta = \sum_{t=1}^T \left[G_{i,j}^{t-1} + k_{i-1,j} G_{i-1,j}^{t-1} + k_{i+1,j} G_{i+1,j}^{t-1} + k_{i,j-1} G_{i,j-1}^{t-1} + k_{i,j+1} G_{i,j+1}^{t-1} - G_{i,j}^t \right]$$

где t – индекс времени; $k_{i,j}$ – весовые коэффициенты проекции скоростей, б/р.

Весовые коэффициенты для каждой из четырех соседних ячеек рассчитываются как

$$k_{i-1,j}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } u_{i-1,j}^t \leq 0 \\ \frac{|u_{i-1,j}^t|}{v_{i-1,j}^{\text{рез.}}} & \text{при } u_{i-1,j}^t > 0 \end{cases}, \quad k_{i+1,j}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } u_{i+1,j}^t \geq 0 \\ \frac{|u_{i+1,j}^t|}{v_{i+1,j}^{\text{рез.}}} & \text{при } u_{i+1,j}^t < 0 \end{cases},$$

$$k_{i,j-1}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } v_{i,j-1}^t \geq 0 \\ \frac{|v_{i,j-1}^t|}{v_{i,j-1}^{\text{рез.}}} & \text{при } v_{i,j-1}^t < 0 \end{cases}, \quad k_{i,j+1}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } v_{i,j+1}^t \leq 0 \\ \frac{|v_{i,j+1}^t|}{v_{i,j+1}^{\text{рез.}}} & \text{при } v_{i,j+1}^t > 0 \end{cases},$$

где u и v – проекции скорости потока по координатным направлениям x и y соответственно, м/с; $v_{\text{рез}}$ – равнодействующая скорости, м/с.

Слой аккумуляции или размыва, мм рассчитывается по формуле

$$\delta = \Delta \frac{K}{\rho_{\text{грунта}} S} \varphi, \quad (3.18)$$

где K – коэффициент размерности, равен 10^3 ; S – площадь расчетной ячейки, m^2 ; φ – плотность залегания грунта (для песка принимается равным 1.3), б/р [Рекомендации..., 2006].

3.6. Модель годового твердого стока

Исследования твердого стока, переносимого реками, имеет множество различных теоретических и прикладных приложений. Вопросы актуальности оценки статистических параметров мутности воды водных объектов были изложены в Главе 2 настоящей работы. В условиях большой дискретности и неэквидистентности наблюдений за расходами наносов, мутностью воды в водотоках достоверность оценки статистических параметров крайне низка. Ситуация усугубляется неоднозначной принадлежностью распределения мутности отдельных водотоков к конкретному закону распределения. При этом востребованность оценки параметров распределения определена целым комплексом причин: это и назначение фоновой концентрации наносов при нормировании сбросов сточных вод, и расчет мутности нужной обеспеченности для выбора способов очистки воды для питьевого водоснабжения, расчет мутности воды при неблагоприятных гидрометеорологических условиях и так далее.

Также в первой и второй глав данной работы рассматривались актуальные вопросы пространственного распределения мутности в акватории водоемов, переформирования дна водохранилищ речными наносами в условиях нестационарного режима.

Расчеты русловых деформаций, в основе которых лежат процессы перераспределения наносов в речном потоке, также невозможны без вычисления твердого стока. Как следствие, на расчетах твердого стока базируются прогнозные оценки занесения русловых траншей и прорезей, заиления водохранилищ речными наносами и много другое.

Особенную актуальность расчеты твердого стока различных прикладных направлений приобретают в неоднократно освещенных в научной литературе условиях хозяйственной деятельности на водосборе и климатических изменений.

Вне зависимости от грани приложения исследований пространственно-временных закономерностей распространения твердой фазы речного потока, основой любых теоретических положений и, как следствие, разрабатываемых методов, является качественный мониторинг расхода наносов в водотоке. Методология качественного мониторинга включает в себя и достойную приборную базу, продуманность частоты проведения наблюдений на водотоке, грамотную организацию сети пунктов наблюдений за твердым стоком.

На втором месте после мониторинга, важное место занимает имеющий теоретическую основу однозначный и универсальный метод расчета расхода наносов. Совместно с качественными данными наблюдений последний позволит дать начало для создания общих принципов балансовых физически обоснованных методик вычисления перераспределения твердого стока в пределах исследуемой системы.

В практике хозяйственного использования водных объектов актуальны расчеты твердого стока различных масштабов – от секундного до годового. Оценка годового твердого стока так же как и оценка статистических параметров мутности и степень ее достоверности, как уже отмечалось выше, крайне затруднительна при нерегулярности и недостаточном освещении для разных фаз водного режима. В этом случае достаточно эффективны методы восстановления значений твердого стока основанные на физически обоснованных моделях природного процесса. Основными требованиями, предъявляемыми к таким моделям являются их универсальность и достоверность.

Часто, в связи с планируемой антропогенной нагрузкой на водосбор, необходимо дать прогноз нормы твердого стока. Это особенно актуально, например, в задачах оценки скорости заиления водохранилищ. Рекомендации по расчету твердого стока [Указания..., 1974] основаны на использовании данных о мутности расчетной реки или реки-аналога. Однако при изменении условий

формирования жидкого и твердого стока на водосборе приведенные методики оценки нормы твердого стока не подходят. Часто практикуются методы удлинения коротких рядов наблюдений за расходами наносов. Для использования различных методов удлинения рядов расходов наносов важна в первую очередь формула связи расходов наносов с расходами воды. Как правило, все эти формулы имеют недостаточную точность расчета.

Таким образом, точность полученных значений расходов наносов в результате таких расчетов оставляет желать лучшего с одной стороны и остается нерешенность проблемы оценки параметров распределения расходов наносов в условиях неизученных рек с другой стороны.

Для оценки параметров распределения расходов наносов в этом случае может быть полезен композиционный метод. Композиционный метод позволяет найти параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. Таким образом, для использования композиционного метода необходимо располагать формулой общего расхода наносов, адекватно описывающей взаимосвязь расхода наносов и гидравлических характеристик потока. Причем, гидравлические характеристики потока должны относиться к стандартной гидрометрической информации, характер распределения которой хорошо изучен.

Модель годового твердого стока рек разработана в Институте озераведения 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]. Аргументами в аналитической формуле расхода наносов являются расход воды и средняя глубина потока, функцией – расход наносов. Кривые распределения суточных расходов воды обеспечены, как правило, достаточно продолжительными и надежными рядами наблюдений.

Основными этапами моделирования годового твердого стока являются:

Генерирование ряда случайных чисел, подчиненных нормальному закону распределения или трехпараметрическому гамма-распределению.

Преобразование полученного ряда в ряд суточных расходов воды операциями, обратными нормированию и, при необходимости, нормализации.

Расчет по функции «расход-уровень» $Q=f(h)$ значений средних глубин потока при соответствующих расходах воды.

Вычисление значений расходов наносов при полученных расходах воды и значениях средней глубины потока с использованием аналитической формулы расхода наносов. В зависимости от значения расхода воды принимаются соответствующие значения параметров формулы (3.8).

На основании полученного ряда расходов наносов построение кривой распределения расходов наносов и оценка ее параметров.

Для приведения суточных расходов воды к нормальному закону распределения используется одно из следующих выражений для нормализации значений суточных расходов воды

$$\varepsilon_i = (Q_i + 1)^n \ln(Q_i + 1), \quad \varepsilon_i = e^{nQ_i} \ln(Q_i + 1), \quad \varepsilon_i = (Q_i + 1)^n,$$

где Q_i и ε_i – среднесуточные значения расхода воды и его нормализованное значение, n – параметр нормализации. Либо, в случае хорошего соответствия эмпирических точек кривой трехпараметрического гамма-распределения, можно не прибегать к нормализации и генерировать ряд случайной величины трехпараметрического гамма-распределения.

Структура имитационного моделирования расхода наносов имеет вид (Рисунок 2.13). Исходными данными для расчета являются:

Исходными данными для моделирования стока наносов являются:

1. Параметры распределения нормализованных значений суточных расходов воды (среднее значение, коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s).
2. Вид и параметры функции $Q=f(h)$.
3. Величина среднего уклона русла.

4. Крупность донных отложений, определяющая задание параметров формулы (3.8).

5. Параметры аналитической формулы расхода наносов (3.8) для разных фаз водности – половодья, межени и периода средней водности.

Для оценки расхождения между наблюдаемыми и рассчитанными величинами годового твердого стока наблюдаемую величину годового стока взвешенных наносов можно привести к общему стоку наносов посредством известных соотношений между годовыми значениями взвешенных и влекомых наносов [Чалов, 2000; Лопатин, 1952].

Результатом расчета по модели годового твердого стока рек является параметры распределения общего расхода наносов – среднегодовое значение $G_{\text{ср}}$ и среднее квадратичное отклонение σ_G , медиана, квартильный размах и так далее. По полученным параметрам можно вычислить расход наносов или мутности заданной обеспеченности $p\%$: $G_{p\%} = G_{\text{ср}} + K_{p\%} \cdot \sigma_G$ (где $K_{p\%}$ – квантиль заданной обеспеченности), а из среднегодового общего расхода наносов – значение годового твердого стока исследуемого водотока.

Разработанный метод позволяет оценить статистические параметры мутности воды, а также годовые значения твердого стока при отсутствии данными 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).

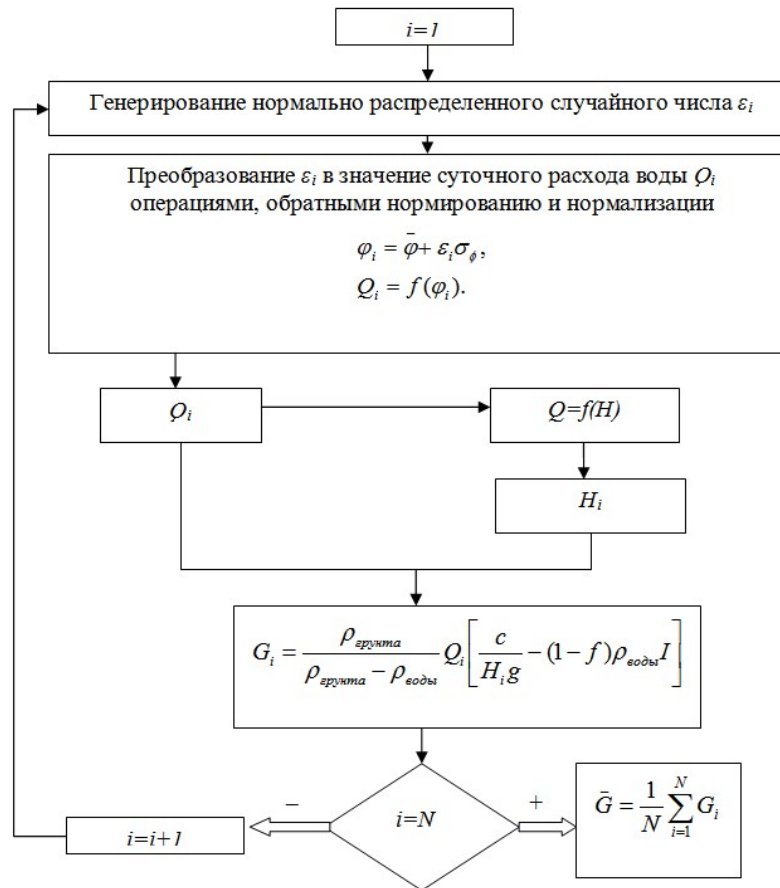


Рисунок 3.13 – Структура имитационного моделирования расхода наносов (где $\bar{\phi}$ и \bar{G} – среднегодовые значения нормализованных суточных расходов воды и наносов, кг/с; σ_{ϕ} – среднее квадратичное отклонение нормализованных суточных расходов воды; N – длина генерируемого ряда; i – индекс)

3.7. ДС моделирующая система «Погода – Сток – Наносы»

3.7.1. ДС моделирование в гидрологии

Одним из важнейших сегментов вычислительной гидрологии является оценка параметров распределения переменных состояния гидрологической системы. Статистические параметры расхода воды, мутности, уровня и прочих гидрологических величин востребованы в строительном проектировании, организации гидротехнических мероприятий в пределах водного объекта или на территории его водосбора, оценках различных гидрологических и экологических

рисков и так далее. Определенную сложность при этом представляет недостаточность наблюдений за гидрологическим режимом водных объектов. Грандиозное количество неохваченных гидрометрическими наблюдениями водотоков и водоемов приводит к необходимости искать гидравлико-морфометрические аналоги, расположенные в одной физико-географической зоне с исследуемым объектом, обращаться в обобщенным по большим территориям картам с удельными характеристиками гидрологических величин или работать с опосредованными зависимостями обобщенных величин и общих характеристик водного объекта (например, расчет расхода воды в нижнем створе через модуль стока, то есть через отношение площадей водосбора).

При этом, наследие наблюдательной базы Советского Союза с учетом изменений условий формирования стока на водосборе, климатических факторов, освоения русел рек и их водосборов или наоборот, ослабления хозяйственной деятельности с каждым десятилетием становится все более неактуальным для оценки текущего гидрологического режима водного объекта и выбора рек-аналогов.

Вместе с тем наиболее удручающая ситуация складывается с расчетами параметров распределения мутности воды. Дискретные и неэквидистентные данные наблюдений за мутностью водных объектов не позволяют получить репрезентативные ряды наблюдений для их последующей обработки.

Данные осреднений в больших временных масштабах (месяц, год) по таким рядам показывают очевидно недостоверный результат в силу значительной асимметрии распределения суточной мутности и часто неоднозначной связи последней с гидравлическими переменными состояниями потока. Об объективной оценке статистических параметров распределения суточной мутности в таких условиях недостаточности наблюдений не может идти речь.

Существенно расширить возможности моделирования процессов массопереноса в системе «водосбор – водный объект» удастся за счет привлечения детерминировано-стохастического (ДС) подхода [Виноградов, 1988; Гельфан, 2007; Шмакова, Кондратьев, 2014; Ailliot et al., 2015]. ДС моделирование

осуществляется с применением как детерминированных, так и стохастических компонентов в рамках единой модели. При решении задач, связанных с оценкой и прогнозом массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем ДС подход позволяет выполнять требуемые расчеты при недостаточности или отсутствии данных натурных наблюдений. Стохастической компонентой ДС модели может являться стохастический генератор рядов метеорологических величин, обеспечивающий последующие детерминированные блоки модели входной информацией. Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем ряды наблюдений за гидрологическими и гидрохимическими характеристиками водосборов и водоемов.

Математическое моделирование природных процессов может быть представлено двумя основными направлениями – детерминированным и стохастическим. Детерминированные модели основаны на физически обоснованном описании основных изучаемых процессов и определяют однозначную связь между входом и выходом модели. Стохастические (вероятностные) модели учитывают вероятностную структуру изучаемых процессов и представляют собой математические модели, в которых входные величины и некоторые параметры представлены параметрами распределения плотности вероятности. Каждому из этих направлений моделирования присущи собственные задачи и цели. Расширение научных возможностей математического моделирования, а также области его практического применения, может быть достигнуто при объединении перечисленных основных направлений в рамках детерминировано – стохастических (ДС) моделей.

ДС модели представляют собой различные приложения теории вероятности к детерминированным моделям, что расширяет спектр решаемых задач. Основой детерминировано-стохастического моделирования в гидрологии и смежных науках является расчет параметров кривых распределения функции через кривые распределения аргументов используя детерминированное описание природного

процесса. Выбор того или иного подхода в ДС моделировании обусловлено задачами, которые стоят перед исследователем.

В гидрологии стохастическое моделирование начиналось с регрессионного анализа, наиболее полный вариант использования которого представлен в классической работе Г.А. Алексеева [1960]. Так, задача прогноза суточных расходов воды нередко решается посредством нахождения внутрирядных связей во временных рядах расходов воды или межрядных связей, оцениваемых через регрессионные зависимости. При оценке внутрирядных связей суточных расходов воды нельзя не принимать во внимание сезонный ход гидрографа. Поэтому часто рассматривают отдельные участки временного ряда, оценивая его внутреннюю структуру, а затем komponуют выделенные временные отрезки соответствующим образом [Болгов, 1996]. Подобные подходы позволяют на статистической основе делать прогноз суточных, пентадных, декадных, расходов воды, водности года, не принимая во внимание внешние воздействия, порождающие различные отклонения от среднего сезонного хода гидрографа. Но с другой стороны, методы, основанные на регрессионных зависимостях, позволяют дать оценку последующего состояния системы, основываясь на ее настоящем. Это особенно ценно, когда речь идет о глобальных оценках, таких, например, как водность года [Шелутко, 1984], где важен общий прогноз состояния.

Основой практически всего ДС – моделирования в гидрологии является определение параметров кривых распределения функции используя кривые распределения аргументов. Существуют прямой и косвенные пути решения такой задачи. К прямому относится один из методов теории вероятности – метод композиции. Классически под методом композиции понимается нахождение функции распределения суммы двух независимых случайных величин через функции распределения этих случайных величин [Крамер, 1975].

По причине громоздкости использования прямого метода композиции в гидрологии решают задачу композиции косвенными способами. К наиболее используемому можно отнести получение эмпирической кривой распределения функции через увеличение рядов аргументов, являющихся входом в расчетное

выражение для рассматриваемой функции. Увеличение рядов аргументов может проводиться следующим образом. Через известные параметры распределения методом Монте-Карло моделируются ряды аргументов какой угодно длины. Смоделированные ряды аргументов являются входом в детерминированную систему, в результате расчетов по которой на выходе имеют место ряды функции, параметры распределения которой и есть искомый результат. Такой режим работы детерминированной модели называется имитационным. Одним из способов решения этой задачи является схема:

- 1) оценка статистических параметров входа в детерминированную модель;
- 2) моделирование рядов методом Монте Карло в соответствии с полученными параметрами;
- 3) расчет по детерминированной модели;
- 4) оценка параметров распределения рассчитанных по детерминированной модели величин.

Первым трудом, посвященным композиционному методу в гидрологии, является статья М.А. Великанова [1949]. В работе рассматривается функция $Q=f(H,T)$, где Q – максимальный расход половодья, H – снегозапас, T – продолжительность снеготаяния. Предполагая три варианта связи между величинами Q , H и T , предлагается три пути решения композиционной задачи. Первый случай (иллюстративного характера, с некоторыми допущениями) представляет теорему умножения вероятности. Далее, полагая, что максимальный расход Q_i может быть порожден не единственным сочетанием (H, T) , берется интеграл произведения функции плотности вероятности этих величин. И, наконец, в случае наличия связи между H и T задача решается посредством интегрирования условной функции плотности вероятности появления сочетаний аргументов.

В другой работе, основанной на методе композиции [Алексеев, 1950], представлен “графический способ определения обеспеченности функции от двух статистически связанных признаков”. На III Всесоюзном гидрологическом съезде было отмечено, что представленный метод являет собой «форму наибольшего

органического синтеза генетического и статистического методов» [Алексеев, Чеботарев, 1959].

Г.А. Алексеевым [1957; 1962] представлены два похожих варианта приближенного решения задачи определения вероятности функции нескольких переменных. Оба описанных приближенных метода приводят к крупным систематическим погрешностям.

В монографии Л. С. Кучмента и А. Н. Гельфана [Кучмент, Гельфан, 1993] представлен широкий обзор различных вариантов решения задачи композиции в имитационном режиме отечественных и зарубежных работ. Авторы предлагают “опыт построения динамико-стохастической модели дождевых паводков”, “разработку и апробацию динамико-стохастической модели формирования весеннего половодья”, “использование динамико-стохастических моделей формирования стока для гидрологических расчетов и прогнозов”. Эти задачи решаются посредством использования статистического моделирования входных величин по методу Монте-Карло.

В работе Ю. Б. Виноградова [1962] рассматривается интеграл по n -мерному пространству аргументов плотности вероятности одновременного появления событий и предлагается численная схема его решения. Алгоритм вычисления сводится к последовательному расчету ординат кривой обеспеченности функции через плотности вероятности аргументов. Ряд аргументов представляет собой совокупности случайных величин, заключенные в интервалы возможных значений, принимаемых аргументами. Метод позволяет находить ординаты функции распределения для функции нескольких аргументов, имеющих любой многомерный закон распределения. В случае независимых аргументов совместная плотность вероятности представляет собой произведение плотностей вероятности соответствующих аргументов.

В последующей работе [Виноградов, 1988] представлен второй вариант численной композиции, который предполагает “производство случайной выборки величин x_1, x_2, \dots, x_n из совокупности, описываемой законом их совместного распределения $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и дальнейшему вычислению значений $Q=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ”

с помощью соответствующей детерминированной модели”. Здесь представлена схема стохастической модели погоды, выходом из которой являются метеорологические ряды, служащие входом в динамическую систему, описывающую процессы формирования стока. Дальнейшее развитие и практическую реализацию стохастическая модель погоды нашла в работе [Шмакова, 2000; Шмакова, Кондратьев, 2014; Кондратьев, Шмакова, 2017 а; Кондратьев, Шмакова, 2018 б].

Следует иметь в виду то, что имитационный режим моделирования является функцией двух задач

“1) задачи физической гидрологии, в частности связанные с выявлением и раскрытием функции $Q=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$;

2) задачи стохастической гидрологии, в частности связанные с вычислением плотности вероятности сочетаний различных факторов $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ” [Виноградов, 1988].

Таким образом, имитационное моделирование дает возможность решать следующие вопросы:

1) Определение или уточнение параметров распределения рассматриваемой функции.

2) Прогноз изменения или оценка чувствительности параметров распределения функции в случае изменения параметров распределения аргументов.

3) Определение сочетаний аргументов и вероятность их появления, способных породить чем-либо замечательные значения функции.

4) Выявление факторов, влияние которых в значительной степени определяют функционирование водной системы.

Основным критерием стохастического моделирования в имитационном режиме является соответствие эмпирической кривой распределения и кривой распределения, полученной в результате моделирования.

Прежде всего использование того или иного подхода в стохастическом моделировании определяется задачами, которые стоят перед исследователем. При

моделировании стока одной из основных проблем, ограничивающих возможности калибровки и верификации моделей и снижающих достоверность расчетов, является недостаток данных натурных наблюдений. В тоже время для решения широкого круга прикладных задач, связанных с оценкой возможных изменений стока в результате климатических изменений и антропогенной нагрузки, требуется оценка не только средних значений искомых величин, но и параметров функций их распределения, позволяющих рассчитывать соответствующие обеспеченности превышения. Средством решения такого рода задач могут служить ДС моделирующие системы, включающие блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов в качестве входа в последующие детерминированные блоки системы.

Пространственно-временная динамика, корреляционные структуры, относительная климатическая устойчивость и естественная метеорологическая изменчивость привели к большому разнообразию так называемых стохастических генераторов погоды [Nick, Harp, 1980; Jones et al., 1972; Bailey, 1964; Larsen, Pense, 1982; Racsko et al., 1991 и др.].

Согласно определению, приведенному в работе [Wilks, Wilby, 1999], «стохастические генераторы погоды являются статистическими моделями, которые направлены на быстрое моделирование реалистичных случайных последовательностей атмосферных переменных, таких как температура, осадки и ветер». В работе [Ailliot et al., 2015] выделяется четыре основных типа моделей-генераторов погоды:

– модели, основанные на методах пересчета [Rajagopalan, Lall, 1999; Oriani et al., 2014; Yiou, 2014];

– модели, основанные на методологии бокса Дженкинса (позволяют моделировать интегрированные или разностно-стационарные временные ряды [Box, Jenkins, 1976]);

– модели точечных процессов (каждое событие определяется моментом времени появления [Onof et al., 2000]);

– иерархические модели (модели погодного типа, которые включают в себя дискретные переменные и многомерные статистические распределения, моделирующие климатические переменные условно для дискретных концептуальных переменных, описывающих погодные условия, состояния, типы или режимы [Ailliot et al., 2015]).

Изначально, генераторы погоды разрабатывались с двумя основными целями – как инструмент для моделирования искусственных метеорологических рядов с заданными статистическими характеристиками, имитирующие наблюдаемые ряды и для обеспечения моделирования погоды данных для территорий, неосвоенных данными метеорологических и гидрологических наблюдений [Qian et al., 2008]. Основной ценностью таких генераторов являлась возможность моделирования редких гидрологических явлений (экстремумов), имеющих небольшую вероятность появления. В дальнейшем, генераторы погоды стали одним из средств исследования воздействия изменения климата.

3.7.2. ДС моделирующая система «Погода – Сток – Наносы»

За последние годы в Институте озераведения РАН разработана ДС моделирующая система *IL_DSM* (*Institute of Limnology Deterministic and Stochastic Modeling system*), направленная на количественную оценку процессов, происходящих в системе водосбор-водный объект, а также на прогнозирование последствий воздействия на систему антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений [Шмакова, Липовицкая, 2014; Кондратьев и др., 2013; Кондратьев, Шмакова, 2015]. Блок-схема моделирующей системы представлена на Рисунке 3.14. 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.



Рисунок 3.14 – Схема детерминированно-стохастической моделирующей системы *IL_DSM* для количественной оценки и прогнозирования массопереноса в системе «водосбор – водный объект»

В целях формализации процедуры построения комплексной модели водосбора или системы водосбор-водоем могут быть сформулированы следующие общие требования к выбору отдельных моделей, входящих в состав системы (Рисунок 2.14), и их компоновке в рамках результирующей модели, соответствующей решаемой задаче [Кондратьев, 2007].

Реалистичное отображение физико-географических, почвенно-геологических, агрохимических и ландшафтных условий водосбора. Это требование создает основу для выбора частных моделей, соответствующих конкретной ситуации и существующим представлениям о физике процессов на водосборе.

Соответствие структуры модели составу и точности исходных данных. Определяет состав и дискретность входной информации, а также способ пространственной схематизации структуры водосбора.

Соответствие структуры модели конечным требованиям поставленной задачи. Задаёт уровень детализации модели, состав и дискретность информации, получаемой на выходе модели или отдельных ее частей.

Идейная и информационная равнозначность стыкуемых блоков общей модели. Позволяет избежать излишних детализаций или упрощения частных моделей в рамках установленных выше требований и обеспечивает возможность их объединения в единую модель водосбора.

Доступность потребителю. Определяет требования к программному обеспечению модели, диалоговой системе и системе управления базами данных.

Перечисленные требования позволяют специалисту проводить выбор и рационально компоновать работоспособные модели, соответствующие поставленным требованиям и реалистично описывающие происходящие природные процессы [Кондратьев, 2007].

В рамках практического использования разработанной ДС моделирующей системы решаются следующие основные задачи:

1. Оценка параметров функции распределения рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков, факт выпадения осадков, относительная влажность воздуха) по данным метеорологических наблюдений.

2. Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой длины с параметрами, соответствующими современным климатическим условиям.

3. Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой длины с параметрами, соответствующими заданным сценариям изменения климата.

4. Моделирование стока с водосбора с использованием сгенерированных рядов метеорологических элементов в качестве входной информации.

5. Оценка параметров распределения стока, как в современных условиях, так и в случае реализации заданных сценариев климатических изменений.

6. Оценка годового твердого стока (стока речных наносов), как в современных условиях, так и в случае реализации заданных сценариев климатических изменений.

7. Расчеты распространения примесей в речном русле для стока и выноса веществ с водосбора различной обеспеченности, как в современных условиях, так и в случае реализации заданных сценариев климатических изменений.

8. Расчеты транспорта наносов, распространения растворенных примесей в водоеме, а также переформирования дна притока воды и поступления наносов различной обеспеченности, как в современных условиях, так и в случае реализации заданных сценариев климатических изменений.

Итогом ДС моделирования является набор кривых распределения и параметров распределения стока, твердого стока, а также схемы распространения твердых частиц и растворенных примесей в руслах притоков в акватории водоема, как в современных условиях, так и в случае реализации заданных сценариев климатических изменений. Естественно, что в зависимости от условий задачи для ее решения могут быть задействованы не все компоненты моделирующей системы.

Приведем дополнительно краткое описание стохастической модели погоды и гидрологической модели формирования стока на водосборе, а также некоторые вопросы стыковки моделей в рамках представленной ДС моделирующей системы.

Стохастическая модель погоды

Стохастическая модель погоды СМП (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015) разработана под руководством Ю.Б. Виноградова [1988] и практически реализована М.В. Шмаковой [2000]. Модель служит основой для ДС моделирования характеристик стока, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей, входящих в моделирующую систему.

Модель погоды состоит из двух основных блоков выполняющих (1) оценку параметров распределения суточных, месячных и годовых рядов

метеорологических элементов по данным натуральных наблюдений на выбранных метеостанциях, (2) генерирование рядов метеорологических элементов требуемой продолжительности.

В первом блоке СМП оцениваются следующие параметры:

Параметры одно- или двухгармонической синусоиды среднемноголетних суточных рядов:

температура воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловная);

среднее квадратичное отклонение суточной температуры воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловное);

дефицит влажности воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловный);

среднее квадратичное отклонение суточного дефицита влажности воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловное);

вероятность выпадения осадков (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловная);

средняя относительная величина выпавших осадков.

Параметры усеченной нормализованной функции распределения суточные сумм осадков (в дни с осадками накануне, в дни без осадков накануне, безусловные).

Пространственно-временные корреляционные связи для рядов суточных и среднегодовых метеорологических величин.

Во втором блоке проводится имитационное моделирование суточных рядов температуры воздуха, слоев осадков и относительно влажности воздуха. В основе имитационного моделирования погоды лежит метод Монте-Карло. Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой продолжительной длины осуществляется для назначенных на водосборе расчетных точек или для метеорологических станций. В случае несовпадения расчетных точек с метеостанциями, параметры СМП интерполируются по данным соседних метеостанций в расчетные точки. При моделировании используются гипотезы о функционально-нормальном законе распределения метеорологических величин,

что позволяет использовать хорошо разработанный для нормального закона распределения корреляционный аппарат, а также о стационарности случайных процессов, однородности и изотропности случайных полей. Структура СМП приведена на Рисунке 3.15 [Шмакова М.В., 2000].



Рисунок 3.15 – Схема стохастической модели погоды

Гидрологическая модель формирования стока с водосбора

Гидрологическая модель формирования стока с водосбора *IL_HM* – *Institute of Limnology Hydrological Model* (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015 г.) разработана д. ф.-м.н. С.А. Кондратьевым в Институте озероведения РАН [Кондратьев, Шмакова, 2005; Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2013] и предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и

снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, могут задаваться в зависимости от озерности, т.е. доли площади водоемов в общей площади водосбора. Схема модели представлена на Рисунке 3.16.

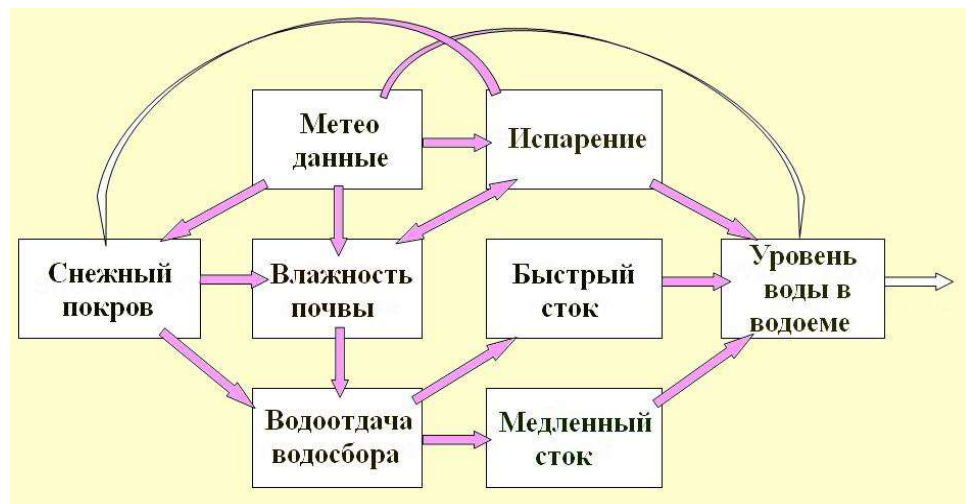


Рисунок 3.16. Схема модели *IL_HM*

Стыковка моделей в рамках моделирующей системы

При построении моделирующей системы, содержащей частные модели, работающие в различных масштабах по пространству и времени, возникает необходимость решения вопросов их стыковки в рамках модельной системы. Как правило, это вызвано различным уровнем обобщения информации на входе и выходе стыкующихся моделей или опосредованными по отношению к итоговой задаче переменными состояниями входа и/или выхода. В этих случаях привлекаются

дополнительные функциональные зависимости или стыковочные модели-посредники.

Представленная в настоящей работе ДС моделирующая система состоит из нескольких моделей, имеющих различный уровень обобщения на входе и выходе. На Рисунке 3.17 представлена общая схема стыковочных узлов между отдельными моделями.

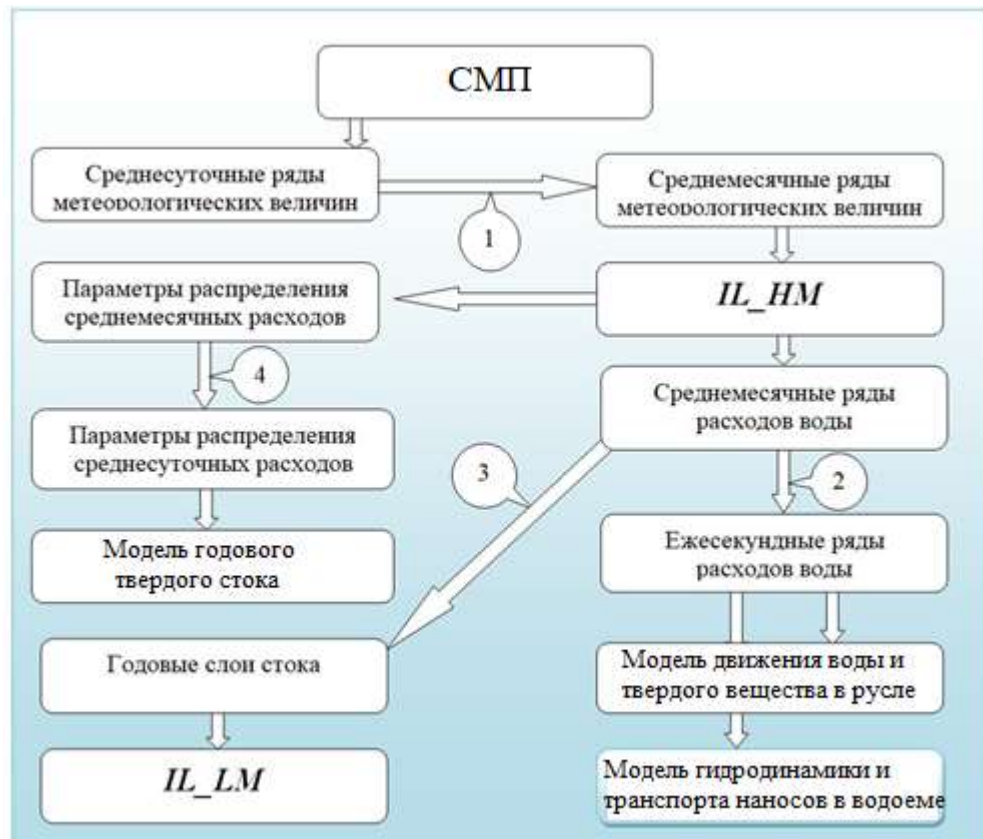


Рисунок 3.17 – Схема стыковочных узлов между отдельными моделями в рамках ДС моделирующей системы

Выходом стохастической модели погоды являются суточные ряды метеорологических элементов (температуры, относительной влажности воздуха и осадков). Вход в модель формирования стока (IL_HM) – среднемесячные ряды температуры воздуха и месячные суммы осадков. Для обеспечения входа в модель IL_HM (стыковочный узел 1) необходим пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные, что не представляет сложности.

Выход модели IL_HM – среднемесячные расходы воды и, как следствие, параметры распределения среднемесячных расходов воды – $Q_{\text{ср мес}}$, $C_{\text{вмес}}$, $C_{\text{смес}}$ (где C_v и C_s коэффициенты вариации и асимметрии соответственно). Рассчитанные среднемесячные расходы воды должны обеспечить входной информацией три модели разных временных масштабов – модель IL_LM , модель годового твердого стока и модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме.

Вход в гидродинамические модели водоема и водотока (стыковочный узел 2) – расходы воды притоков с шагом в несколько секунд – обеспечивается линейной интерполяцией между расходами воды бóльшего уровня обобщения.

Вход в модель IL_LM (стыковочный узел 3) – годовые слои стока – обеспечивается осреднением среднемесячных значений расходов воды и последующим пересчетом значений среднегодовых расходов воды в годовые слои стока.

Несколько сложнее выполняется стыковка моделей IL_HM и годового твердого стока. Входом в модель годового твердого стока (стыковочный узел 4) являются параметры распределения среднесуточных расходов воды – $Q_{\text{ср сут}}$, $C_{\text{всут}}$, $C_{\text{ссут}}$. Решение задачи в этом случае разбивается на два этапа:

- выбор закона распределения и оценка соответствия аналитическим кривым эмпирических кривых расходов воды разного уровня обобщения (среднесуточных и среднемесячных);

- оценка связи параметров распределения рядов среднесуточных и среднемесячных расходов воды, что позволит расчетным образом оценить искомые параметры распределения среднесуточных расходов воды.

Соответствие распределения расходов воды разного уровня обобщения (среднесуточных, среднемесячных, среднегодовых) тому или иному закону распределения определяется в первую очередь размером водосборной площади водотока и условиями формирования стока. В свою очередь, условия формирования стока являются функцией климатических и физико-географических характеристик. Эмпирические кривые распределения среднесуточных и среднемесячных расходов воды хорошо аппроксимируют кривые

трехпараметрического гамма-распределения, а также функциональные лог-нормальные кривые [Методические рекомендации..., 2005].

В качестве примера, на Рисунках 3.18 и 3.19 приведены эмпирические и аналитические (трехпараметрическое гамма-распределение) кривые распределения среднесуточных и среднемесячных расходов воды для четырех водотоков Ленинградской и Новгородской областей в клетчатке нормального закона распределения. В Таблице 3.11 приведены параметры распределения среднемесячных и среднесуточных расходов воды. Хорошее соответствие эмпирических кривых распределения аналитическим кривым (попадание в 90% доверительный интервал согласно критерию Пирсона) дают основание полагаться на достоверность рассчитанных параметров распределения и использовать трехпараметрическое гамма-распределение для имитационного моделирования среднесуточных расходов воды по модели годового твердого стока.

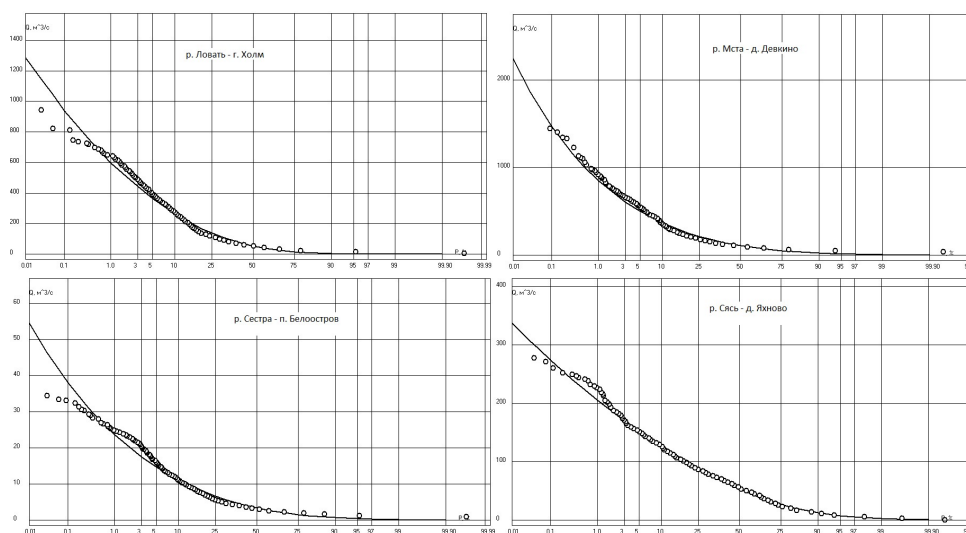


Рисунок 3.18 – Аналитическая (—) (трехпараметрическое гамма-распределение) эмпирическая (o) кривые распределения среднесуточных расходов воды

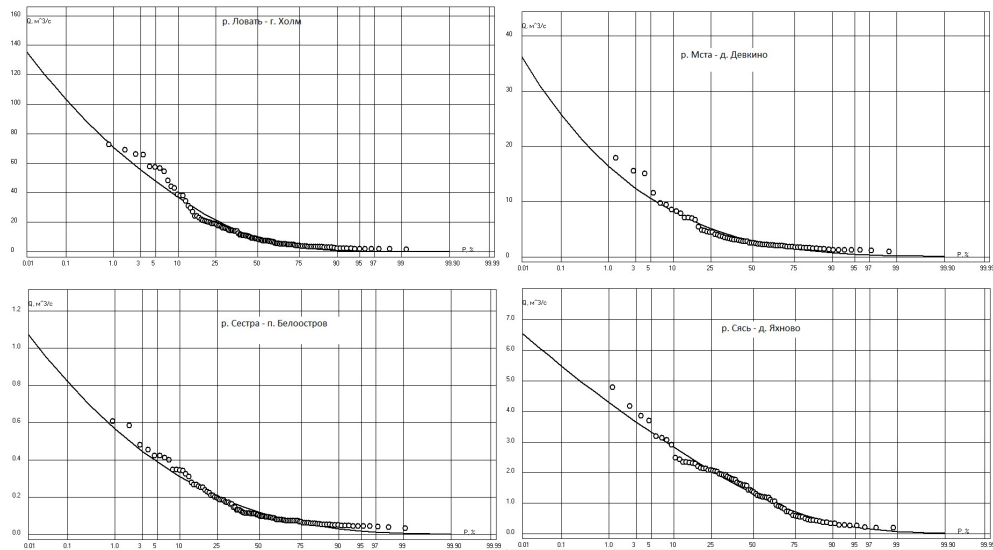


Рисунок 3.19 – Аналитическая (—) (трехпараметрическое гамма-распределение) эмпирическая (o) кривые распределения среднемесячных расходов воды

Таблица 3.11– Параметры распределения среднесуточных и среднемесячных расходов воды

| Водосбор | $F_{\text{вдсб}}, \text{ км}^2$ | $Q_{\text{ср сут}}$ | $Q_{\text{ср мес}}$ | $C_{\text{всут}}$ | $C_{\text{вмес}}$ | $C_{\text{ссут}}$ | $C_{\text{с мес}}$ |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| р.Ловать – г.Холм | 14700 | 101.8 | 101.85 | 1.28 | 1.1 | 2.51 | 1.95 |
| р. Мста – д. Девкино | 22500 | 165.14 | 165.20 | 1.07 | 0.9 | 3.04 | 2.27 |
| р.Сясь – д. Яхново | 6230 | 63.0 | 63.09 | 0.74 | 0.65 | 1.18 | 0.69 |
| р. Сестра – п. Белоостров | 390 | 4.98 | 4.99 | 1.01 | 0.8 | 2.44 | 1.61 |

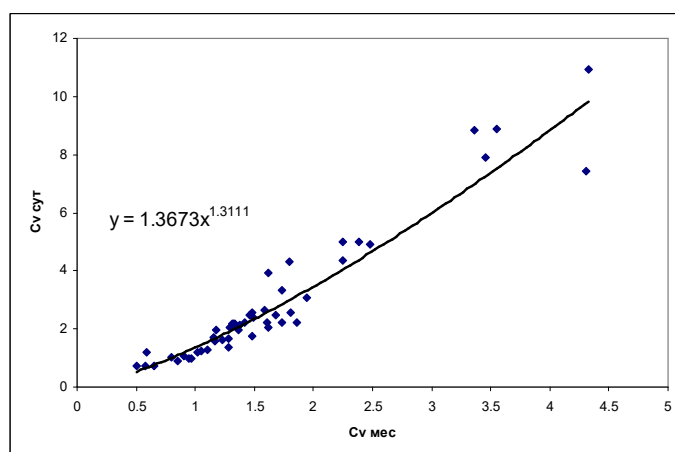
Для оценки связи параметров распределения рядов среднесуточных и среднемесячных расходов воды были использованы данные наблюдений за расходами воды пятидесяти водотоков, расположенных в различных физико-географических зонах РФ и имеющих различные площади водосборов от 0.26 до 2430000 км². В Таблице 3.12 приведены диапазоны площадей расчетных водотоков и количество водотоков, попадающих в эти диапазоны. Данные гидрометрических наблюдений и характеристики водотоков взяты из Гидрологических Ежегодников и справочников ОГХ.

Таблица 3.12 – Диапазоны площадей расчетных водотоков

| Диапазон площадей водосборов, км ² | Кол-во водотоков |
|---|------------------|
| <1 | 4 |
| 1-10 | 19 |
| 10-100 | 6 |
| 100-1000 | 7 |
| 1000-100000 | 11 |
| >100000 | 5 |

Для каждого гидрометрического створа была проведена оценка параметров распределения – среднего значения, коэффициентов вариации и асимметрии. На Рисунок 3.20 приведена зависимость $C_{vсут} = f(C_{vмес})$ между коэффициентами вариации среднесуточных расходов воды и коэффициентами вариации среднемесячных расходов воды. Связь коэффициентов вариации среднесуточных и среднемесячных расходов воды можно аппроксимировать выражением

$$C_{vсут} = 1.3673 \cdot C_{vмес}^{1.3111} \quad (3.19)$$

Рисунок 3.20 – Зависимость $C_{vсут} = f(C_{vмес})$

Связь коэффициентов вариации и асимметрии среднесуточных расходов воды аппроксимируется функцией (Рисунок 3.21)

$$C_{s\text{сут}} = -5.534 \cdot \ln(C_{v\text{сут}}) - 1.7029. \quad (3.20)$$

Значения величины достоверности аппроксимации полей точек на Рисунках 2.20 и 2.21 составили 0.92 и 0.84 соответственно. Достаточно высокие значения этой величины характеризуют соответствие между функциональной аппроксимацией и полем точек как хорошее.

Полученные зависимости параметров распределения и примерное равенство среднесуточных и среднемесячных расходов воды $Q_{\text{ср мес}} \approx Q_{\text{ср сут}}$ дают основание для пересчета параметров среднемесячных расходов воды в параметры распределения среднесуточных расходов.

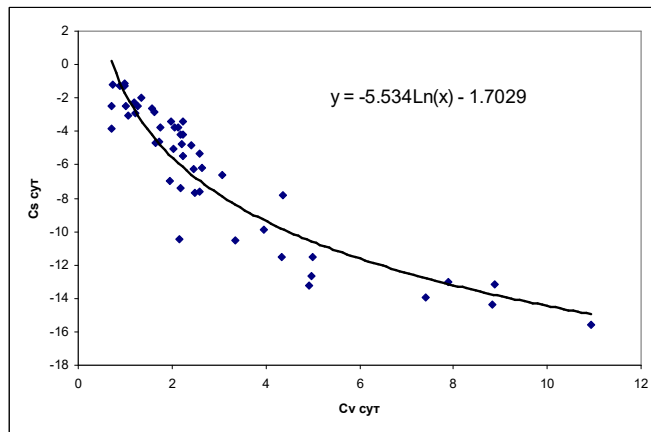


Рисунок 3.21 – Зависимость $C_{s\text{сут}} = f(C_{v\text{сут}})$

Хорошее соответствие аналитических и эмпирических кривых распределения среднесуточных и среднемесячных расходов подтверждает достоверность оценки параметров распределения. Таким образом, параметры распределения среднемесячных расходов воды, рассчитанных с использованием модели *IL_HM*, и функциональные зависимости (3.19) и (3.20) могут обеспечить вход в модель годового твердого стока.

Таким образом, для решения вопросов стыковки моделей в рамках предлагаемой ДС моделирующей системы в большинстве случаев оказывается достаточным осреднение переменных состояния выхода модели по временному

интервалу, либо линейной интерполяции внутри интервала. Исключение составляет стыковка моделей *IL_HM* и модели годового твердого стока, основной сложностью которой представляется переход от параметров распределения среднемесячных расходов воды к параметрам распределения среднесуточных расходов воды. В данном случае задача решается посредством привлечения зависимостей между этими параметрами распределения. Последние построены для водотоков, расположенных в различных физико-географических зонах РФ и имеющих большой диапазон площадей водосборов.

Выводы по главе

Расчеты твердого стока водных объектов в различных геоэкологических приложениях часто осложняются нерегулярными и некачественными данными наблюдений. При существующем множестве формул расхода наносов, расчеты по ним часто показывают неудовлетворительное качество, особенно в условиях неравномерного неустановившегося режима речного потока, усугубленными дополнительными факторами поступления твердого вещества в поток и вносимыми в результате хозяйственной деятельности морфометрическими особенностями в речное русло (гидротехнические мероприятия и сооружения). При этом актуальность достоверных расчетов твердого стока (как расхода наносов, так и мутности и транспортирующей способности потока) является несомненной, обусловленной многими сферами водохозяйственной деятельности и экологическими показателями водного объекта. Вполне очевидно, что расчеты твердого стока должны иметь теоретическую основу, однозначно сопряженную с процессами двухфазного массопереноса в речном потоке, а также основываться на стандартных данных гидрометрических наблюдений. Представленные в данной главе методы расчетов твердого стока, детерминированные и стохастические модели и ДС моделирующая система позволяют дать достаточно достоверную оценку процессам двухфазного массопереноса в пределах водного объекта. Все эти методы и модели (кроме СМП) разработаны в ИНОЗ РАН и имеют свидетельства

о государственной регистрации (Приложение А). Стохастическая модель погоды разработана в ГГИ под руководством Ю. Б. Виноградова и также имеет свидетельство о государственной регистрации.

Математическая модель движения воды и твердого вещества – свидетельство о государственной регистрации 2016612803 от 10.03.2016. Модель позволяет оценить гидравлические переменные состояния потока, расход наносов, а также интенсивность распространения примеси в речном потоке. Модель является сопряженной, то есть в ней предполагается взаимосвязанный расчет гидравлических переменных состояния потока и твердого вещества. Параметры трения в модели представлены физически обоснованными параметрами – коэффициентом внутреннего трения и сопротивлением частиц грунта сдвигу.

Аналитическая формула расхода наносов и основанная на ней формула транспортирующей способности потока позволяют со достаточной точностью (в сравнении с формулами того же типа) оценить расход наносов (или мутность воды) и максимальную взвесенесущую нагрузку потока (максимальный расход наносов или максимальную мутность при заданном расходе воды). Формулы обеспечиваются данными стандартных гидрометрических наблюдений, имеют простую структуру и физически обоснованные параметры. Интеграция этих формул в гидродинамические модели водоемов предоставляет возможность получать поля распространения мутности воды и расхода наносов в том числе и при допущении о максимальной нагрузке водного потока взвешенными веществами, например, при дноуглубительных работах.

Двумерная модель гидродинамики и транспорта наносов в мелководном водоеме – свидетельство о государственной регистрации №2018615451 от 08.05.2018. Модель основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов. В качестве алгоритма переформирования дна используются отношения для вычисления изменения транспортирующего потенциала потока. Модель позволяет рассчитывать пространственно-временные закономерности распространения расхода наносов, мутности воды в акватории, динамику переформирования дна,

вызванную нестационарным режимом водного объекта, а также прогнозировать режим мутности при неблагоприятных гидрометеорологических явлениях.

Модель годового твердого стока – свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014. Модель основана на аналитической формуле расхода наносов и композиционном методе теории вероятности и позволяет оценить параметры распределения стока наносов и мутности в разных временных масштабах. Дополнительные возможности модели состоят в возможности оценки статистических параметров твердого стока при изменении гидравлических переменных состояния водотока – глубины, расхода воды и уклона, произошедших в результате естественных причин или хозяйственной деятельности в русле реки или на ее водосборе.

Стохастическая модель погоды (разработана в ГГИ под руководством д. т. н. Ю.Б. Виноградова и практически реализована автором в работе [Шмакова, 2000]) – Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015.

Гидрологическая модель формирования стока на водосборе (разработана в ИНОЗ РАН, автор модели д. ф.-м. н. С.А. Кондратьев) – Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015 г.

Представленная ДС моделирующая система может служить основой для уточнения параметров распределения значений жидкого и твердого стока при недостаточности данных наблюдений, для оценки параметров распределения при изменении условий формирования стока на водосборе, а также при реализации различных численных экспериментов. Последнее представляет определенную ценность при выявлении отклика системы на изменение характеристик ее отдельных частей.

В обобщающей данный раздел Таблице 3.13 приведен список прикладных геоэкологических задач, связанных с оценкой твердого стока рек, соответствующие этим задачам характеристики твердого стока и методы, которые могут быть использованы при решении этих задач.

Таблица 3.13 – Соответствие геоэкологических задач и разработанных методов и моделей

| Геоэкологическая задача, связанная с оценкой твердого стока | Количественная оценка твердого стока | Метод или модель |
|--|---|--|
| заиление водохранилищ | расчеты интенсивности переформирования дна водных объектов | Стохастическая модель годового твердого стока Модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме |
| нормирование сбросов сточных вод при оценке фоновой мутности водоприемника | статистические параметры распределения концентрации взвешенных веществ речного потока при недостаточности и отсутствии данных наблюдений | Стохастическая модель годового твердого стока |
| проектирование водозаборов (здесь актуальны вопросы как размещения оголовков в пределах водного объекта, так и определение технических характеристик очистных фильтров водозабора) | распространение загрязняющих примесей в речном потоке | Модель двухфазного речного потока |
| оценка 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) | вычисление пространственно-временных закономерностей распространения мутности в водоемах; статистические параметры распределения концентрации взвешенных веществ речного потока при недостаточности и отсутствии данных наблюдений | Стохастическая модель годового твердого стока Модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме |
| планирование или ведение рекреационной или рыбохозяйственной деятельности на водном объекте | вычисление пространственно-временных закономерностей распространения мутности в водоемах; статистические параметры распределения концентрации взвешенных веществ речного потока при недостаточности и отсутствии данных наблюдений | Стохастическая модель годового твердого стока Модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме |

Продолжение Таблицы 3.13

| Геоэкологическая задача, связанная с оценкой твердого стока | Количественная оценка твердого стока | Метод или модель |
|--|---|---|
| оценка вероятности наступления (опасного) неблагоприятного геоэкологического явления, связанного с повышенным твердым стоком | вычисление пространственно-временных закономерностей распространения мутности в водоемах; статистические параметры распределения концентрации взвешенных веществ речного потока при недостаточности и отсутствии данных наблюдений | Стохастическая модель годового твердого стока Модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме Модель двухфазного речного потока ДС моделирующая система «Погода – Сток – Наносы» |

Таким образом, методология решения геоэкологических задач, связанных с расчетами твердого стока водных объектов (Рисунок 3.22) представлена принципами исследования (взаимосопряжение и взаимоопределение твердого стока и гидравлических переменных состояния) и основанным на них комплексом представленных выше методов и моделей.

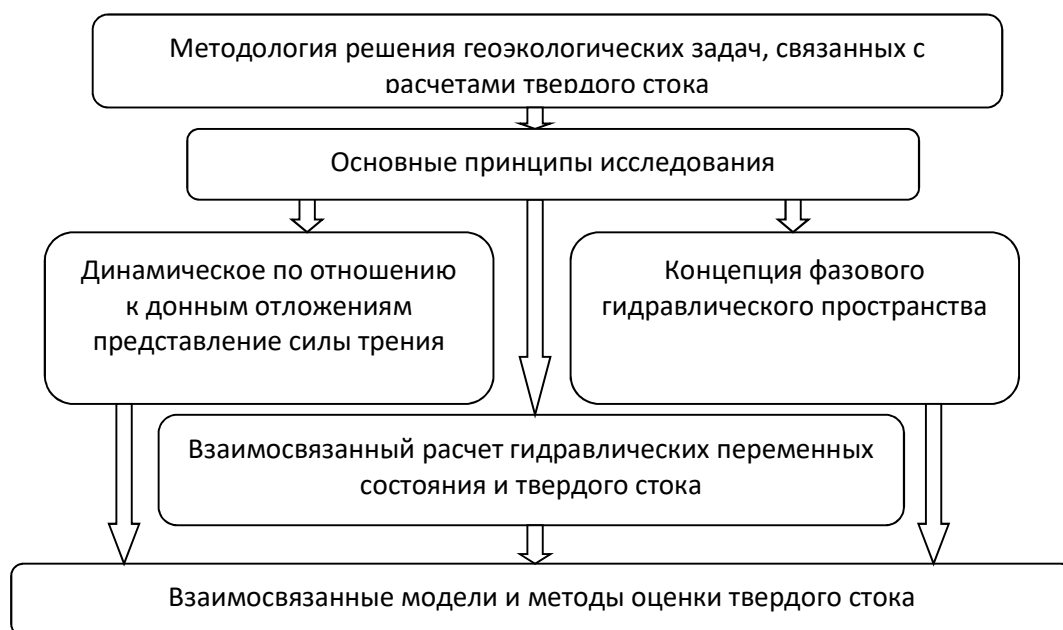


Рисунок 3.22 – Общая схема методологии решения геоэкологических задач, связанных с оценкой твердого стока водных объектов

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

Актуальность задачи. 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. Проведенные исследования осуществлялись в соответствии с Государственным контрактом № 173-15 от 31.07.2015 г. на оказание услуг по комплексному обследованию водохранилища Сестрорецкий Разлив для разработки мероприятий по улучшению его экологического состояния.

Описание объекта моделирования. Сестрорецкий Разлив — старейшее в России водохранилище, созданное во времена Петра I путём запруды реки Сестры и реки Черной для нужд Сестрорецкого оружейного завода. Основные характеристики водохранилища: длина – 5.5 км, ширина – 4.5 км, площадь зеркала 10.3 км², этой площади соответствует объем воды 19 млн. м³. Длина береговой линии составляет 20 км, наибольшая и средняя глубины – 5.5 и 1.6 м соответственно. Площадь водосбора Сестрорецкого Разлива, расположенная на юго-западе Карельского перешейка, составляет 566 км².

Площадь водосборов основных притоков Разлива рек Сестра и Черная составляет 399 и 126 км² соответственно, а протяженность этих рек – 74 и 35 км [2]. По данным наблюдений за твердым стоком, в среднем твердый сток рек Черной и

Сестры составил около 3.5 тыс. т/год. При этом, 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 твердых веществ, поступающих в водохранилище. Из этого количества около 60% остается в акватории в виде донных отложений, остальное выносится стоком. По некоторым данным, средняя скорость осадконакопления в Разливе сейчас составляет около 3 см/год. В областях акватории, характеризующихся малыми глубинами, такая интенсивность осадконакопления приводит к быстрому уменьшению объема и площади пласта [Природа..., 2011].

Уровень воды в водохранилище регулируется. В зависимости от климатических условий или экономических задач за последние 15 лет абсолютные отметки изменялась от 7.8 м до 8.5 м. Инерция реакции водохранилища на метеорологические условия составляет около двух дней.

Большая часть акватории Сестрорецкого Разлива заросла высшей водной растительностью, в основном камышом и хвощом. «Всего в процессе геоботанических работ на водоёме обнаружен 51 вид высших растений, из них 5 видов гидатофитов, 6 видов нейстофитов, 16 видов гелофитов и 24 вида гигрофитов. Эдификаторами растительного покрова Сестрорецкого Разлива из гелофитов являются тростник обыкновенный, камыш озерный и хвощ приречный, из нейстофитов – горец земноводный, рдест плавающий, кувшинка чисто-белая и кубышка желтая, из погруженных растений – только рдест пронзеннолистный» [Распов, 2010].

Климат. Климатические условия рассматриваемого района формируются в основном под влиянием радиационного режима и атмосферной циркуляции. В течение всего года доминируют ветра юго-запада и запада, переносящие влажный воздух из Атлантики. Территория водосбора расположена в переходной зоне умеренно-континентального и морского климата и характеризуется определенной изменчивостью погоды в осенне-зимний период. Последняя вызвана интенсивной циклонической активностью.

Зима в регионе очень мягкая, сырая и облачная, а лето прохладное, с чередой солнечных и дождливых дней. В период прихода антициклона температура воздуха может превышать 30⁰С в течение нескольких декад.

В результате развитой циклонической активности на водосборе Сестрорецкого Разлива выпадает большое количество осадков (средний многолетний слой 714 мм), причем около 70% приходится на теплый период. Наибольший месячный слой осадков приходится на август – сентябрь (более 70 мм), наименьший – на февраль – март (30 – 40 мм). Годовые слои осадков имеют большую межгодовую изменчивость. Например, в 1981 году в течение года выпало 906 мм, что превышает среднемноголетнее значение на 27 %. В течение года наблюдается достаточно много дней с осадками. Так, в зимний период количество дней с осадками в течение месяца может достигать 20, летом уменьшается до 11-13. При этом, увеличивается интенсивность дождя и, соответственно, увеличивается суточное количество осадков.

Выпадение первого снега приходится, как правило, на октябрь, а окончание снеготаяния – на середину апреля. Во второй половине ноября до конца марта устанавливается устойчивый снежный покров. В среднем, продолжительность залегания снежного покрова составляет 123 дня с достаточно большой межгодовой изменчивостью.

В настоящее время наблюдается уменьшение толщины снежного покрова, что вызвано с увеличением зимней температуры воздуха и роста доли жидких осадков в течение года.

Интенсивная циклоническая активность на территории водосбора Сестрорецкого Разлива в течение года определяет ветровой режим. Так, на летний период приходятся ветра западных и северо-западных направлений, на зимний период – юго-западные.

Для района Сестрорецкого Разлива, как и для все территории Российской Федерации, наблюдается тенденция снижения средней скорости ветра на 20 – 40 %. Возможной причиной такой тенденции является изменение поля атмосферного

давления – ослабление барических градиентов в результате климатических изменений, регистрируемых в последние десятилетия.

Экологическое состояние. Экологическое состояние экосистемы водохранилища помимо прочего определяется гидрологическим режимом притоков и интенсивностью водообмена. В маловодный период можно наблюдать обострение неблагоприятной экологической обстановки в акватории, тогда как в годы большой водности «экологическое напряжение спадает» [6]. В многоводный период влияние антропогенных факторов на экосистему озера может быть ослаблено сравнительно большим водообменом водоема. Антропогенная нагрузка исходит от следующих населённых пунктов: г. Сертолово (без очистных), п. Песочный, п. Ленинское, в меньшей степени п. Белоостров. Остальные населённые пункты, расположенные в бассейне водосбора, оказывают незначительное влияние на загрязнение водоёма. Территории, непосредственно прилегающие к границам озера с южной, восточной и северной стороны, отличаются высокой обводненностью и заболоченностью.

По данным исследований 2002 г. Сестрорецкий Разлив является гиперэвтрофным водоемом при очень высоком уровне его продуктивности. Причины этого состоят в значительном загрязнении притоков водоема, а также мелководностью водоема, хорошими условиями его прогрева. Следует заметить, что в акватории Сестрорецкого Разлива наблюдались интенсивные процессы минерализации органического вещества, что и спасало водоем от активного эвтрофирования. Однако длительный период маловодности при продолжающемся загрязнении притоков может привести к тому, что экосистема озера выйдет за пределы устойчивости.

Помимо прочего, к негативным последствиям антропогенного эвтрофирования является «цветение воды», которое определяется интенсивным развитием фитопланктона, прежде всего, синезеленых водорослей. При этом наибольшего обилия достигают один или несколько видов, сокращается биологическое разнообразие, изменяется структура фитопланктонных сообществ. Все это меняет трофический статус водного объекта, наблюдается общая угнетенность акватории.

Все это ограничивает или делает невозможным водохозяйственную деятельность в акватории – большие скопления водорослей затрудняют фильтрацию на водозаборных станциях и, помимо прочего, ухудшают качество рекреационной нагрузки на водоем, меняя как его физические, так и органолептические характеристики.

4.1.1. Расчет годового твердого стока притоков

Расчет годового твердого стока основных притоков Разлива, и как следствие, интенсивности заиления Разлива речными наносами было рассчитано по стохастической модели годового твердого стока.

Данные о годовом твердом стоке притоков лежат в основе расчета периода заиления мелководных водоемов и водохранилищ речными наносами по формулам, приведенным в Главе 2 данной работе (формулы (2.1) – (2.3)).

Результаты моделирования. 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].

На Рисунках 4.1 и 4.2 приведены зависимости $Q=f(h)$ для р. Сестра – ст. Белоостров и р. Черная – п. Дибуны и аппроксимирующие их функции.

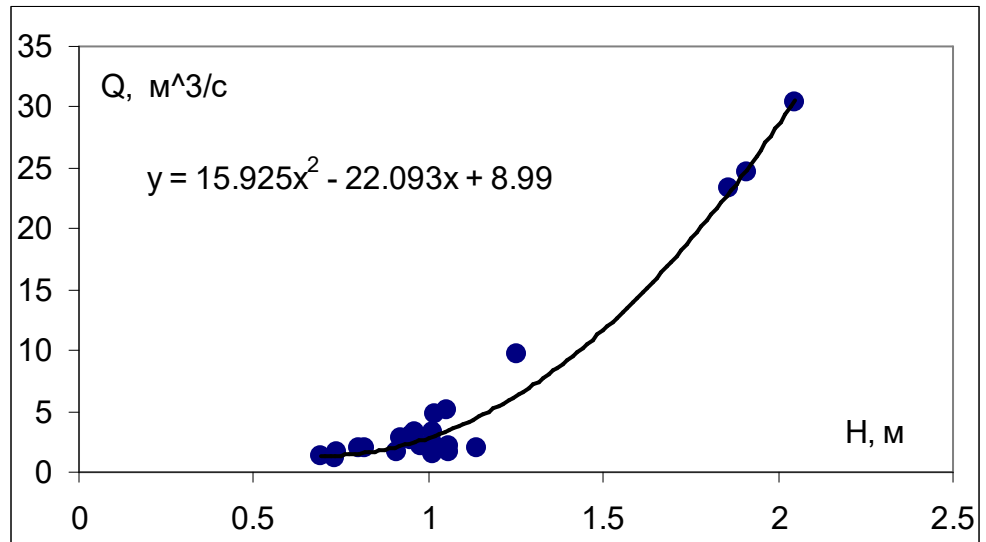


Рисунок 4.1 – Кривая $Q=f(h)$ для р. Сестра – ст. Белоостров

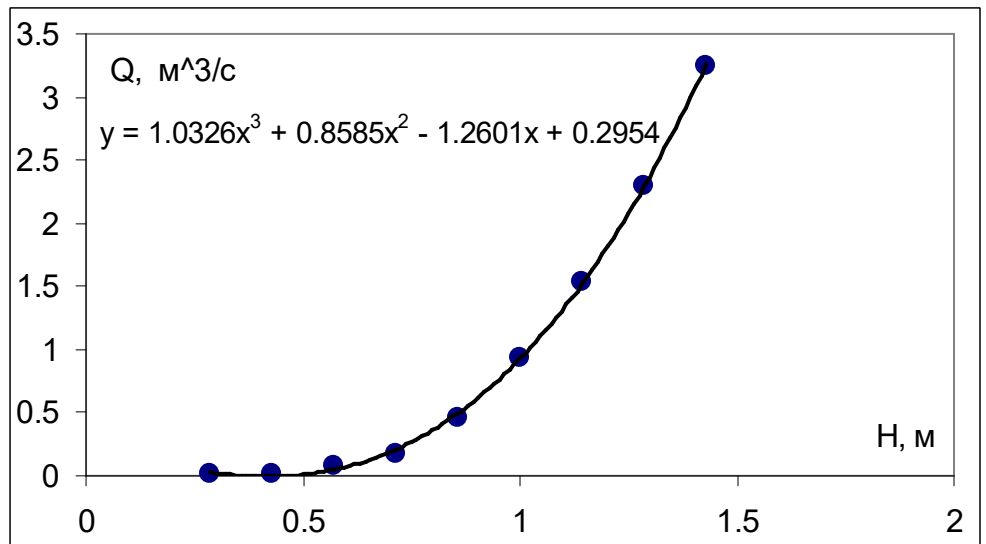


Рисунок 4.2 – Кривая $Q=f(h)$ для р. Черная – п. Дибуны

Эмпирическая и аналитическая (Крицкого-Менкеля) кривые распределения суточных расходов воды р. Сестры – ст. Белоостров для периода 1988 – 1996 гг. приведены на Рисунке 4.3

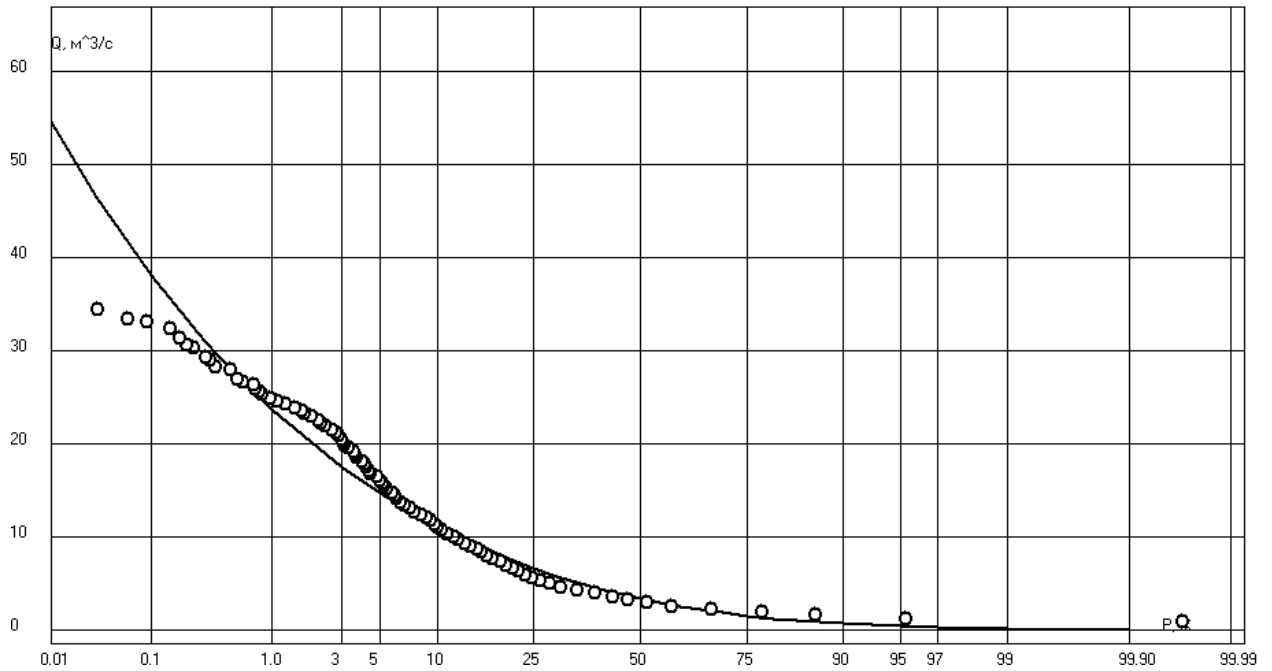


Рисунок 4.3 – Эмпирическая (o) и аналитическая Крицкого-Менкеля (–) кривые распределения суточных расходов воды р. Сестры – ст. Белоостров за период 1988 – 1996 гг. (в клетчатке нормального закона распределения)

Для рек Сестра и Черная сгенерированы ряды суточных расходов воды длиной 36500 значений (100 лет) и для каждого расхода воды рассчитаны средняя глубина потока и расход наносов. Среднее относительное отклонение между среднемноголетними рассчитанными и измеренными значениями расходов наносов составило 6 % для р. Сестра и 16 % для р. Черная. Результаты моделирования твердого стока приведены в Таблице 4.1. Основными возможными причинами отклонения являются погрешность аппроксимации эмпирических точек $Q=f(h)$, и ошибки измерения расхода наносов, с которым сравнивается рассчитанный расход наносов.

Таблица 4.1 – Данные для расчетов и результаты моделирования годового твердого стока рек Сестра и Черная

| | р. Сестра – ст. Белоостров | р. Черная – пос. Дибуны |
|---------------|-------------------------------|----------------------------|
| $Q_{ср.сут.}$ | 4.98 | 0.95 |

| | | |
|--|---------|---------|
| C_V | 1.01 | 1.01 |
| $I, \text{б/р}$ | 0.00214 | 0.00248 |
| $R_{\text{ср. рас}}, \text{Т/ГОД}$ | 2254 | 926 |
| $R_{\text{ср. набл}}, \text{Т/ГОД}$ | 2400 | 1100 |
| $\frac{ R_{\text{ср. рас}} - R_{\text{ср. набл}} }{R_{\text{ср. набл}}} \cdot 100\%$ | 6 | 16 |

В Таблице 4.2 приведены данные для расчета и результаты вычислений по приведенным выше формулам периодов заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива (T_n и T_r , соответственно) для наблюдаемых $G_{\text{ср.набл}}$ и рассчитанных $G_{\text{ср.рас}}$ расходов наносов. Периоды заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива, полученные по наблюдаемым и рассчитанным данным за расходами наносов, отличаются не более чем на 10 %. 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.

Таблица 4.2 – Данные для расчета и результаты вычисления скорости заиления речными наносами для Сестрорецкого Разлива

| $W_B, \text{М}^3^*$ | $W_n, \text{КГ/ГОД}$ (для $G_{\text{ср.набл}}$) | $G_{\text{ср.набл}},$ КГ/С | $G_{\text{ср.рас}},$ КГ/С | $T_n,$ ГОД | $T_r,$ ГОД |
|---------------------|---|-------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|
| $6 \cdot 10^6$ | $3.5 \cdot 10^6$ | 0.11 | 0.1 | 2664 | 2930 |

Согласно расчетам (для Сестрорецкого Разлива $F_{\text{зеркала}}=10.03 \text{ км}^2$); $k=0.6$ [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002], средний слой заиления речными наносами составит 0.1 мм/год по данным наблюдений за твердым стоком и 0.09 мм/год по рассчитанными данным:

$$\delta_{\text{набл}} = \frac{3500 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{год}}{2650 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot 10.03 \cdot 10^6 \text{ м}^2} \cdot 1.3 \cdot 0.6 = 10^{-4} \text{ м} / \text{год} = 0.1 \text{ мм} / \text{год}.$$

$$\delta_{\text{рас}} = \frac{3180 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{год}}{2650 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot 10.03 \cdot 10^6 \text{ м}^2} \cdot 1.3 \cdot 0.6 = 0.9 \cdot 10^{-4} \text{ м} / \text{год} = 0.09 \text{ мм} / \text{год}.$$

Из приведенных выше расчетов следует, что интенсивность заиления акватории водохранилища речными наносами крайне незначительна и твердый сток основных притоков – рек Сестра и Черная не являются основным фактором заиления Сестрорецкого Разлива.

4.1.2. Пространственно-временные закономерности перестроения 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. Всего на акватории Сестрорецкого Разлива назначено 4245 расчетных точек. Шаг по времени составил 2 секунды, по пространству – 50 м. На стационарный режим расчета при $U=const$, $V=const$ модель выходит примерно через 80000 расчетных шагов по времени.

В соответствии со схемой распределения растительности, приведенной в [Распопов, 2010], для некоторых расчетных точек были назначены коэффициенты шероховатости, значения которых были приняты согласно рекомендациям И.Ф. Карасева (для гелофитов $n=0.14$, для плавающих гидрофитов $n=0.2$) [Шмакова, Кондратьев, 2017].

Параметры формулы. Ввиду того, что параметры сопротивления дна потоку являются функцией водности потока, параметры аналитической формулы расхода наносов (3.8) оцениваются отдельно для периода большой воды и периода средней водности и межени. В Таблице 4.3 приведены наблюдаемые расходы воды и наносов (измеренные сотрудниками ИНОЗ РАН в 2015 и 2016 годах) и рассчитанные по формуле (3.8) расходы наносов для периода средней водности и межени. Средние относительные отклонения между рассчитанными $G_{рас}$ и наблюдаемыми $G_{набл}$ расходами наносов рек Сестра и Черная составили соответственно 40 % и 68 %.

На Рисунок 4.4 приведены зависимости между наблюдаемыми и рассчитанными расходами наносов исследуемых водотоков для периода средней водности и межени.

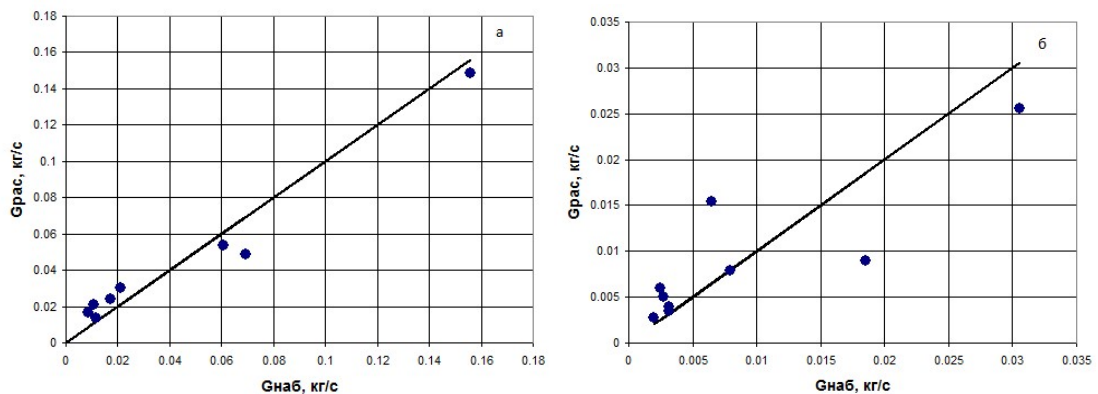


Рисунок 4.4 – Наблюдаемые и рассчитанные расходы наносов, кг/с, р. Сестра (а) и р. Черная (б)

Таблица 4.3 – Наблюдаемые расходы воды и наносов и рассчитанные по формуле (3.8) расходы наносов для периода средней водности и межени

| Дата | Q , м ³ /с | | $G_{набл}$, кг/с | | $G_{рас}$, кг/с | | σ , % | |
|------------|-------------------------|-----------|-------------------|-----------|------------------|-----------|--------------|-----------|
| | р. Сестра | р. Черная | р. Сестра | р. Черная | р. Сестра | р. Черная | р. Сестра | р. Черная |
| 04.08.2015 | 3.75 | 0.8 | 0.06075 | 0.01856 | 0.051039 | 0.009464 | 19.03 | 96.12 |
| 26.08.2015 | 0.95 | 0.31 | 0.01178 | 0.003162 | 0.01293 | 0.003667 | 9.76 | 15.98 |
| 16.09.2015 | 1.15 | 0.35 | 0.008625 | 0.00315 | 0.015652 | 0.00414 | 81.47 | 31.44 |
| 21.10.2015 | 1.45 | 0.54 | 0.010875 | 0.002484 | 0.019735 | 0.006388 | 81.47 | 157.17 |

| | | | | | | | | |
|------------|-------|------|----------|----------|----------|----------|-------|--------|
| 10.11.2015 | 2.10 | 0.45 | 0.021 | 0.0027 | 0.028582 | 0.005323 | 36.10 | 97.16 |
| 24.12.2015 | 10.40 | 2.3 | 0.156 | 0.03059 | 0.141548 | 0.027208 | 10.21 | 12.43 |
| 27.01.2016 | 1.68 | 0.25 | 0.017304 | 0.002 | 0.022865 | 0.002957 | 32.14 | 47.87 |
| 18.02.2016 | | 1.38 | | 0.006486 | | 0.016325 | | 151.69 |
| 24.03.2016 | 3.40 | 0.71 | 0.06936 | 0.007952 | 0.046275 | 0.008399 | 49.89 | 5.62 |

Результаты расчетов. На Рисунках 4.5 – 4.7 приведены карта глубин, план течений и распределение скорости течений на акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета [Шмакова и др., 2016]. Значения скорости течений в акватории крайне незначительны и не превышают несколько миллиметров в секунду. Максимальные значения скорости (несколько сантиметров в секунду) приходятся на места впадения притоков и исток водосливного канала, а также участок транзитного движения водных масс между р. Сестрой и водосливным каналом.

На Рисунке 4.8 представлено рассчитанное распределение расхода наносов через 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.

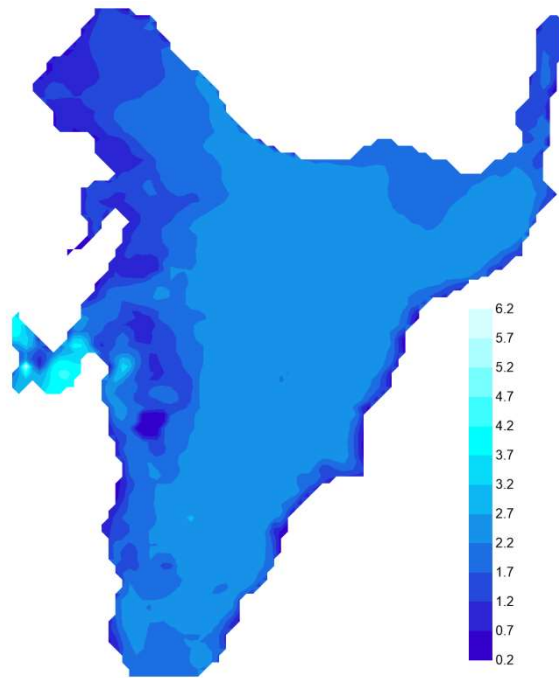


Рисунок 4.5 – Карта глубин Сестрорецкого Разлива

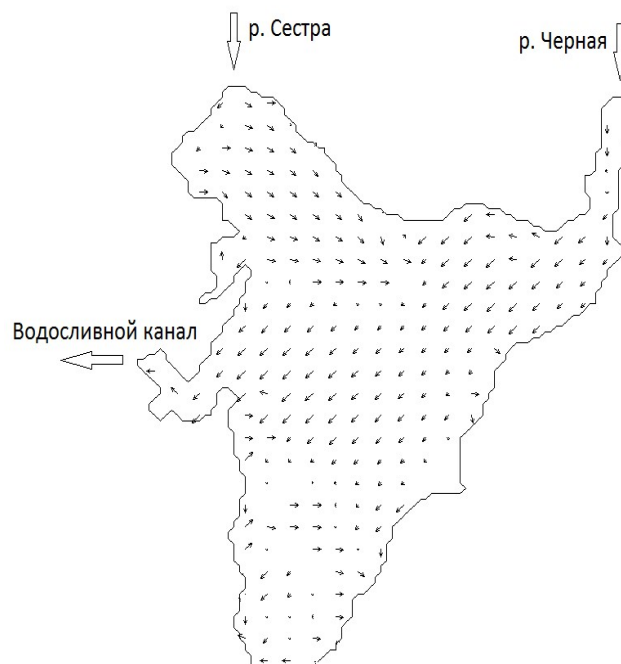


Рисунок 4.6 – План течений на акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета при расходе воды р. Сестры $2 \text{ м}^3/\text{с}$

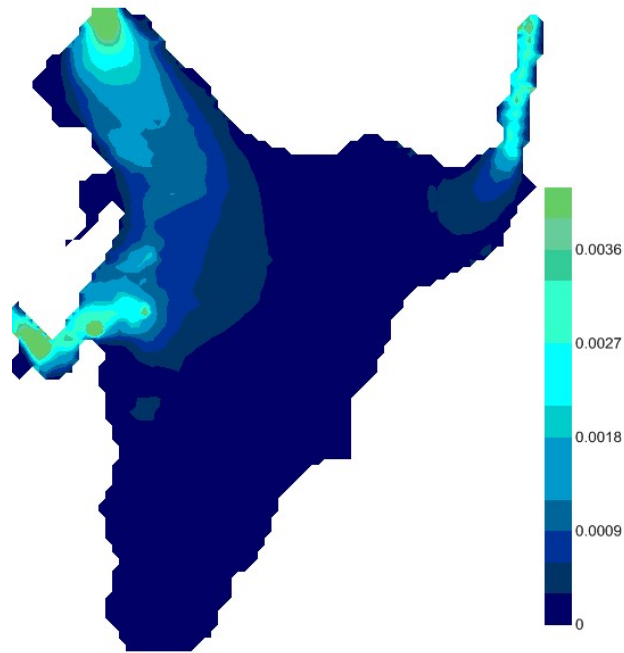


Рисунок 4.7 – Распределение скорости течений (м/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в межень при расходе р. Сестры $2 \text{ м}^3/\text{с}$

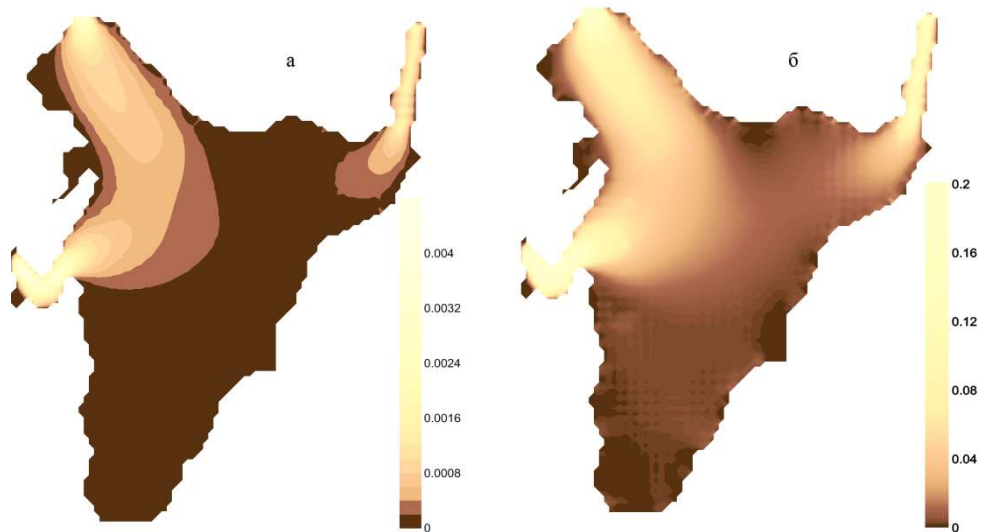


Рисунок 4.8 – Рассчитанное распределение расхода наносов (кг/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в меженный период (а) и период половодья (б) при отсутствии ветра

На Рисунке 4.9 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].

Как видно из Рисунка 4.9, переформирование дна поступающими из притоков речными наносами незначительно по интенсивности и охватывает лишь северную часть акватории. Это вызвано малыми значениями скорости воды и, как следствие, слабой циркуляцией водных масс в акватории. Однако, учитывая небольшую глубину водоема, на перераспределение поступающих в водоем речных наносов значительное влияние оказывает ветровое перемешивание. На Рисунках 4.10 и 4.11 приведены карты плана течения и расхода наносов при задании постоянного по направлению и скорости ветра в течение суток в меженный период (расход р. Сестры принят равным $2.0 \text{ м}^3/\text{с}$, р. Черной – $0.5 \text{ м}^3/\text{с}$). Для численного эксперимента выбрано доминирующее в летнюю межень направление ветра — западное [Научно-прикладной справочник..., 1988]. Скорость ветра для расчета принята равной 5.0 м/с . Как видно из Рисунка 4.11 основные пути транспорта наносов приходятся на северную – участок притоков, западную мелководную и центральную части акватории.

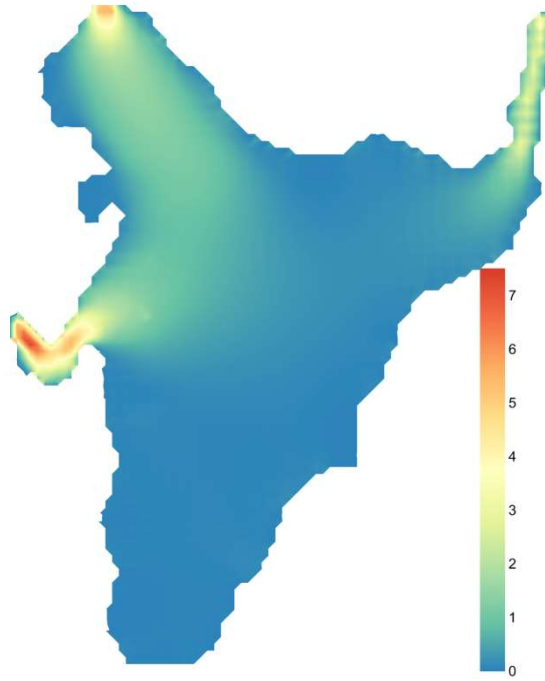


Рисунок 4.9 – Рассчитанное переформирование дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) для периода спада половодья – намыв

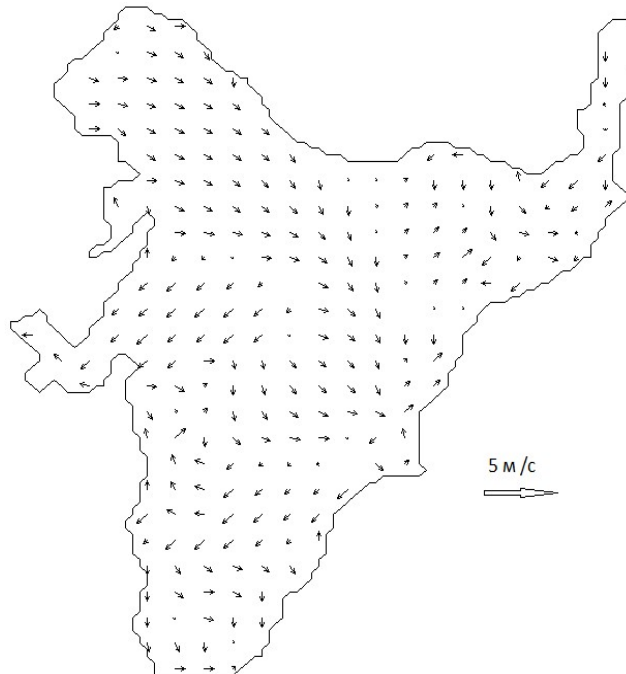


Рисунок 4.10 – План течений на акватории Сестрорецкого Разлива при стационарном режиме расчета при западном ветре 5 м/с

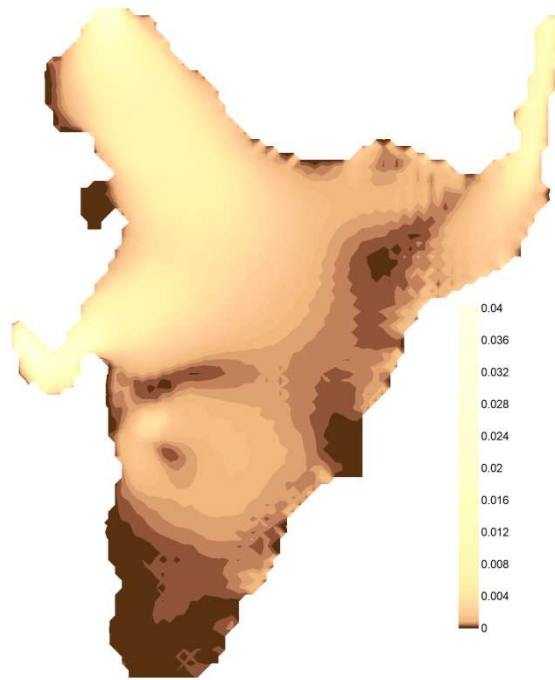


Рисунок 4.11 – Распределение расхода наносов (кг/с) на акватории Сестрорецкого Разлива в меженьный период при расходе воды р. Сестры $2 \text{ м}^3/\text{с}$ при западном ветре 5 м/с

Особенности морфометрии Сестрорецкого Разлива, а также расположение источников и стока относительно друг друга способствуют неравномерному распределению поступивших с притоками речных наносов. Это отражается как на значениях расходов наносов, так и интенсивности переформирования дна. Очевидно, что распределение речных наносов является функцией скорости течения, наиболее выраженной в северной части водоема.

Относительно активная циркуляция водных масс в северной части Разлива происходит за счет впадающих речных потоков. Однако даже в этой части акватории скорости течения в межень достигают нескольких сантиметров в секунду, тогда как в центральной и южной частях Разлива скорости течения на порядок меньше. Расходы наносов в северной части акватории в период межени составляют лишь несколько грамм в секунду, тогда как в половодье с увеличением скорости течения могут достигать нескольких десятых долей килограмма в секунду.

Интенсивность процессов переформирования дна речными наносами также неодинакова в течение года. Интенсивный процесс аккумуляции речных наносов приходится на период спада половодья, когда скорость течения начинает снижаться, транспортирующий потенциал потока уменьшается, что приводит к осаждению наносов. Максимальные значения намыва в этот период составляют 6 – 9 мм за декаду.

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. Однако в среднем по водохранилищу эта величина будет на порядок меньше, что хорошо согласуется с результатами расчетов, полученными ранее [Водные объекты Санкт-Петербурга, 2002]. Ветровое перемешивание приводит к перераспределению донных отложений по акватории. При преобладающих ветрах западных направлений в процессы переформирования дна включается и центральная часть Сестрорецкого Разлива.

4.1.3. ДС моделирование 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.

В рамках ДС моделирования притока в водохранилище решались следующие задачи:

1. Оценка параметров СМП для наблюдаемых рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные суммы осадков).
2. Корректирование параметров СМП в соответствии с выбранным климатическим прогнозом.

3. Имитационное моделирование рядов метеорологических элементов продолжительной длины.

4. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.

5. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по модели *IL_HM*.

6. Оценка параметров распределения месячных и годовых значений стока – среднего и среднего квадратичного отклонения, медианы, и квартильного размаха.

7. Оценка среднего годового твердого стока притоков.

8. Оценка пространственно-временных закономерностей заиления водоема речными наносами.

Основной приток водохранилища река Сестра использована как объект дополнительной верификации модели формирования стока *IL_HM*. Ввиду отсутствия метеорологических станций на водосборе реки Сестры, среднемесячная температура воздуха и месячные суммы осадков рассчитывались по двум близлежащим метеорологическим станциям, расположенным в Выборге и Санкт-Петербурге. Сравнение измеренных и рассчитанных значений среднемесячных расходов воды (Рисунок 4.12 – 1) и годовых слоев стока (Рисунок 4.12 – 2) в р. Сестре позволяет сделать вывод об их удовлетворительном соответствии.

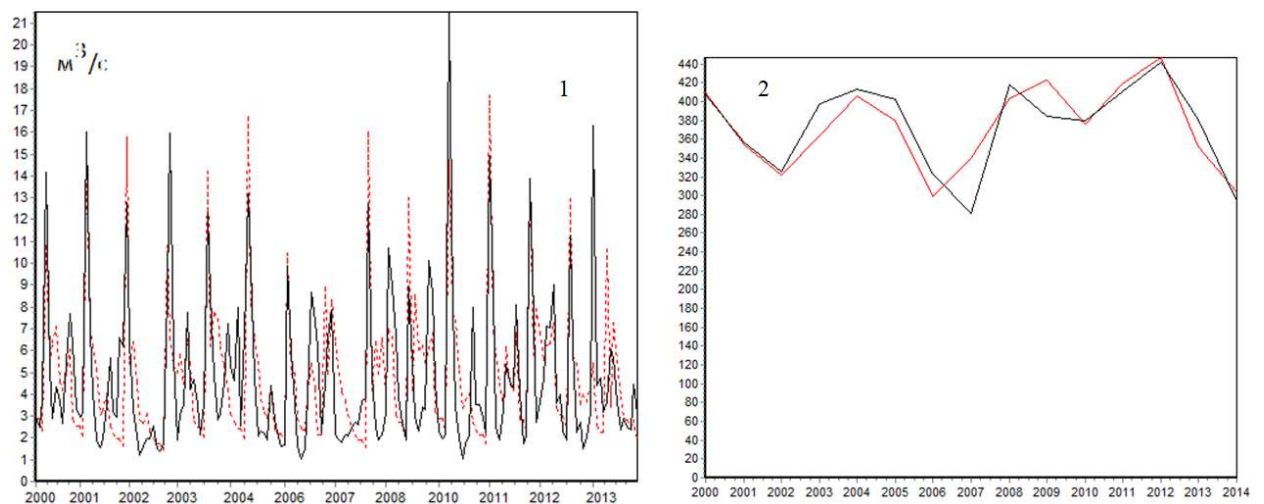


Рисунок 4.12 – Измеренные (-) и рассчитанные (····) значения среднемесячных расходов воды (1) и годового слоя стока (2) реки Сестры

Оценка параметров СМП проводилась на основании данных наблюдений за

метеорологическими элементами на метеорологических станциях, расположенных в Выборге и Санкт-Петербурге за период 1965 – 2000 гг.

На основании полученных параметров СМП сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов (температуры воздуха и слоев осадков) продолжительностью 100 лет, которые послужили входом в гидрологическую модель *IL_HM*. С ее помощью были рассчитаны слои месячного и годового стока по реальной метеорологии, а затем по сгенерированным метеорологическим рядам.

В Таблице 4.4 приведены параметры распределения среднегодовых расходов воды Сестры (среднегодовое значение $Q_{\text{ср}}$ и среднее квадратичное отклонение σ), полученные по реальным и сгенерированным метеорологическим рядам. Хорошее соответствие рассчитанных и наблюдаемых параметров распределения дает основание использовать СМП в качестве генератора прогнозных рядов метеорологических величин.

Таблица 4.4 – Параметры распределения среднегодовых расходов воды р. Сестры – ст. Белоостров

| | $Q_{\text{ср}}$, м ³ /с | σ |
|------------------------|-------------------------------------|----------|
| Наблюденные, 2000-2014 | 4.73 | 0.61 |
| Рассчитанные по СМП | 4.95 | 0.64 |

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]. Прогностический период охватывает 2009 – 2099 гг. 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 ECHAM5/MPI-OM, основные прогнозные показатели сценариев приведены в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Прогноз изменений температуры воздуха и осадков в Балтийском регионе к 2099 г. в соответствии с выбранными сценариями [Карлин, 2010]

| Модель, сценарий | Рост средней годовой температуры за 100 лет, °С | Рост среднего суточного слоя осадков за 100 лет, мм /сут |
|------------------|---|--|
| ЕСНАМА2 | 6.0 | 0.39 |
| ЕСНАМВ1 | 4.2 | 0.05 |

По заданным характеристикам климатических сценариев с использованием СМП генерировались ряды температуры воздуха и осадков продолжительностью 100 лет, после чего расчеты выполнялись в порядке, изложенном выше.

Количественная оценка средних значений, средних квадратичных отклонений и значений различной обеспеченности стока приведена в Таблице 4.6. 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.

В Таблице 4.7 представлены рассчитанные значения годового твердого стока с водосбора по (модели годового твердого стока) и средней скорости заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива, как в настоящее время, так и при условии реализации рассмотренных выше сценариев возможных климатических изменений в регионе. Средняя по акватории интенсивность заиления рассчитывалась путем равномерного распределения оставшихся в водоеме речных наносов с учетом их последующей плотности залегания [Рекомендации..., 2006].

Таблица 4.6 – Результаты ДС моделирования стока в случаях реализации климатических сценариев ЕСНАМА2 и ЕСНАМ В1: среднее значение – $X_{ср}$, среднее квадратичное отклонение – σ , значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % - $X_{\%}$

| | X_{cp} | σ | $X_{1\%}$ | $X_{5\%}$ | $X_{25\%}$ | $X_{75\%}$ | $X_{95\%}$ | $X_{99\%}$ |
|--------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| ЕСНАМ А2 | | | | | | | | |
| H , мм/год | 161 | 41.9 | 259 | 230 | 189 | 133 | 92 | 63 |
| ЕСНАМ В1 | | | | | | | | |
| H , мм/год | 197 | 46.7 | 306 | 274 | 228 | 166 | 120 | 88.2 |

Таблица 4.7 – Рассчитанные значения годового твердого стока с водосбора и средней по акватории скорости заиления в различных климатических условиях

| | Настоящее время | ЕСНАМ А2 | ЕСНАМ В1 |
|--------------------------------------|-----------------|----------|----------|
| Годовой твердый сток притоков, т/год | 3500 | 1862 | 2258 |
| Скорость заиления, мм/год | 0.1 | 0.05 | 0.07 |

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что как в настоящее время, так и при условии реализации рассмотренных климатических сценариев поступление речных наносов в Сестрорецкий Разлив составляет доли мм/год, то есть интенсивность заиления речными наносами акватории Разлива крайне незначительная.

На Рисунках 4.13 и 4.14 представлены результаты моделирования переформирования дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) для расчета стационарного режима при среднегодовом расходе воды 5 % и 95 % обеспеченности в современных условиях и при реализации наиболее «мягкого» климатического сценария ЕСНАМ А2.

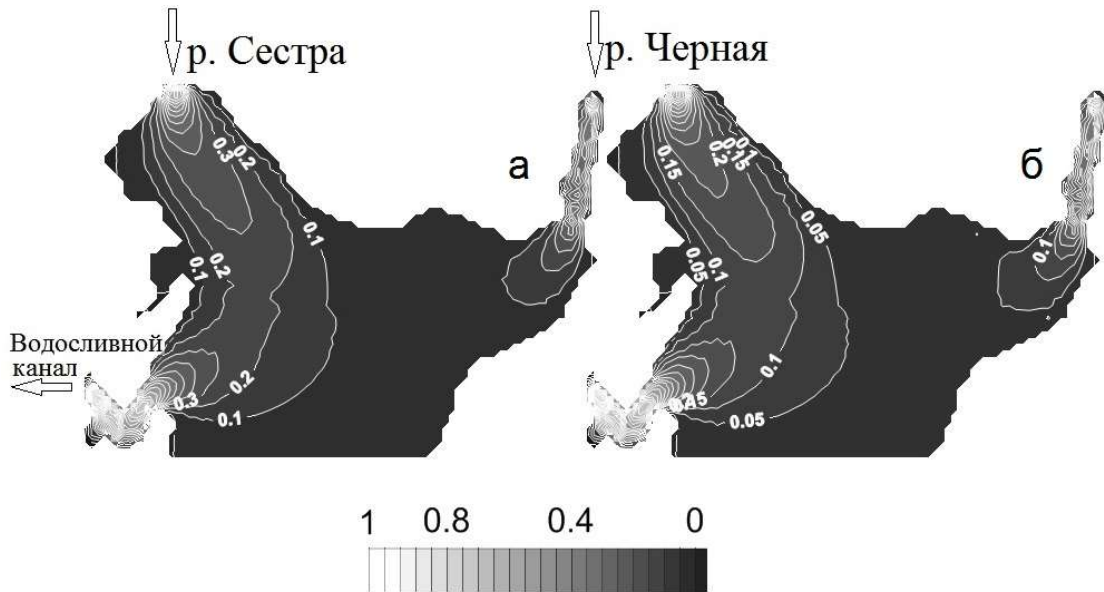


Рисунок 4.13 – Переформирование дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) при среднегодовом стоке с водосбора обеспеченности 5 % в современных условиях (а) и при реализации климатического сценария ЕСНАМ А2 (б)

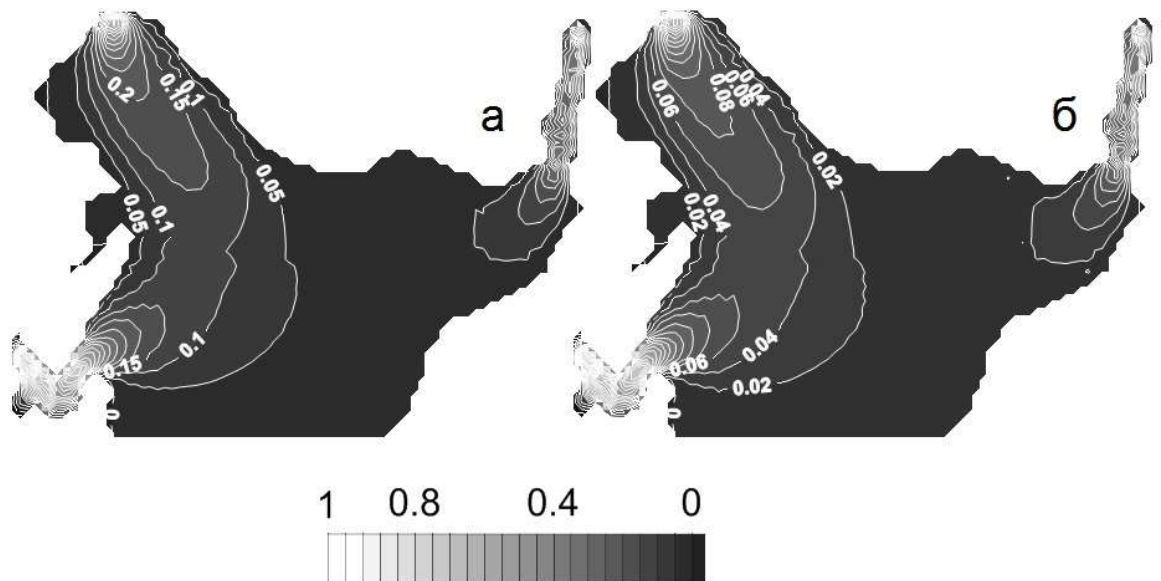


Рисунок 4.14 – Переформирование дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) при среднегодовом стоке с водосбора обеспеченности 95 % в современных условиях (а) и при реализации климатического сценария ЕСНАМ А2 (б)

Результаты моделирования показали, что в случае реализации климатического сценария ЕСНАМА2 уменьшение водности повлечет за собой

уменьшение твердого стока притоков и, как следствие, снижение заиления водоема. Полученные результаты свидетельствуют о том, что представленная ДС моделирующая система позволяет выявить возможные изменения скорости заиления и перераспределения наносов по акватории в различных климатических ситуациях.

4.2. Моделирование распространения наносов в озере Неро

Актуальность задачи. Озеро Неро крупнейшее в Ярославской области, имеет большое средообразующее, оздоровительное, рекреационное и водохозяйственное значение для всего региона. За озером ведутся многолетние научные исследования (Ярославский государственный Демидовский университет и Институт внутренних вод Российской Федерации). В настоящее время имеют место неблагоприятные явления – заилены устьевые участки рек; замедлен водообмен озера; озеро заиляется; увеличены концентрации азота и фосфора; ухудшены показатели качества воды в целом.

В связи с этим были разработаны мероприятия, направленные на экологическую реабилитацию водоема. Экологическая реабилитация представляет собой систему мер, направленных на улучшение экологического состояния водного объекта и прилегающей территории с применением современных биотехнологий.

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. Проведенные исследования осуществлялись в соответствии с Государственным контрактом № 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».

Описание объекта моделирования. Озеро Неро – крупнейшее озеро Ярославского Поволжья. Средняя глубина озера – 1.5 м, площадь зеркала около

54.5 км². Средний уклон дна озера составляет 0.07°. Озеро Неро является зарегулированным водоемом – единственный сток из озера – река Векса – перегорожена плотиной у с. Богородицкое. Основными притоками в озеро являются реки Сара и Ишня, а также около 19 рек и ручьев. Общая площадь водосбора р. Сара составляет около 63 % площади водосбора озера. Средний годовой расход р. Сара за 1999 – 2011 гг. равен 3.41 м³/с, расход реки Ишня примерно в пять раз меньше.

На всем протяжении озеро бурно зарастает водной растительностью, которая, ежегодно отмирая и оседая на дно, способствует обмелению озера. Также на обмеление озера влияют и наносы, поступающие в озеро с притоками. Наиболее интенсивно озеро зарастает в южной части. В среднем относительная площадь, покрытая макрофитами, находится в пределах 20 – 25 % от общей площади озера. Водная растительность в общем виде представлена гелофитами, гидрофитами с плавающими листьями и погруженными гидрофитами [Бикбулатов, 2003].

Климат. Климат бассейна Верхней Волги умеренно континентальный и складывается под воздействием морских и континентальных воздушных масс. Морские массы формируются над северными районами Атлантического океана и арктических морей, континентальные над Азиатской территорией СНГ. Средняя температура воздуха в бассейне озера составляет 3.4 0С. Самый теплый месяц июль, наиболее холодные – январь и февраль. Переход среднесуточной температуры через 00С происходит в первой половине апреля, осенью – в первых числах ноября. Среднее многолетнее количество осадков составляет 523 мм, 73% из них выпадает в теплый период года (апрель – октябрь). В зависимости от климатических условий сезонный ход метеорологических характеристик может существенно изменяться. Ветровые условия района озера определяются его направлением, скоростью и суточным ходом. Крайняя мелководность и открытость озера Неро обуславливает высокую реакцию водоема на ветровое воздействие. В течение года преобладают ветры южных направлений, а в теплый период – северо-западных направлений.

Экологическое состояние. Озеро Неро имеет огромное средообразующее, оздоровительное, рекреационное и градостроительное значение для г. Ростов, а также для всей Ярославской области. За озером ведутся многолетние научные исследования (Ярославский государственный Демидовский университет и Институт внутренних вод Российской Федерации).

В настоящее время отмечены следующие негативные явления:

- Закупорены устьевые участки рек питающих озеро водой и обеспечивающих необходимый водообмен, что приводит к загниванию воды в озере, низкому количеству кислорода в воде;
- Заиление (глубины от 1,5 до 3м) приводит к сквозному промерзанию озера зимой и возникновению ежегодных заморов рыбы, повышению температуры воды в летний период;
- Возрастание концентраций азота и фосфора, ухудшение органолептических свойств и качественных характеристик водных ресурсов, сопряженное с этим увеличение количественных характеристик фитопланктона озера.
- Значимо увеличился вклад синезеленых водорослей за счет возрастания биомассы планктотрихетового комплекса по «катастрофическому» типу и многие другие негативные процессы.

По данным [Отчет..., 2011] установлено:

«...оз. Неро приблизилось к конечной стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии водных экосистем – стадии гипертрофного водоема. Это подтверждают абиотические характеристики водоема: высокие внешние и особенно внутренние нагрузки биогенами, низкая прозрачность воды за счет обильного развития фитопланктона, перенасыщение воды кислородом в летний период во время фотосинтеза, высокие значения рН в это время и практическое отсутствие кислорода в конце ледостава. Биотическая составляющая также свидетельствует о переходе водоема к гипертрофному статусу: по высокой биомассе фитопланктона, первичной продукции, доминированию тонких нитчатых синезеленых водорослей, составу, низкому обилию зоопланктона, характеру трофических взаимоотношений

в планктонном сообществе, деградирующей структуре рыбного населения и др. Водоем характеризуется продуцированием органического вещества в северной и центральной части по «фитопланктонному» типу (примерно 70-75% акватории) и южной по «макрофитовому» (около 25-30%)...» [Отчет..., 2011].

Параметры формулы. Регулярных наблюдений за расходами наносов на притоках озера Неро не проводится. Поэтому, для калибровки параметров аналитической формулы расхода наносов были выбраны реки – аналоги со сходным гидравлическим режимом, расположенные в схожих физико-географических условиях, на которых проводятся относительно регулярные наблюдения за твердым стоком.

В Таблице 4.8 приведен список рек, их характеристики и коэффициенты корреляции $r_{\text{Сара}}$ суточных расходов воды водотоков, выбранных в качестве возможных рек – аналогов для реки Сара. Расчеты проводились для периода 2008 – 2013 гг. Наиболее тесная связь суточных расходов воды наблюдается для рек Которость и Соть. По водности и среднему уклону водотока к реке Сара наиболее близка река Соть, а по внутригодовой изменчивости (C_v) – река Которосль. Однако для калибровки параметров формулы расхода наносов соответствие водности реки имеет значительно большее значение, чем соответствие внутригодовой изменчивости. Поэтому в качестве реки–аналога для расчета расхода наносов реки Сара принята река Соть.

Таблица 4.8 – Характеристики реки Сары и ее возможных аналогов

| Название водного объекта | Расстояние от устья, км | $F_{\text{вдсб}}, \text{ км}^2$ | $I, \text{ ‰}$ | $Q_{\text{ср.сут}}, \text{ м}^3/\text{с}$ | C_v | $r_{\text{Сара}}$ |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------|---|-------|-------------------|
| р. Урдома – с.Белянтино | 4.8 | 345 | 2.1 | 3.14 | 3.16 | 0.74 |
| р. Которосль – г. Гаврилов Ям | 79.0 | 4980 | 0.3 | 35.02 | 1.32 | 0.83 |
| р. Соть – д.Верхний Жар | 59.0 | 683 | 1.1 | 5.98 | 2.9 | 0.84 |
| р. Сара – пгт.Петровское | 31.0 | 482 | 1.3 | 3.66 | 1.31 | – |

В Таблице 4.9 приведены наблюдаемые расходы воды и наносов (Гидрологический Ежегодник т. 4, вып. 1 – 3 [1972; 1973; 1974]) и рассчитанные по формуле (3.8) расходы наносов. Среднее относительное отклонение между рассчитанными $G_{рас}$ и наблюдаемыми $G_{набл}$ расходами наносов р. Соть – д. Верхний Жар составило 74 %.

Таблица 4.9 – Наблюденные расходы воды и наносов и рассчитанные по формуле (3.8) расходы наносов

| $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $h, \text{ м}$ | $G_{набл}, \text{ кг/с}$ | $G_{рас}, \text{ кг/с}$ | $\sigma, \%$ |
|---------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|--------------|
| 54.4 | 2.5 | 1.4 | 1.52 | 0.09 |
| 35.2 | 2.03 | 0.82 | 0.99 | 0.20 |
| 13.1 | 1.32 | 0.11 | 0.37 | 2.33 |
| 57.2 | 2.65 | 1.9 | 1.60 | 0.19 |
| 29.6 | 1.87 | 0.45 | 0.83 | 0.84 |
| 31 | 1.94 | 1.28 | 0.87 | 0.48 |
| 27.9 | 1.85 | 0.55 | 0.78 | 0.42 |
| 26.3 | 1.80 | 0.31 | 0.74 | 1.37 |

На Рисунке 4.15 приведены зависимости между наблюдаемыми и рассчитанными расходами наносов реки Сара для периода половодья.

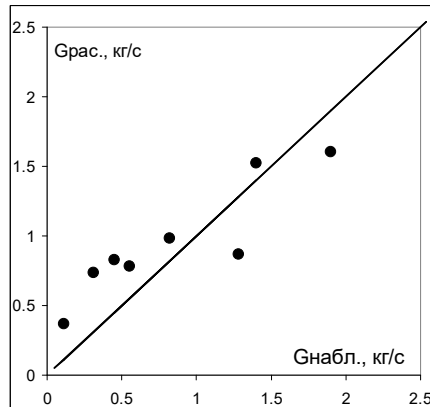


Рисунок 4.15 – Наблюденные и рассчитанные расходы наносов, кг/с, р. Соть – д. Верхний Жар

Таким образом, для расчета по формуле (3.8) для разных периодов водности были приняты следующие значения параметров $c=0.01 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$; $f=1.016$.

Результаты расчетов. Всего на акватории Неро назначено 5417 расчетных точек. Шаг по времени составил 2 секунды, по пространству – 100 м. На стационарный режим расчета при $U=const$, $V=const$ модель выходит примерно через 30000 расчетных шагов по времени.

В соответствии со схемой распределения растительности, приведенной в [Бикбулатов, 2003], для некоторых расчетных точек были назначены коэффициенты шероховатости, значения которых были приняты согласно рекомендациям И.Ф. Карасева (для гелофитов и погруженных гидрофитов $n=0.14$, для плавающих гидрофитов $n=0.2$).

На Рисунках 4.16 и 4.17 приведены карта глубин и план течений на акватории озера Неро при стационарном режиме расчета. На Рисунке 4.18 представлено распределение скорости течений для разных периодов водности. В целом, значения скорости течений воды в акватории крайне незначительны и не превышают несколько миллиметров в секунду. Максимальные значения скорости (несколько сантиметров в секунду) приходится 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.

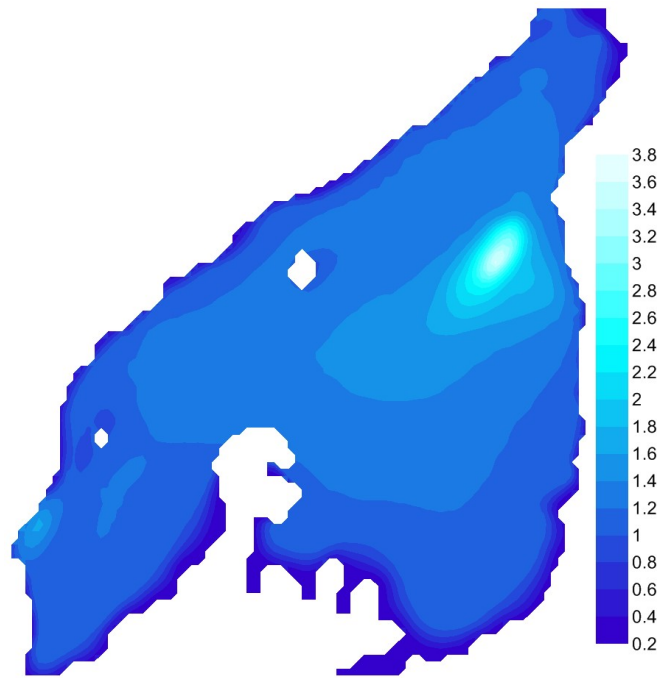


Рисунок 4.16 – Карта глубин озера Неро, м

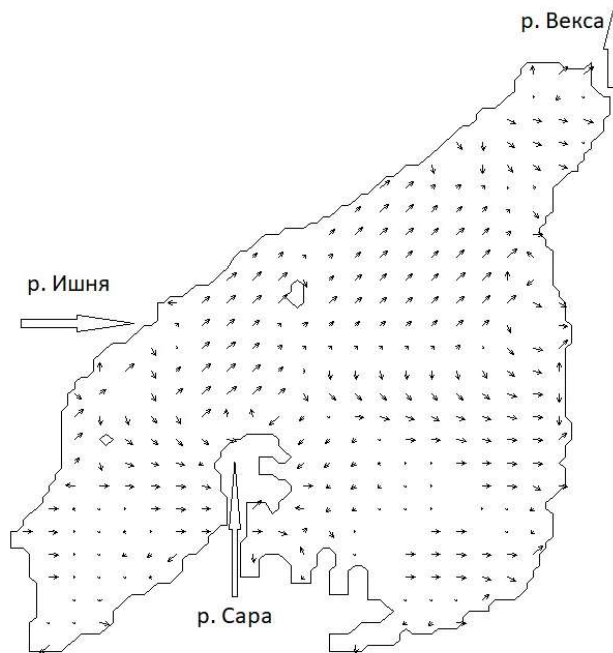


Рисунок 4.17 – План течений на акватории озера Неро при стационарном режиме расчета при расходе воды р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$

На Рисунке 4.19 представлено распределение расхода наносов через поперечное сечение расчетной ячейки (кг/с) на акватории озера Неро для разных периодов водности. Распределение расхода наносов повторяет распределение скорости течений. 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 расходов наносов незначительны и не превышают нескольких грамм в секунду. Это объясняется крайне малыми скоростями течения.

Как и в Сестрорецком Разливе, особенности морфометрии озера Неро, расположение притоков и стока относительно друг друга способствуют неравномерному распределению поступивших с притоками речных наносов. И это влияет на значения расхода наносов и на неравномерное переформирования дна озера. Очевидно, что распределение речных наносов определяется течениями притоков, наиболее выраженными в западной и южной частях водоема.

На Рисунке 4.20 представлена карта размыва дна озера Неро для десятидневного периода при расходе р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$. Наибольшая интенсивность донных переотложений приходится так же, как и на Рисунке 4.19 на места впадения притоков и участки транзитного переноса наносов.

Как видно из Рисунка 4.20, переформирование дна поступающими из притоков речными наносами незначительно по интенсивности и охватывает лишь пути транзитного перемещения наносов. Это вызвано малыми значениями скорости воды и, как следствие, слабой циркуляцией водных масс в акватории. Однако, учитывая небольшую глубину водоема, на перераспределение поступающих в водоем речных наносов значительное влияние оказывает ветровое перемешивание.

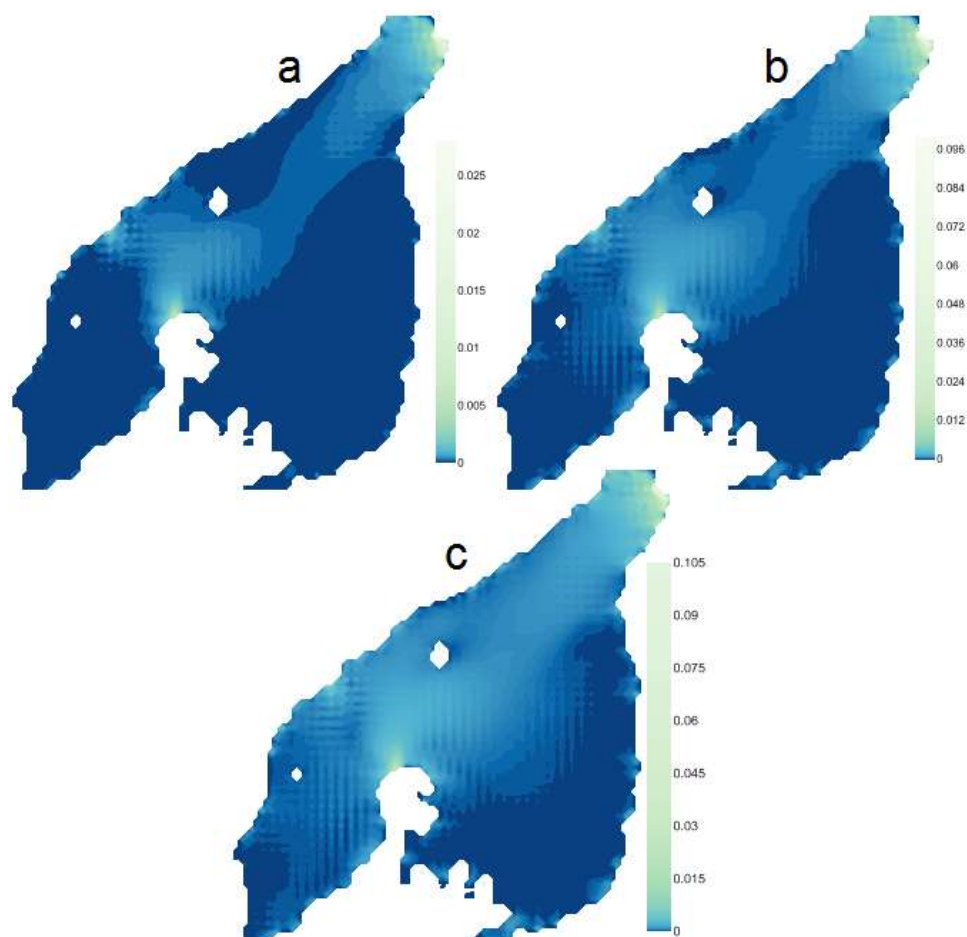


Рисунок 4.18 – Распределение скорости течений (м/с) на акватории озера Неро при расходе р. Сара: 1.7 м³/с – (а), 3.7 м³/с – (b), 6.7 м³/с – (с)

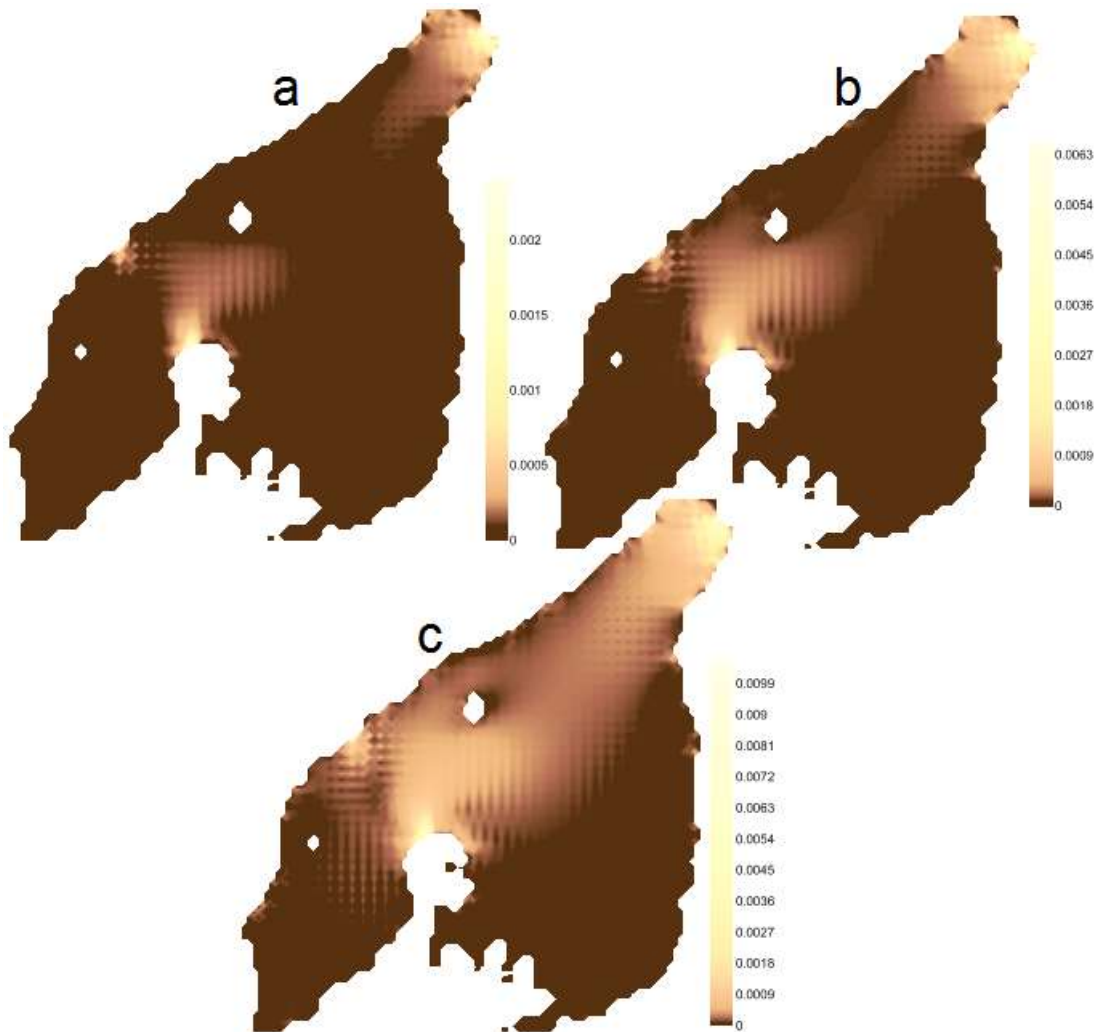


Рисунок 4.19 – Схема распределения расхода наносов (кг/с) на акватории озера Неро при расходе р. Сара: $1.7 \text{ м}^3/\text{с}$ – (а), $3.7 \text{ м}^3/\text{с}$ – (б), $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ – (с)

В среднем по акватории за год согласно расчетам по модели заиление речными наносами двух притоков – рек Ишня и Сара – составляет около 0.5 мм в год, что не противоречит данным прежних исследований [Бикбулатов, 2003].

На Рисунке 4.21 и 4.22 приведены карты плана течений, скорости течений и расхода наносов при задании постоянного по направлению и скорости ветра при расходе р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$. Для численного эксперимента выбраны два доминирующих в летний период направление ветра — северное и юго-западное, при постоянной скорости 5.0 м/с [Бикбулатов, 2003]. Согласно данным наблюдений за планом течений в озере, так и по результатам математического моделирования, проведенного другими исследователями [Бикбулатов, 2003] при ветре северных

направлений у западного берега формируется циклонический круговорот воды (против часовой стрелки), у восточного – антициклонический. При ветрах южных направлений положение круговоротов остается прежним за изменением направлений на противоположные.

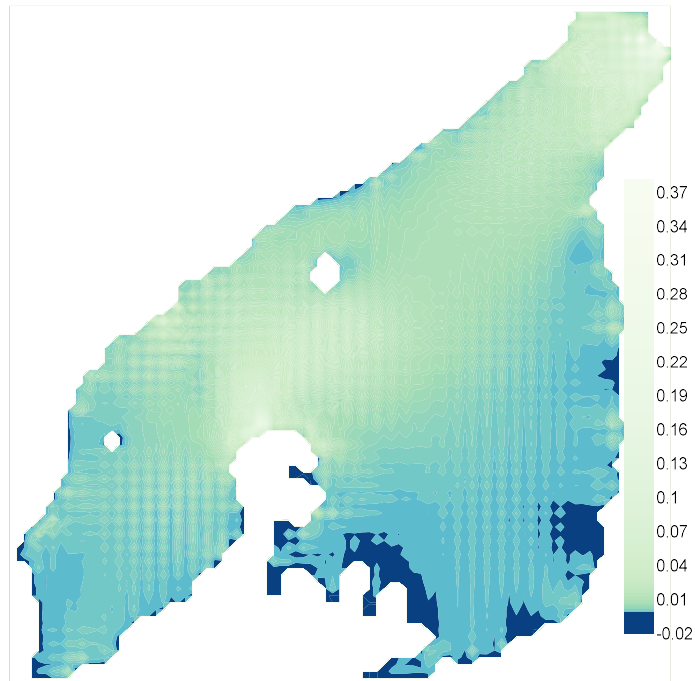


Рисунок 4.20 – Схема переформирования дна озера Неро (мм/декада)

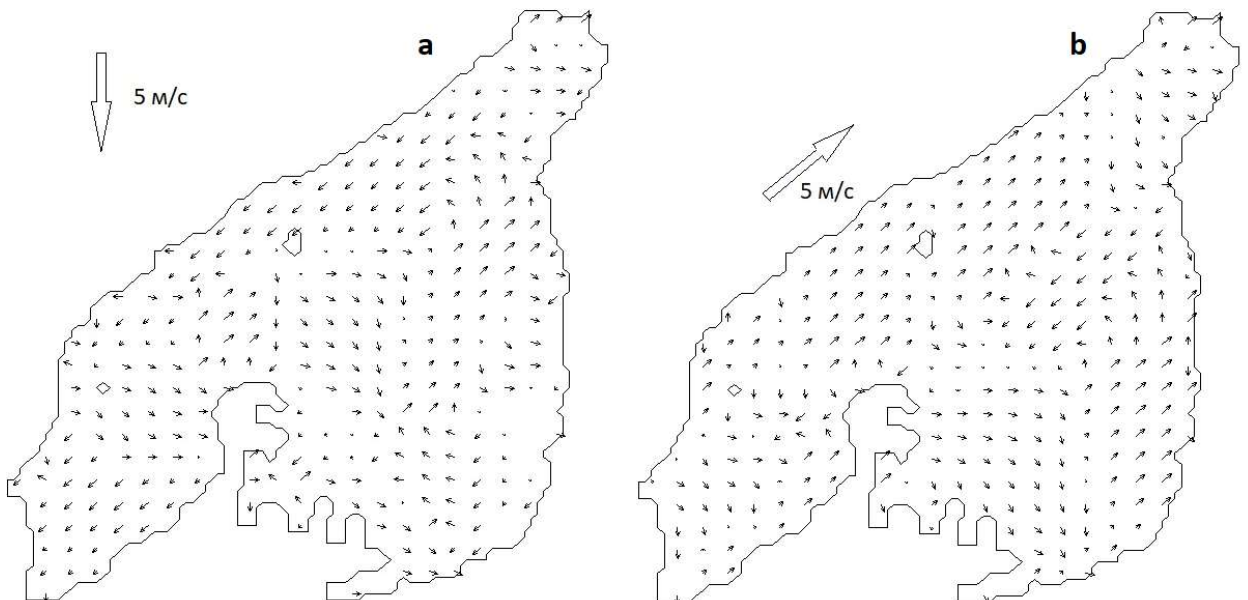


Рисунок 4.21 – План течений на акватории озера Неро при стационарном режиме расчета при северном ветре 5 м/с (а) и при юго-западном ветре 5 м/с (б)

Более активная циркуляция водных масс при указанных ветрах приводит к изменению циркуляции и твердого вещества в акватории (Рисунок 4.23). Почти во всех частях озера происходит взмучивание донных отложений, однако значение расхода наносов остается в пределах нескольких десятков грамм в секунду.

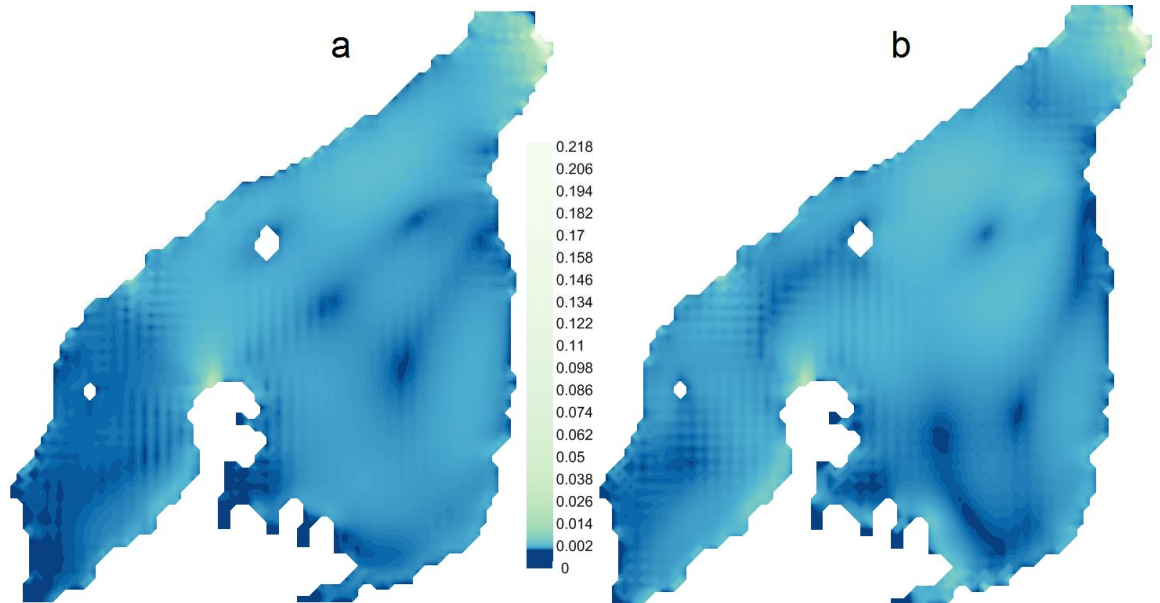


Рисунок 4.22 – Распределение скорости течений (м/с) на акватории озера Неро при расходе воды р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ при юго-западном ветре 5 м/с (а) и при северном ветре 5 м/с (б)

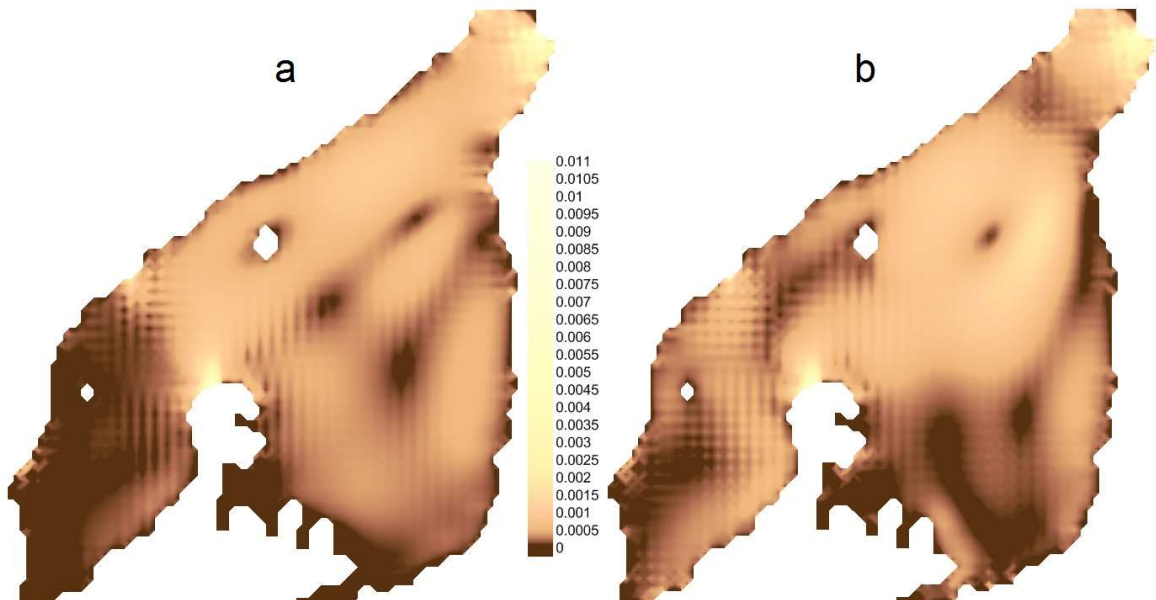


Рисунок 4.23 – Распределение расходов наносов (кг/с) на акватории озера Неро при расходе воды р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ при юго-западном ветре 5 м/с (а) и при северном ветре 5 м/с (б)

При реализации проектов, направленных на экологическое оздоровление озера Неро, были проведены численные эксперименты с целью оценки полей течений при реализации двух проектных решений для улучшения водообмена и оздоровления озера Неро. Расчеты выполнялись для периода средней водности, что соответствует расходу реки Сара $3.7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Первое проектное решение [Комплексная экологическая..., 2014] предполагало расчистку дна озера в черте города Ростов и выемку донного грунта. При выполнении расчетов исходные глубины были скорректированы согласно схеме на Рисунке 4.24. На северо-западном участке акватории, ограниченном зеленой линией, глубины были увеличены на 0.5 м. На Рисунке 4.25 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.

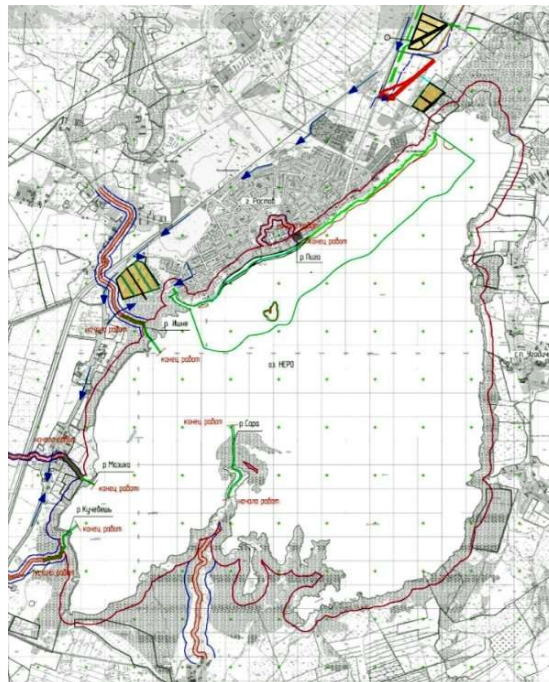


Рисунок 4.24— Схема озера Неро с обозначенным участком дноуглубительных работ (зеленая линия в черте г. Ростов)

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.

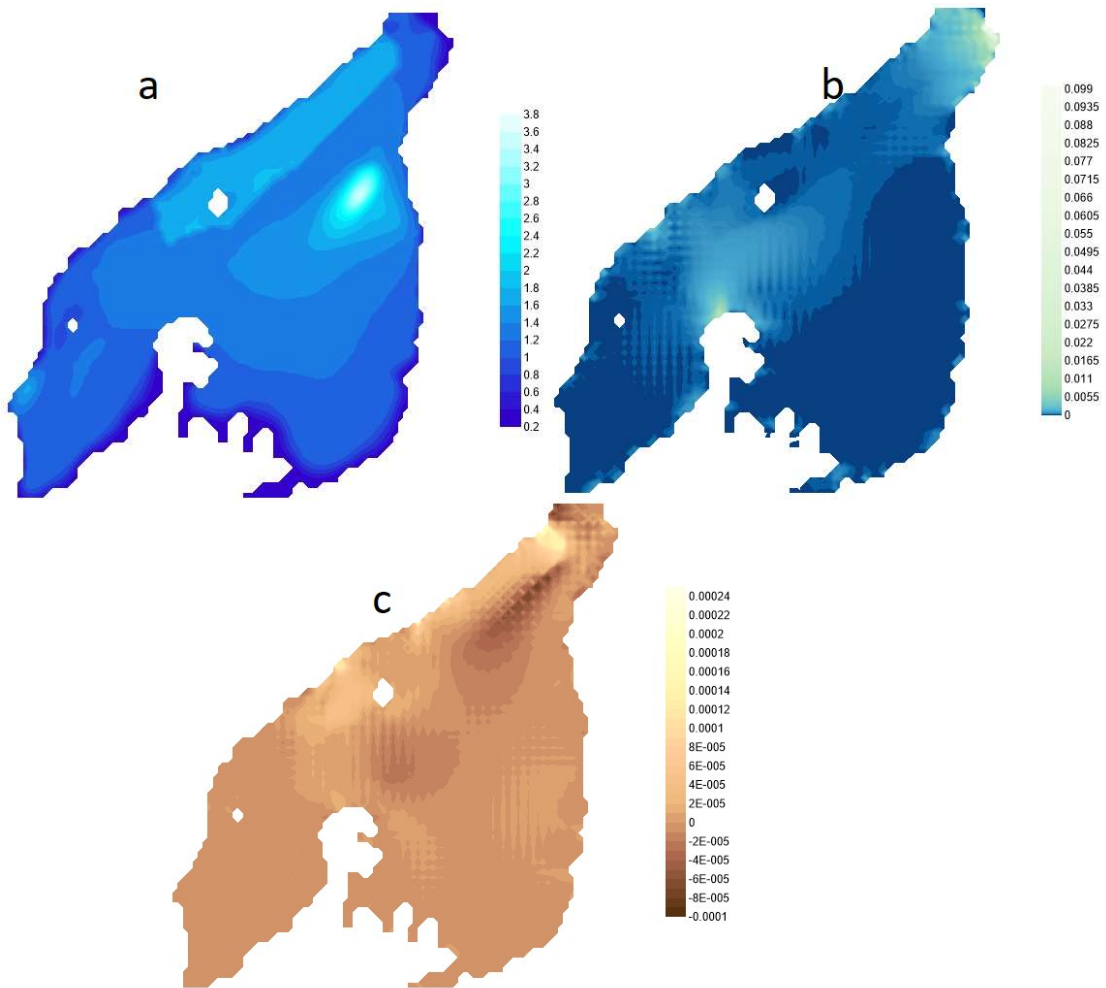


Рисунок 4.25 – Карта глубин озера Неро для численного эксперимента, м (а); распределение скоростей течения в акватории озера Неро, м/с (b); распределение разности расходов наносов ($G_{ч.з.} - G$), кг/с (с)

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 4.26 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 4.26. Уменьшение скорости определит и незначительное уменьшение значения расхода наносов (Рисунок 4.26) на несколько грамм в секунду.

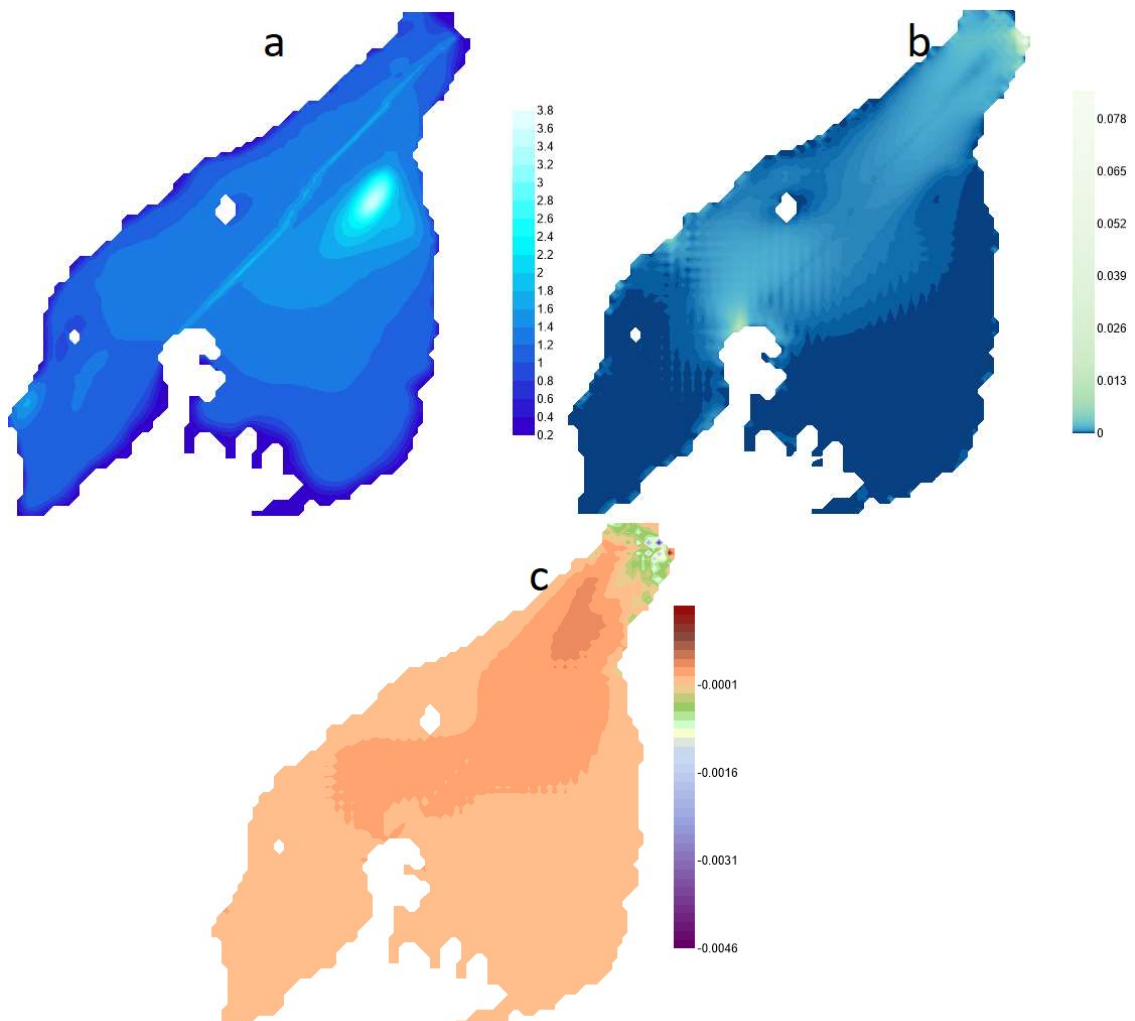


Рисунок 4.26 – Карта глубин озера Неро для численного эксперимента, м (а); распределение скоростей течения в акватории озера Неро, м/с (b); распределение разности расходов наносов ($G_{ч.э.} - G$), кг/с (с)

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

Актуальность задачи. Заиление водохранилища – это потеря объёма воды за счёт роста абсолютных отметок дна. В условиях подпора реки плотиной и образования водохранилища скорость течения уменьшается, соответственно уменьшается и транспортирующий потенциал потока. Последнее приводит к постепенному осаждению транспортирующего твёрдого вещества. Таким образом происходит заиление водохранилища речными наносами. Это влечет за собой занесение его мертвого объёма, обмеление, зарастание высшей водной растительностью, и, как следствие, утрачивается регулирующее значение водохранилища [Водохранилища мира, 1979].

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 приводят 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 оказывает негативное воздействие на экосистему водного объекта, «как его гидрологические, гидрохимические характеристики, так и биологические компоненты, включая состояние кормовой базы рыб, условия их нереста и в конечном итоге состояние всего рыбного стада» [Кондратьева и др., 2012], а также осложняет систему водопользования. Как было отмечено в Главе 3

п. 3.4, транспортирующая способность потока или его максимальная взвесенесущая 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 позволяют оценить области акватории с наиболее неблагоприятными значениями мутности воды, что может стать основой для последующих рекомендаций по мероприятиям, связанным с дноуглубительными работами.

При всей актуальности мониторинга мутности воды и процессов переформирования дна водохранилищ, натурные наблюдения на крупных водохранилищах часто крайне затруднены и дорогостоящи. В этом случае может быть полезно численное моделирование гидродинамических внутриводоемных процессов, которое описывает двухфазный массоперенос в акватории. Настоящее исследование проводилось в рамках приоритетного проекта "Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги" (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол от 30.08.2017 N 9) по теме 3.4. «Разработка Концепции по снижению поступления загрязняющих веществ с естественных ландшафтов, селитебных территорий, земель сельскохозяйственного значения, промышленных площадок предприятий, предприятий животноводческого комплекса, полигонов захоронений и свалок, объектов транспортной инфраструктуры».

Объект моделирования. Куйбышевское водохранилище расположено в центральной части Среднего Поволжья на рубеже лесостепной провинции Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья. Водоохранилище имеет меридианную направленность и в верхнем течении по Волжской ветке сопряжено с Чебоксарским водохранилищем, по Камской ветке с Нижнекамским, а в нижнем течении – с Саратовским. Куйбышевское водохранилище осуществляет сезонное,

недельное и суточное регулирование стока Волги, являясь основным регулятором сезонного стока для Средней и Нижней Волги [45].

Водохранилище имеет высокую водохозяйственную нагрузку – энергетика (Жигулёвская ГЭС), водный транспорт, сельскохозяйственная ирригация, рыбоводство, бытовое и промышленное водоснабжение, рекреация, сбросы сточных вод [45].

Куйбышевское водохранилище является самым крупным в Волжском каскаде. Оно образовано путем перекрытия течения р. Волга осенью 1955 г. в 6 км ниже г. Тольятти. Заполнение водохранилища проходило в три этапа. В 1957 г. уровень воды достиг проектной отметки 53.0 м БС. После сооружения Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС площадь водного зеркала водохранилища составила 5900 км², а его общая емкость при нормальном подпорном уровне (НПУ) – 58.0 км³. Общая длина по затопленному руслу р. Волга составляет 510 км, наибольшая ширина – 27 км. Средняя глубина водохранилища при НПУ – 9 м [Гидрометеорологический режим..., 1978; Лукин, 1961]. Основное питание Куйбышевского водохранилища осуществляется с вышележащих Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ. Длина Куйбышевского водохранилища составляет 510 км, наибольшая ширина около 40 км, площадь водного зеркала 6450 км² и полный объём воды 58 км³. На всем протяжении Куйбышевского водохранилища образован ряд озеровидных плесовых расширений и резких сужений. В настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран приплотинный плес, который является самым глубоководным районом водохранилища со значительным объемом воды. В отличие от других плесов, он вытянут с востока на запад и имеет небольшую длину – 30 км. Максимальные глубины в плессе достигают 40 м. Затопленное русло р. Волга от плотины Жигулевской ГЭС сначала проходит вдоль правого берега, а затем поворачивает к центру района. Далее, в западной части плеса у с. Климовка, русло Волги вновь прижимается к правому берегу, создавая в подводном рельефе плеса понижение. Вдоль левого берега приплотинного участка имеется небольшое по площади мелководье, которое образовалось в результате

заполнения водохранилища. На южной стороне плеса расположен большой залив, образовавшийся в устье р. Уса.

Результаты фактических наблюдений за режимом эксплуатации Куйбышевского водохранилища показали, что регулирование поступающих водных масс из Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ осуществляется не на пике паводочного периода, а на его подъеме. При спаде половодья регулирования водных запасов в водоеме не проводится. Так, если пик паводка не регулируется полностью водоемом, то даже в низовьях водохранилища можно наблюдать значительную скорость течения воды [Чигиринский, 1962; Широков, 1964]. В результате при таком режиме остается не сброшенным в нижний бьеф значительный объем взвешенных наносов. Таким образом, вследствие использования указанного режима регулирования одной из характерных особенностей Куйбышевского водохранилища являются его сезонное наполнение в весенний период и последующая сработка водных запасов водоема в оставшееся время года (Рисунок 4.27). Следует отметить, что многолетнего регулирования стока в водохранилище не производится. При этом амплитуда годового колебания уровня воды в Куйбышевском водохранилище может достигать 5 – 7 м. Именно эти основные колебания определяют длительное воздействие изменений уровня воды на береговые склоны и ложе водохранилища [Ступишин и др., 1981].

Особенности регулирования стока на Куйбышевском водохранилище определяют динамику водных масс, скоростной режим течений, а также степень насыщения воды взвешенными наносами и, как следствие, интенсивность заиления ложа водохранилища. Наиболее низкая скорость течения в водохранилище отмечается в летне-осенний период года, именно в это время заиление ложа водохранилища происходит наиболее активно. В период весеннего заполнения проточность в водохранилище максимальная, в результате в нем создаются благоприятные условия для переноса мелких и крупных фракций взвешенных наносов. Основная их масса поступает в водохранилище в период его наполнения весной, хотя в некоторые годы максимум наносов был отмечен в более ранний срок – до достижения пика паводочной волны в водоеме. Так, в приплотинном районе в

период весеннего паводка содержание взвешенных наносов в воде составляет не более 50 г/м^3 , а в летние и осенние месяцы – $20 - 25 \text{ г/м}^3$. Зимой насыщенность воды наносами резко снижается и достигает $5 - 10 \text{ г/м}^3$. Этот ход мутности воды резко изменяется во время сильных штормов на водоеме [Ступишин и др., 1981].

Распределение взвешенных наносов по длине и поперечному сечению водохранилища неравномерно. Повышенное содержание наносов наблюдается на подводных склонах берегов, на стрежне потока и поверхностных слоях. Такая динамичность присуща любому сезону и различным условиям режима эксплуатации водохранилища. Ход мутности воды резко изменяется, когда на водоеме возникают сильные штормы. В это время степень насыщения воды значительно увеличивается, превышая в несколько раз полученные средние данные.

После создания водоема бытовая скорость течения воды резко уменьшилась, и основная масса взвешенных наносов выпадала в районах переменного подпора, при этом непосредственно в водохранилище поступали наносы в основном в виде мелких фракций. Среднегодовой расход наносов для р. Волга в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС составляет 46.7 кг/с , а для р. Кама в нижнем бьефе Нижнекамской ГЭС – 64.1 кг/с . Взвешенные наносы, поступающие со стоком малых рек, впадающих в водохранилище, дают дополнительный твердый сток около 39.7 кг/с . Среднегодовой сброс наносов через створ Жигулевской ГЭС составляет 49.2 кг/с , а поступление наносов из-за обрушения берегов – 914 кг/с . Таким образом, количество наносов, задержанных в Куйбышевском водохранилище, равно 32.0 млн. т/год [Динамика ландшафтов..., 1991].

Климат. Климат региона Куйбышевского водохранилища умеренно континентальный, обусловленный континентальными воздушными массами, которые формируются в центре Евразии. При этом, меридиональная расположенность водохранилища определяет заметные отличия режима влажности, радиационного баланса, осадков и глубины промерзания почвы. Описываемая территория характеризуется большой годовой амплитудой температуры воздуха, и, как следствие, морозной снежной зимой и солнечным

жарким летом, разделенными краткими периодами межсезонья. Внутри сезонов также может наблюдаться большая температурная изменчивость – зимние оттепели, весенние и летние заморозки, периодические засухи. Атлантический воздух, иногда достигающий Среднее Поволжье, оказывает смягчающее действие на режим температуры и осадков. При этом, протяженная акватория Куйбышевского водохранилища также оказывает выраженное влияние на режим всех метеорологических величин в несколько километровой прибрежной зоне.

Сумма осадков распределена неравномерно по территории бассейна. Годовые суммы изменяются с севера на юг от 600 мм и более до 20 мм и менее. На одной и той же широте осадки на левобережье Волги несколько меньше по сравнению с правобережными районами бассейна. Орография Жигулевских гор способствует увеличению осадков в течение года.

Территория водосбора Куйбышевского водохранилища относится к зоне достаточного увлажнения – здесь количество осадков превышает испарение. Интенсивность осадков уменьшается по сравнению с теплым периодом, а число дней с осадками – возрастает. Временный снежный покров на водосборе появляется в конце октября, а устойчивый снежный покров образуется к концу ноября.

Экологическое состояние. Как и для большинства водоемов главными причинами интенсивного эвтрофирования Куйбышевского водохранилища являются неконтролируемых стоков и замедленный водообмен в отдельных частях акватории. Источники неконтролируемых стоков биогенных элементов представлены результатами сельскохозяйственной деятельности, неконтролируемые свалки, частный сектор, а также не достаточно очищенные стоки промышленных предприятий.

4.3.1. Моделирование переформирования дна приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища

Расчет заиления приплотинной части Куйбышевского водохранилища основан на совместном решении системы гидродинамических уравнений ”мелкой воды” (разработанной А.В. Рахубой гидродинамической модели водохранилища [Рахуба, 2012; 2015]) и аналитической формулы расхода наносов, приведенных выше. Акватория приплотинной части Куйбышевского водохранилища была разделена на 10268 расчетных узлов прямоугольной сетки с шагом 200 м. Модельный шаг по времени составил 3 с. Вычисления проводились по данным наблюдений за расходом воды в створе плотины Куйбышевского водохранилища в период с 15 апреля по 7 августа 2001 г.

Моделирование было проведено для стационарного режима расчета, который позволил верифицировать параметры гидродинамической модели и аналитической формулы расхода наносов, и для нестационарного режима расчета в период весеннего половодья и частично в летнюю межень. По результатам расчета были выделены основные фазы гидрографа разной продолжительности – подъем половодья (на Рисунке 4.27 – период 1), период высокой воды (период 2), спад половодья (период 3) и межень (период 4). Для этих периодов в каждом узле сетки для каждой расчетной точки были рассчитаны аккумуляция и размыв.

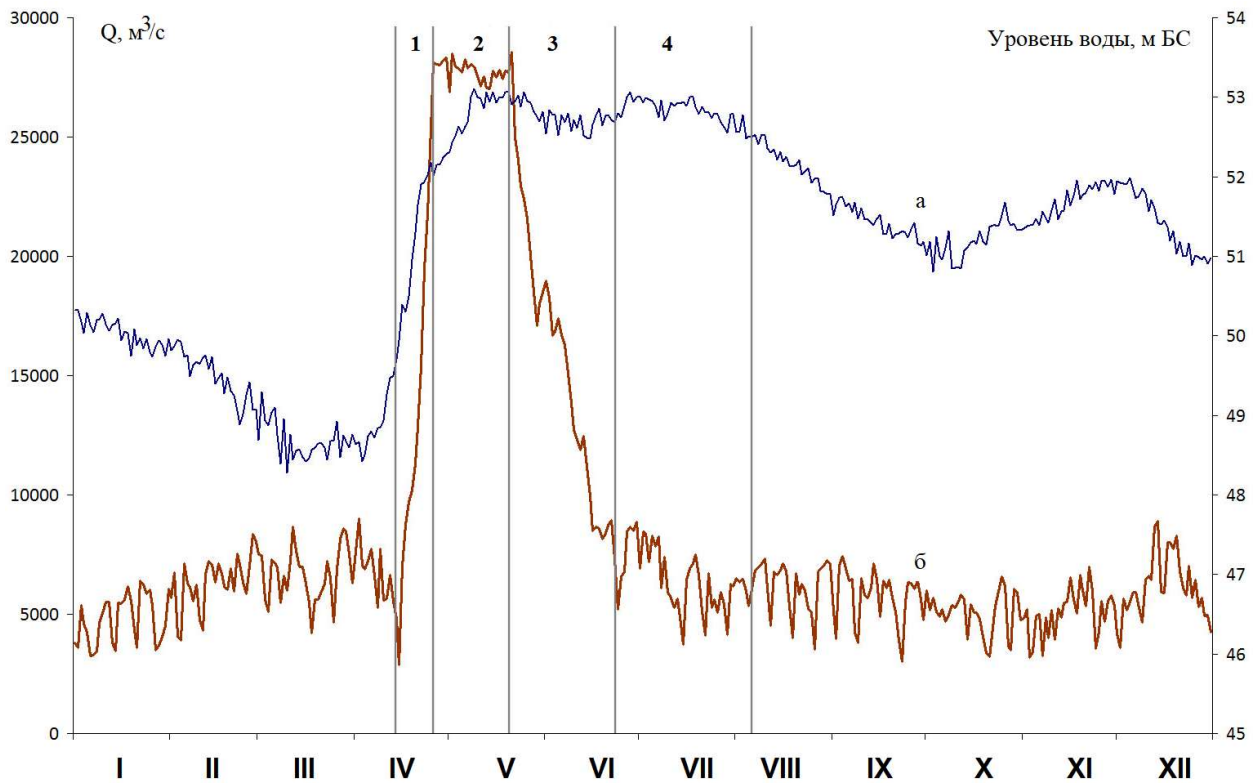


Рисунок 4.27 – Внутригодовой ход расхода (а) и уровня (б) воды р. Волга – створ Жигулевская ГЭС за 2001 г. Здесь и на Рисунке 4.28 вертикальными линиями и цифрами 1 – 4 указаны периоды моделирования

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. Вклад в общий баланс наносов каждой фазы гидрографа проиллюстрирован на Рисунке 4.28, где приведены скорость течения, общий расход наносов и скорость аккумуляции или размыва за рассматриваемый период для расчетной точки, расположенной в мелководной части приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища.

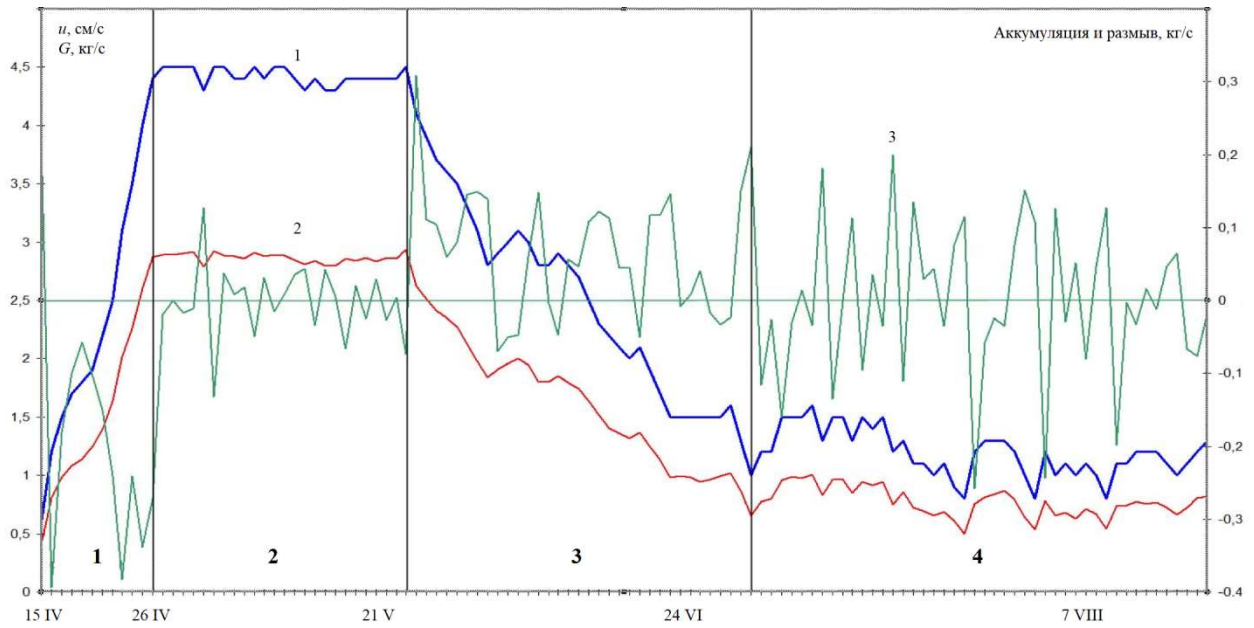


Рисунок 4.28 – Скорость течения u (1), общий расход наносов G (2), скорость аккумуляции ($dG>0$) и размыва ($dG<0$) (3) для расчетной точки, расположенной в мелководной части приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища

Приведенные на Рисунке 4.29 карты размыва и аккумуляции наносов за периоды подъема и спада половодья свидетельствуют о том, что размывающая способность течений достаточно велика. Максимальный размыв приходится на глубоководную зону водохранилища в районе плесового сужения у с. Климовка и его приплотинную зону, и составляет 41.5 кг/с.

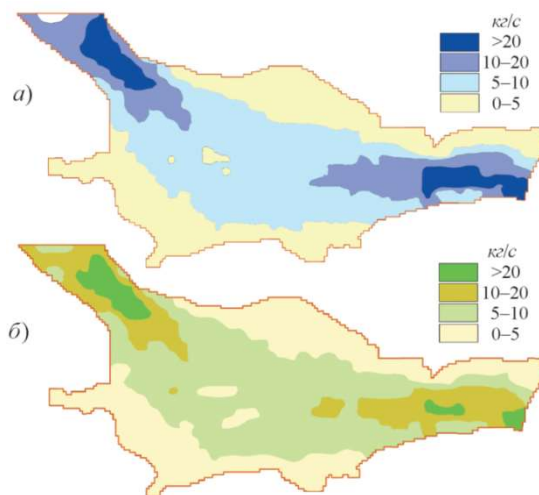


Рисунок 4.29 – Карты размыва (а) и аккумуляции наносов (б) за периоды подъема и спада половодья соответственно

На спаде половодья скорость стокового течения уменьшается, усиливая аккумуляционную способность водохранилища, которая также приходится на глубоководные районы. Максимальная аккумуляция наносов здесь составляет 42.4 кг/с. В мелководных зонах Куйбышевского водохранилища размыв и аккумуляция из-за действия стокового течения незначительны и изменяются в диапазоне от 0 до 0.3 кг/с. Таким образом, результаты модельных расчетов показывают, что неустановившийся режим на Куйбышевском водохранилище приводит к неравномерному распределению донных отложений.

В границах приплотинного плеса можно выделить зоны как преобладающей аккумуляции, так и преимущественного размыва дна. Формирование таких зон связано не столько с особенностями рельефа дна, сколько с гидравлической активностью водных масс. Проведенные расчеты с помощью модели указывают на отсутствие интенсивного накопления речных наносов в районах резких сужений и в районах, непосредственно примыкающих к плотине, что обусловлено значительной зависимостью скорости течения от режима работы ГЭС. Эта особенность водохранилищ описана в ряде работ [Чигиринский, 1962; Широков, 1964].

Данные натурных исследований по осадконакоплению Куйбышевского водохранилища, представленные в работе [Ступишин и др., 1981], подтверждают наличие смыва продуктов заиления в период весенней пульсации скорости стокового течения.

Рассчитанные по формуле (3.8) значения расхода наносов достаточно хорошо согласуются с данными измерений расхода взвешенных наносов в створе плотины Жигулевской ГЭС (г. Тольятти) за 1970 год [Гидрометеорологический режим..., 1978], который по водности близок расчетному 2001 г. В 1970 г. средний расход воды за период половодья (с апреля по июнь) составил 16800 м³/с, средний измеренный расход взвешенных наносов за тот же период – 315 кг/с; в 2001 г. – соответственно 16464 м³/с и 268 кг/с. Таким образом, среднее относительное отклонение между средними рассчитанными измеренными значениями расхода наносов за указанный период равно 15%. Вычисленная средняя скорость заиления

водохранилища речными наносами за рассматриваемый период в одной из расчетных точек на мелководье составила около 2 мм, что также хорошо согласуется с данными наблюдений [Динамика ландшафтов..., 1991; Законнов, 2007; Ступишин и др., 1981]. Установлено [Ступишин и др., 1981], что среднегодовая скорость заиления речными наносами в конце 1962 г. составила 8 мм/год, на период 1980 – 1985 гг. – 4 мм/год, а скорость аккумуляции на начало 2000-х составила от 4.4 до 8 мм/год [Законнов, 2007].

Таким образом, при изучении динамики изменения рельефа дна крупных водохранилищ, кроме особенностей морфологии котловины и характера обрушения берегов, большое значение имеет оценка гидродинамической активности 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.

4.3.2. Расчеты поля максимальной мутности воды в акватории Куйбышевского водохранилища

Расчет поля максимальной мутности воды (максимальной взвесенесущей способности потока, транспортирующей способности потока) всей акватории Куйбышевского водохранилища основан на совместном решении системы гидродинамических уравнений "мелкой воды" (разработанной А.В. Рахубой гидродинамической модели водохранилища [Рахуба, 2012; 2015]) и аналитической формулы транспортирующей способности потока, приведенной выше. Акватория Куйбышевского водохранилища была разделена на 143562 расчетных узла прямоугольной сетки с шагом 200 м. Модельный шаг по времени составил 2 с. Моделирование было проведено для межennaleго расхода при стационарном режиме расчета.

Калибровка параметров аналитической формулы расхода наносов проводилась по данным наблюдений на вертикалях Куйбышевского водохранилища

[Материалы наблюдений..., 1972] для меженного периода среднего по водности 1969 года (Таблица 4.10). Средние относительные отклонения между рассчитанными $S_{рас}$ и наблюдаемыми $S_{набл}$ значениями средних на вертикалях мутности воды составили от 3 % до 75 %.

Таблица 4.10 – Наблюденные и рассчитанные средние по вертикали гидравлические переменные состояния в период летней межени за 1969 г.

| № вер-ли | Пункт | Расход наносов ($G_{расч}$), | Мутность ($S_{изм}$), г/м ³ | Мутность ($S_{расч}$), г/м ³ | Скорость ($v_{изм}$), м/с | Скорость ($v_{расч}$), м/с | Глубина ($h_{расч}$), м |
|----------|-------------|--------------------------------|--|---|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 66 | с. Вязовые | 6.12 | 15.4 | 15 | 0.17 | 0.254 | 7.93 |
| 50 | г. Тетюши | 1.58 | 11.7 | 13 | 0.06 | 0.036 | 16.92 |
| 63 | с. Ундоры | 0.61 | 14.7 | 14 | 0.08 | 0.022 | 9.87 |
| 5 | с. Климовка | 2.63 | 21.0 | 12 | 0.10 | 0.029 | 37.81 |
| 1 | г. Тольятти | 5.15 | 9.02 | 12 | 0.16 | 0.054 | 39.77 |

На Рисунке 4.30. приведена карта распространения максимальной мутности воды в акватории всего Куйбышевского водохранилища. Как видно из Рисунка 4.30 наибольшие значения мутности приходятся на области наименьших глубин в северной части водохранилища (по его камской ветке) и в южной части в месте подпора реки Б. Черемшан и превышают 300 г/м³. Наименьшие значения мутности приходятся на глубоководную южную часть водохранилища и его центральную часть, приплотинный плес и составляют 100 – 200 г/м³.

Приведенная на Рисунке 4.30 карта представляет собой количественную оценку максимальной мутности воды в меженный период и может быть полезна при планировании различных гидротехнических мероприятий в акватории водохранилища и учете негативных последствий, связанных с высоким содержанием взвешенных веществ в водной массе.

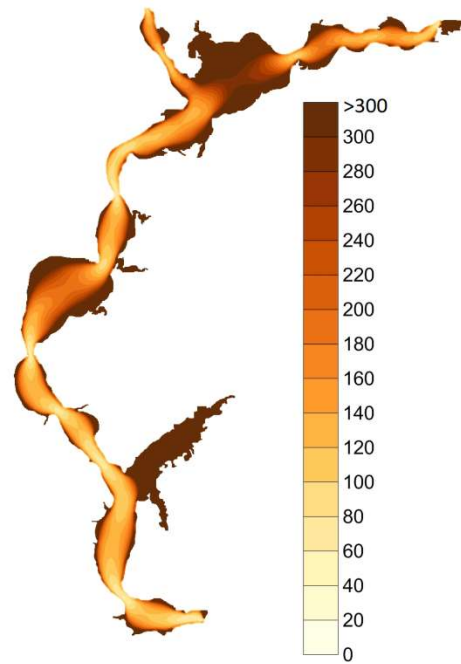


Рисунок 4.30 – Карта распространения максимальной мутности воды в акватории Куйбышевского водохранилища, г/м³

Выводы по главе

Интенсивность переформирования дна речными наносами и режим стока речных наносов в акватории Сестрорецкого Разлива были рассчитаны по разработанной 2D модели гидродинамики и транспорта наносов в водоеме. Как в настоящее время, так и при условии реализации рассмотренных климатических сценариев, поступление речных наносов в Сестрорецкий Разлив, а также соответствующие изменения отметок дна, составляют доли мм в год. То есть интенсивность заиления водохранилища именно речными наносами незначительна. Результаты проведенного математического моделирования стока и транспорта наносов реками Сестра и Черная показали, что за год в Сестрорецкий Разлив поступает 3180 т речных наносов, около 60% из которых аккумулируются в водоеме. Рассчитанное значение полного занесения Разлива речными наносами составило 2930 лет. Особенности морфометрии Сестрорецкого Разлива, а также расположение притоков и стока относительно друг друга способствуют неравномерному распределению поступивших речных наносов по акватории. Это

отражается как на значениях расходов наносов, так и интенсивности переформирования дна водохранилища. Относительно активная циркуляция водных масс в северной части Разлива происходит за счет впадающих речных потоков. Однако даже в этой части акватории скорости течения в межень достигают всего нескольких сантиметров в секунду, тогда как в центральной и южной частях Разлива скорости течения на порядок меньше. Расходы наносов в северной части акватории в период межени составляют лишь несколько грамм в секунду, тогда как в половодье с увеличением скорости течения могут достигать нескольких десятых долей килограмма в секунду. Интенсивность процессов переформирования дна речными наносами также неодинакова в течение года. В меженный период происходит незначительный размыв (в пределах 0 – 1.5 мм за декаду) в южной части водохранилища. Однако наибольшие скорости размыва дна акватории приходятся на период подъема половодья. Максимальные значения размыва в этот период для среднего по водности года достигают 2 – 5 мм за декаду. Интенсивный процесс аккумуляции речных наносов приходится на период спада половодья, когда скорости течения начинают падать, транспортирующий потенциал потока уменьшается, что приводит к осаждению наносов. Максимальные значения намыва в этот период составляют 6 – 9 мм за декаду. Интенсивность намыва дна речными наносами в северной части акватории составляет \approx 3-4 миллиметра в год. Однако, в среднем по водохранилищу, эта величина на порядок меньше.

По-видимому, одной из главных экологических проблем данного водоема является высокая скорость органического осадконакопления. Возможными причинами этого является, прежде всего, неорганизованный сброс неочищенных сточных вод. Помимо поступления взвешенных частиц со стоком притоков, замедленный водообмен Сестрорецкого Разлива, его мелководность и наличие застойных зон приводят к накоплению загрязняющих веществ в акватории водохранилищ.

С использованием 2D модели гидродинамики и транспорта наносов в водоеме, адаптированной к условиям озера Неро, проведены численные

эксперименты с целью оценки возможных последствий реализации двух проектных решений, имеющих целью улучшение водообмена и оздоровления озера Неро. Согласно первому решению 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. Т.е. никакого положительного эффекта настоящее действие не принесет. Второе проектное предложение должно было быть направлено 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 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).

Впервые для приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища на основе модели «Волна», разработанной Рахубой А.В. и интегрированных в нее аналитической формулы расхода наносов и транспортирующей способности потока были получены поля отложения наносов и размыва дна при нестационарном режиме расчета для разных фаз гидрологического режима. Сделаны выводы о том, что нестационарный режим способствует неравномерному переотложению наносов в акватории водохранилища, а также о том, что наиболее интенсивно процессы переформирования дна протекают в местах руслового сужения. Последнее объясняется резким изменением пропускной способности русла.

Впервые получена карта распространения максимальной мутности воды Куйбышевского водохранилища, построенная при гипотетической инициации процессов взмучивания донного грунта в акватории. Особенную ценность этот

результат представляет для межлунного периода, характеризующегося наименьшей глубиной потока, а значит наибольшими значениями мутности. Полученный план распространения максимальной мутности позволит оценить области акватории с наиболее неблагоприятными гидродинамическими условиями, что может стать основой для последующих рекомендаций по мероприятиям, связанным с дноуглубительными работами.

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»

Актуальность задачи. Математическая модель движения воды и твердого вещества легла 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]. В качестве возможного источника загрязнения рассматривалась река Ижора (левобережный приток Невы) при гипотетической аварийной ситуации на полигоне захоронения токсичных отходов «Красный Бор», расположенном на территории водосбора реки Ижоры. Полигон обезвреживания и захоронения токсичных отходов «Красный Бор» 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 – одного из крупных левобережных притоков Невы. В настоящее время на полигоне находится более 1.8 млн. тонн ядовитых отходов, а 12 тыс. тонн дополнительно поступает ежегодно [Румянцев и др., 2010]. Специалисты Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) в 2007 – 2008 гг. провели детальное исследование возможностей возникновения аварийной ситуации на полигоне и количественно оценили возможные сбросы загрязняющих веществ с территории полигона в гидрографическую сеть водосбора. Ими выявлено, что наихудшим сценарием аварийного сброса является одновременный сброс загрязняющих веществ с карт 64 и 68 в течение 50 часов с расходом $0.08 \text{ м}^3/\text{с}$ [Румянцев и др., 2010]. Прежде чем попасть в р. Нева, загрязняющие вещества с полигона проходят обводной канал, магистральный канал, ручей между магистральным каналом и рекой Большая Ижорка, Малую Ижору и, наконец,

Ижору до впадения в р. Нева. В расчетах учитывалось разбавление примеси на этом участке. Работы выполнялись в рамках Дополнительного соглашения № 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».

Объект моделирования. Река Нева — протока между Ладожским озером и Финским заливом длиной 74 км. Она берет начало в Шлиссельбургской губе Ладожского озера и впадает в Невскую губу Финского залива, образуя обширную дельту, на которой расположен город Санкт-Петербург. Нева – широкая, глубокая, полноводная, малоизвилистая река. По стоку она занимает пятое место среди рек Европейской части России после Волги, Печоры, Камы и Северной Двины (Нежиховский, 1981, 1985). В среднем сток р. Невы составляет 2500 м³/с. Отличительной ее особенностью является обильное и равномерное водное питание в течение всего года с высокой степенью зарегулированности, а также сложный уровневый режим, не характерный для равнинных рек северо-запада России. Р. Нева протекает по дну Приневской низменности, представляющей собой плоскую заболоченную равнину, постепенно понижающуюся от Ладожского озера к Финскому заливу. Преобладающая ширина реки 400 – 600 м. Р. Нева – источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга, поэтому вопросы формирования качества воды в ней являются жизненно важными для всего города [Кондратьев и др., 2006; Румянцев, 2012].

Климат. Бассейн реки Нева расположен в умеренных широтах, характеризуется мягким морским климатом и избыточным увлажнением. Средняя годовая сумма осадков составляет 755 мм. Наиболее высокими температурами в течение года характеризуется июль (среднемесячная температура воздуха составляет +18.0°С), холодными – февраль (среднемесячная температура воздуха – 8.0 °С). Изменение температуры воздуха в течение суток, которое определяется сменой воздушных масс) может достигать 20°С [Схема комплексного использования..., 2010]. Для устьевой области Невы свойственно преобладание ветров юго-западного, западного и северо-западного румбов, достигающие

скорости 50 м/с и вызывающие нагонные явления в русле [Схема комплексного использования..., 2010].

Экологическое состояние. Экологическое состояние невских вод признано неудовлетворительным [Схема комплексного использования..., 2010]. В нижнем течении в пределах Санкт-Петербурга в Неву поступают промышленные стоки десятков предприятий, также Нева является транзитным путем транспортировки нефтепродуктов. При этом невская вода используется для промышленного и питьевого водоснабжения. Строительство дамбы, призванной защищать Санкт-Петербург от нагонных вод, привело к ухудшению водообмена. Это, в свою очередь спровоцировало увеличение содержания биогенных элементов в Невской губе и, как следствие, постепенное заболачивание мелководных участков Финского залива между Санкт-Петербургом и дамбой.

Расчеты. На основе численной реализации уравнений (2.1) – (2.4) были проведены расчеты гидравлических переменных состояния речного потока для 60-километрового участка реки Нева (от крепости Орешек до Большеохтинского моста) [Шмакова, 2012 а]. Всего на этом участке было намечено 24 гидрометрических створа, в которых через 10 метров были проведены промеры глубин. Данные о расходе воды были получены по кривой $Q=f(H)$ для створа реки Нева – д. Новосаратовка на время проведения гидрометрических работ. Глубина для начальных и граничных условий в расчетных створах вычислялась интерполяцией между двумя соседними гидрометрическими створами, на которых проводились измерения. Аналогично была получена и площадь поперечного сечения, необходимая для расчета скорости воды при задании начальных и граничных условий.

Для реки Невы (Рисунок 5.1) принимался средний по величине (0.33 мм) размер русловых фракций (0.33 мм). Размер ячеек криволинейной расчетной сетки составил: по продольной ординате – 200 м, по ширине – около 33 м, глубине – около 2 м, шаг по времени – 2 с. Примерно через 300 расчетных шагов по времени модель вышла на стационарный режим расчета.

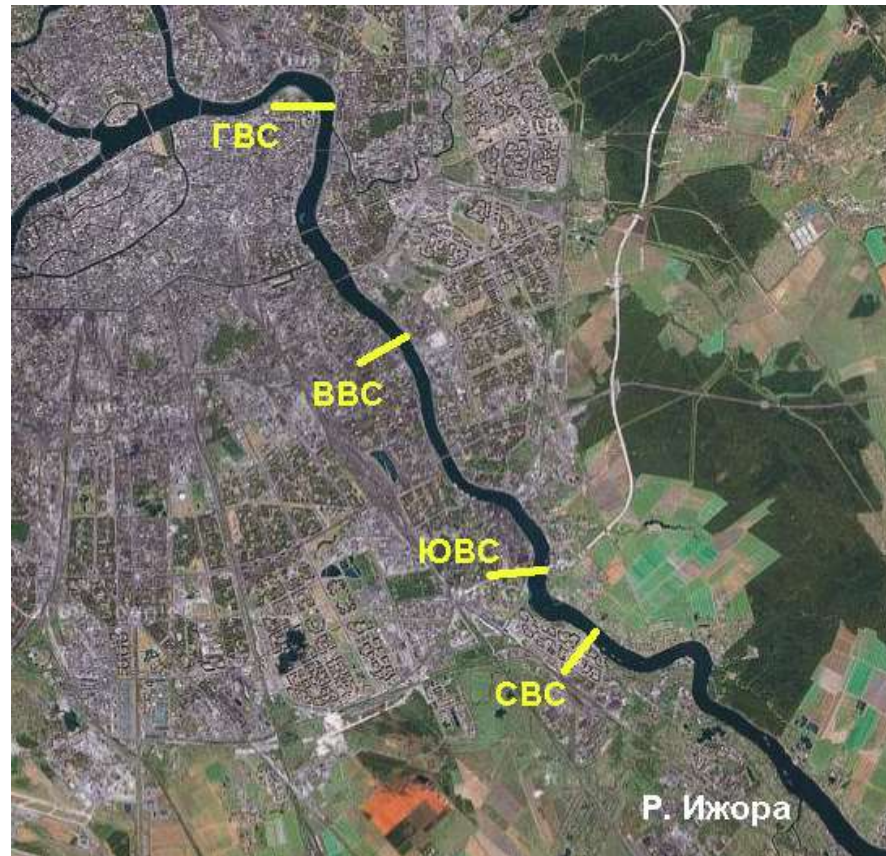


Рисунок 5.1 – Расчетная область течения р. Неве от места от впадения р. Ижоры до дельты (СВС – Северная водопроводная станция, ЮВС – Южная водопроводная станция, ВВС – Волковская водопроводная станция, ГВС – Главная водопроводная станция)

На Рисунке 5.2 приведены измеренные и рассчитанные по модели средние по сечению значения скорости течения в русле и глубины потока в условиях неравномерного установившегося движения потока. Как видно из приведенных графических результатов расчета, модель адекватно описывает гидродинамическую ситуацию на расчетном участке реки в условиях неравномерного установившегося движения потока. Критерий Нэша-Сатклиффа NSE составил 92 %.

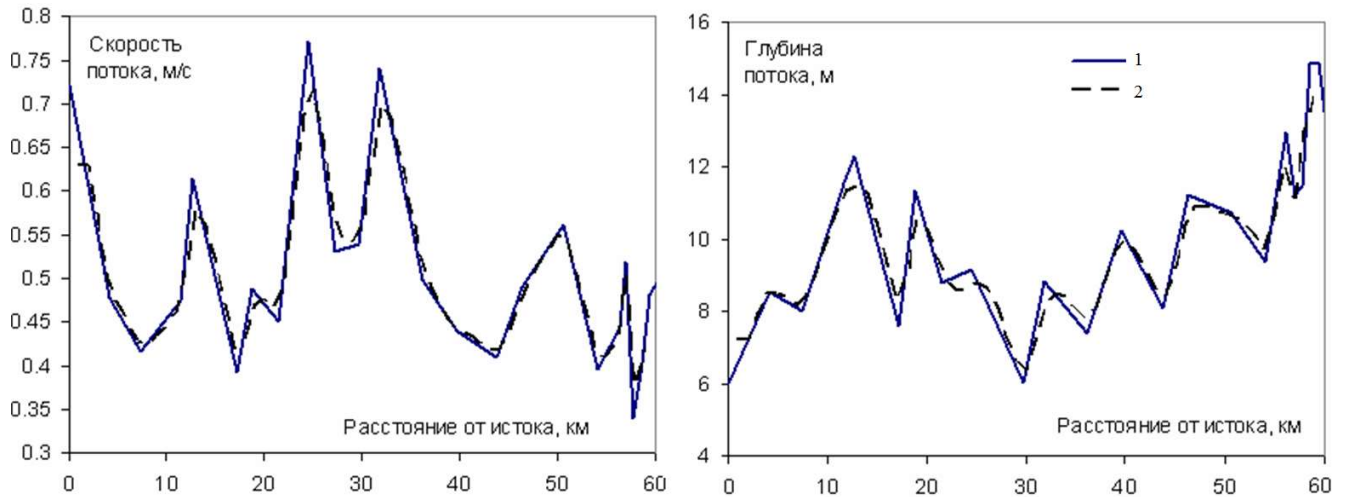


Рисунок 5.2 – Измеренные (1) и рассчитанные по модели (2) (осредненные по сечению в расчетном створе) значения глубины H и скорости v руслового потока

Расчеты распространения твердых частиц–адсорбентов, транспортирующих токсичные вещества и переноса примеси в реке Нева выполнялись при среднем многолетнем значении расхода воды ($2500 \text{ м}^3/\text{с}$), а также при его экстремальных значениях $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ и $4000 \text{ м}^3/\text{с}$. 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. Рисунок 5.3 иллюстрирует изменение концентрации примеси по ширине реки в одном из водозаборных створов ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

В Таблице 5.1 представлены рассчитанные значения максимальных по сечению ($C'_{\text{макс}}$) концентраций консервативной примеси в створах расположения основных водозаборов, имеющих место у левого берега р. Нева. Приведенные данные также подтверждают вывод о возрастании перемешивания и снижении концентраций примеси при увеличении расходов воды в русле. 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.

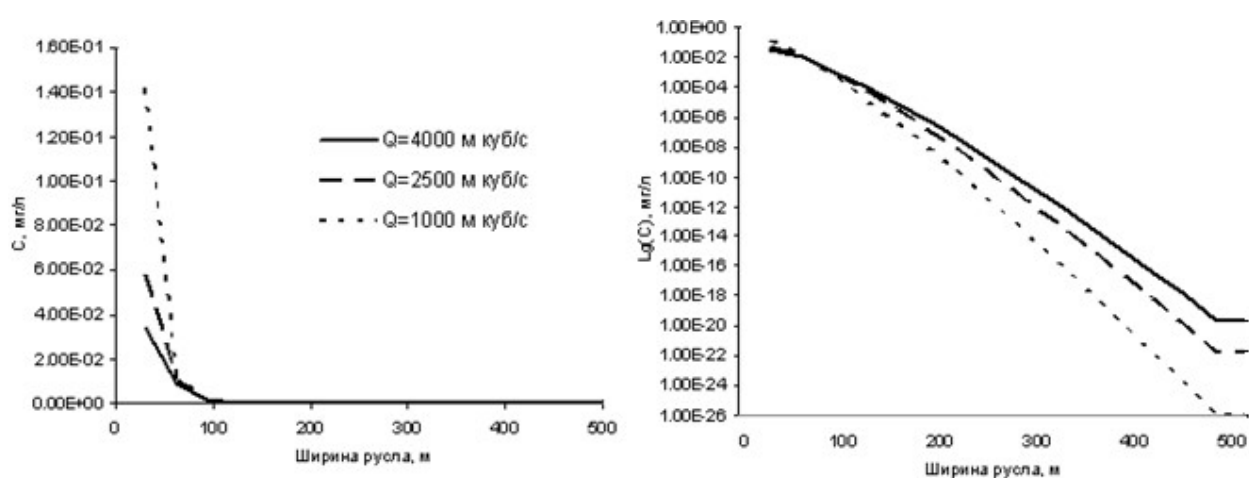


Рисунок 5.3 – Изменение концентрации примеси по ширине русла Невы при различных расходах воды, представленное в обычной (1) и логарифмической (2) шкалах

Таблица 5.1 – Рассчитанные значения максимальных концентраций консервативной примеси (C_{\max} , мг/л) в створах расположения водозаборов ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» через 5 часов после поступления загрязненных вод из реки Ижоры

| № створа | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Наименование створа | СВС | ЮВС | ВВС | ГВС |
| Расстояние от впадения р. Ижоры, км | 7 | 10 | 18 | 26 |
| $Q=4000 \text{ м}^3/\text{с}$ | | | | |
| C_{\max} | 3.37E-02 | 7.50E-03 | 6.84E-11 | 6.38E-15 |
| $Q=2500 \text{ м}^3/\text{с}$ | | | | |

| | | | | |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| $C_{\text{макс}}$ | 5.71E-02 | 1.34E-02 | 1.26E-10 | 1.19E-14 |
| $Q=1000 \text{ м}^3/\text{с}$ | | | | |
| $C_{\text{макс}}$ | 1.42E-01 | 3.52E-02 | 3.40E-10 | 3.31E-14 |

Нетрудно видеть, что с увеличением расхода воды увеличивается зона распространения примеси по ширине реки Нева за счет возрастания коэффициента диффузии. В то же время снижаются максимальные значения содержания примеси у левого берега. Согласно выполненным расчетам наибольшие концентрации примеси имеют место при минимальных расходах воды у левого берега.

5.2. Моделирование мутности воды реки Нарва

Актуальность исследования. 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, для производства питьевой воды и производства гидроэнергии. В 1990-х годах удельный вес Нарвы в потреблении воды в Эстонии был наибольшим – 30 процентов, из которых, в свою очередь, 92 процента использовала Балтийская теплоэлектростанция. В 2007 году АО “Нарвские электростанции” (Narva Elektriijaamade AS) забрало из реки полтора миллиарда кубометров воды. В 2009 году годовое потребление воды теплоэлектростанциями снизилось до миллиарда кубометров [Река Нарва..., 2010].

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 достоверной информацией о характеристиках стока и мутности, необходимой 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.

Описание объекта моделирования. Река Нарва – трансграничный водоток, вытекает из Чудского озера и впадает в Финский залив. Длина реки составляет 77 км, площадь водосбора 56 200 км² (на территории РФ 39000 км², остальное – территория Эстонии). Средний уклон реки – 0.39 ‰. Река по полноводности занимает второе место среди рек, впадающих в Финский залив. Река очень порожистая, дважды прорезает известняки. В 1955 – 1956 гг. на участке 18.2 – 61.0-й км на нижнем течении р. Нарвы было создано Нарвское водохранилище.

Таким образом, сток р. Нарвы зарегулирован в верхнем течении Чудско-Псковским озером, в нижнем – Нарвским водохранилищем, устьевой участок реки находится под влиянием Финского залива. Начало реки находится около г. Васкнарва (Эстония) – левый берег и д. Скамья (Россия) – правый берег.

Водосборная площадь Нарвы представляет собой слабоволнистую местами заболоченную равнину, частично залесенную. Заболоченность водосбора реки Нарвы составляет 35 %, лесистость 20 %, озёрность 8 %. Верховья реки характеризуются возвышенностями, достигающими 200 – 300 м над уровнем моря.

Русло верхнего течения реки Нарва имеет ширину около 150 метров. Коренные берега, представленные сланцами и известниками, поднимаются на 5 – 10 м. Средняя глубина реки около 4 метров, на плессах глубина может достигать 10 – 11 метров. Средний среднегодовой расход воды в устье равен 399 м³/с. Питание водотока смешанное, с преобладанием снегового.

Ввиду большой озерной зарегулированности внутригодовое распределение стока воды реки Нарва достаточно равномерное. На период весеннего половодья приходится около 36 %, на период зимней межени – 26 %, на летне-осенний период – 38 % от годового стока. Весеннее половодье приходится на период 2.04 – 9.07, ледовые явления начинаются в середине осени. При этом ледостав регистрируется в течение декабря, а вскрытие реки может приходиться на начало апреля.

Пост р. Нарва – д. Скамья расположен в 0.55 км ниже истока р. Нарвы из Чудского озера. Прилегающая к посту местность представляет собой низменную равнину, местами заболоченную, занятую у реки под луга и огороды, далее – лесом. Русло реки прямолинейное, песчано-гравелистое.

Климат. Водосбор реки Нарва расположен в умеренном климатическом поясе, в зоне избыточного увлажнения. Климат на водосборе значительно смягчен относительной близостью Атлантического океана. Для этой территории характерно влажное, умеренно теплое лето и сравнительно мягкая зима. Годовой слой осадков составляет в среднем около 700 – 750 мм. Средний годовой слой испарения меньше годового слоя осадков, что определяет густоту гидрографической сети. Среднегодовые температуры самого холодного (января) и самого теплого (июля) месяцев в году составляют -4.0°C и $+19.1^{\circ}\text{C}$ соответственно. Запасы воды в снежном покрове на возвышенностях 80–100 мм, в равнинной части бассейна – 70–90 мм, на побережье моря – 50–70 мм [Схема комплексного использования..., 2014]. Выделяют положительный многолетний тренд среднегодовых значений температуры воздуха и слоя осадков – за почти 130-летний период наблюдений увеличение температуры воздуха на 1°C и слоя осадков на 200 мм. Наибольшее увеличение температуры воздуха приходится на период с января по апрель, а рост слоя осадков – на период с января по август [Схема комплексного использования..., 2014].

Экологическое состояние. Река используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения, судоходства и выработки электроэнергии (ГЭС Нарва). Активное водопользование, появление плотины на реке Нарва незначительно повлияло на текущее экологическое состояние водотока. Благодаря хорошему состоянию реки она используется как источник питьевой воды, в первую очередь для обеспечения потребностей 70-тысячного населения города Нарва. Водозаборы расположены выше по течению от Нарвского водохранилища.

Описание реки Нарва и гидропоста позаимствовано из [Bobrovitskaya, Kokorev, 2003; 2004]. 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. Нелле Николаевне Бобровицкой за любезно предоставленные данные.

Результаты моделирования. 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.

Далее, поле точек $h=f(Q)$ за многолетний период было аппроксимировано аналитической функцией (Рисунок 5.4). По причине того, что сток наносов на расчетном участке реки Нарва преимущественно взвешенный [Bobrovitskaya, Kokorev, 2003; 2004], то для расчетов подходит аналитическая формула расхода наносов. Ввиду зарегулированности стока реки Нарва и малой амплитуды уровня воды, параметры подбирались для всех периодов водности совместно, минимизацией расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями мутности воды. Среднее относительное отклонение между последними составило 66%. В результате оптимизации параметры аналитической формулы равны $f=0.97$ и $c=0.29$.

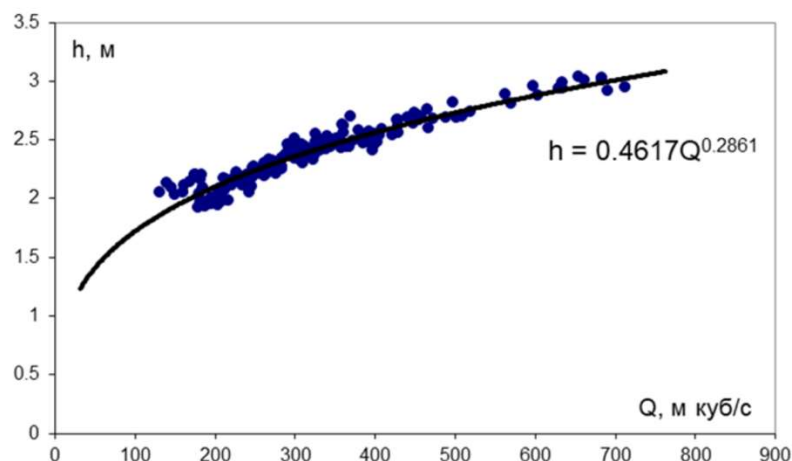


Рисунок 5.4 – Зависимость $h=f(Q)$, р. Нарва – д. Скамья

Следующий этап расчетов состоял в генерировании ряда суточных расходов воды длиной 36500 значений (100 лет) заданного закона распределения и для каждого значения расхода воды были рассчитаны средняя глубина потока и мутность воды.

Результаты моделирования суточных значений расхода и мутности воды приведены в Таблице 5.2, где представлены параметры распределения наблюдаемых и моделированных рядов суточных расходов воды и мутности. На Рисунках 5.5 и 5.6 приведены эмпирические кривые распределения наблюдаемых и моделированных суточных значений расхода воды и мутности. 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.

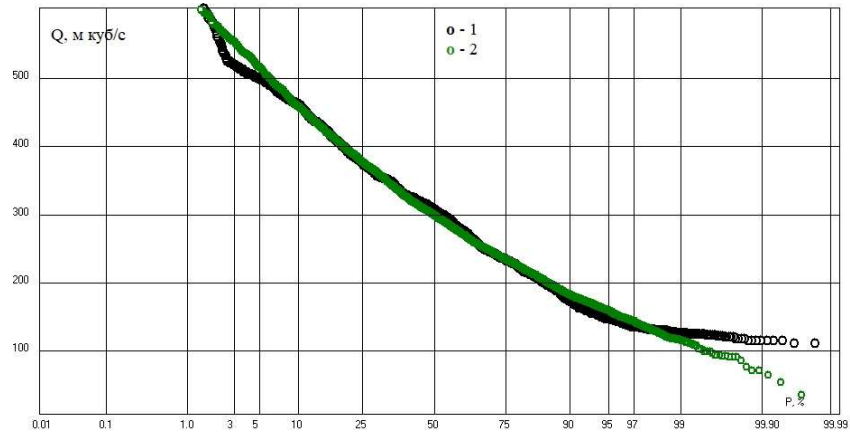


Рисунок 5.5 – Эмпирические кривые распределения наблюдаемых (1) и сгенерированных (2) суточных значений расхода воды, м³/с

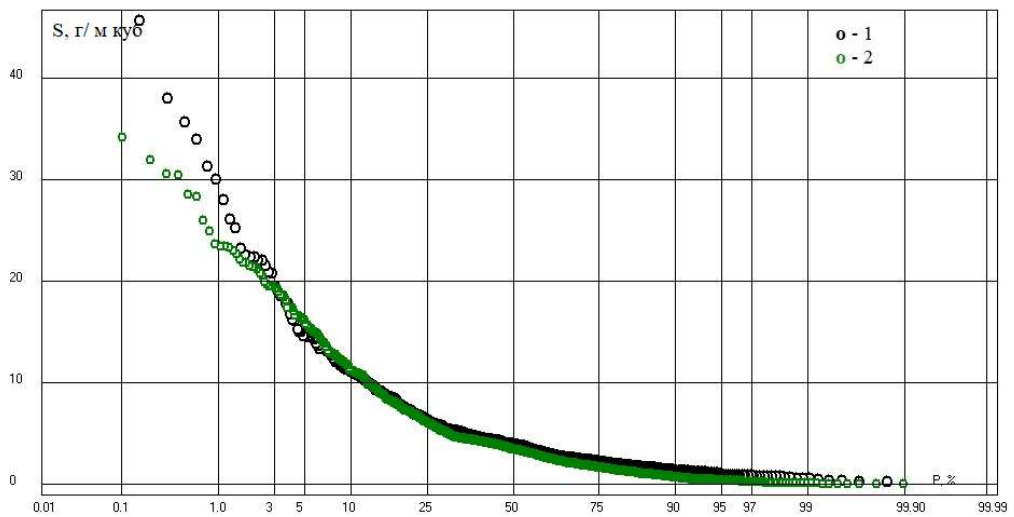


Рисунок 5.6 – Эмпирические кривые распределения наблюдаемых (1) и сгенерированных (2) суточных значений мутности воды, г/м³

Таблица 5.2 – Параметры распределения наблюдаемых и сгенерированных рядов расхода воды и мутности ($X_{\text{ср}}$ – среднее; M – медиана; C_v – коэффициент вариации; $X_{25\%}$ и $X_{75\%}$ – квантили вероятностью 25 % и 75 %)

| | $X_{\text{ср}}$ | C_v | M | $X_{25\%}$ | $X_{75\%}$ | $X_{25\%}-X_{75\%}$ |
|---|-----------------|-------|-----|------------|------------|---------------------|
| Расход воды наблюдаемый, м ³ /с | 312 | 0.35 | 308 | 376 | 234 | 142 |
| Расход воды | 312 | 0.35 | 301 | 378 | 233 | 145 |

| | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|
| смоделированный, м ³ /с | | | | | | |
| Мутность воды наблюденная, г/м ³ | 5.33 | 0.99 | 3.90 | 6.24 | 2.14 | 4.10 |
| Мутность воды смоделированная, г/м ³ | 4.89 | 1.04 | 3.43 | 6.03 | 1.62 | 4.40 |

Проверка соответствия средних значений по критерию Стьюдента и дисперсий по критерию Фишера показала, что при полученных значениях статистик $t=2.14$ и $f=1.08$ гипотезы о равенстве этих параметров распределения при уровне значимости $2\alpha=2\%$ для среднего значения и при уровне значимости $\alpha=10\%$ для дисперсии подтверждаются.

Таким образом, практическая реализация модели годового твердого стока на примере реки Нарва показала хорошее соответствие между параметрами распределения наблюдаемых и рассчитанных рядов суточных значений мутности воды.

ДС моделирование мутности воды реки Нарва

Ввиду большой водохозяйственной востребованности реки Нарва, будет актуально оценить в режиме численного эксперимента параметры мутности в условиях возможного изменения климата. В качестве климатического сценария был принят сценарий ЕСНАМА2, описание которого было приведено в Главе 4.

Моделирование стока предварил оценка параметров распределения суточных значений температуры воздуха и слоев осадков для метеостанции г. Псков для периода с 1980 по 2010 гг. Далее параметры распределения этих рядов были откорректированы с учетом климатического прогноза и 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. В Таблице 5.3 приведены параметры распределения суточных расходов воды и мутности воды,

рассчитанных соответственно по модели формирования стока и модели годового твердого стока. Согласно полученным результатам, изменение климата приведет к уменьшению стока и увеличению мутности воды.

Тенденция увеличения мутности с уменьшением расхода воды выражена для данных наблюдений в расчетном створе и расчетно обеспечивается обратной связью мутности воды и средней глубины потока (Рисунок 5.7). При численной реализации прогноза ЕСНАМА2, среднее значение мутности в расчетном створе увеличится на 79 %, а медиана на 124 %.

Таблица 5.3 – Параметры распределения наблюдаемых и сгенерированных рядов (прогноз ЕСНАМА2) расхода воды и мутности (X_{cp} – среднее; M – медиана; C_v – коэффициент вариации; $X_{25\%}$ и $X_{75\%}$ – квантили вероятностью 25 % и 75 %)

| | X_{cp} | C_v | M | $X_{25\%}$ | $X_{75\%}$ | $X_{25\%}-X_{75\%}$ |
|---|----------|-------|------|------------|------------|---------------------|
| Расход воды наблюденный, м ³ /с | 312 | 0.35 | 308 | 376 | 234 | 142 |
| Расход воды смоделированный, м ³ /с (прогноз ЕСНАМА2) | 160 | 0.26 | 157 | 186 | 130 | 56 |
| Мутность воды наблюденная, г/м ³ | 5.33 | 0.99 | 3.90 | 6.24 | 2.14 | 4.10 |
| Мутность воды смоделированная, г/м ³ (прогноз ЕСНАМА2) | 9.53 | 0.64 | 8.73 | 13.6 | 4.68 | 8.92 |

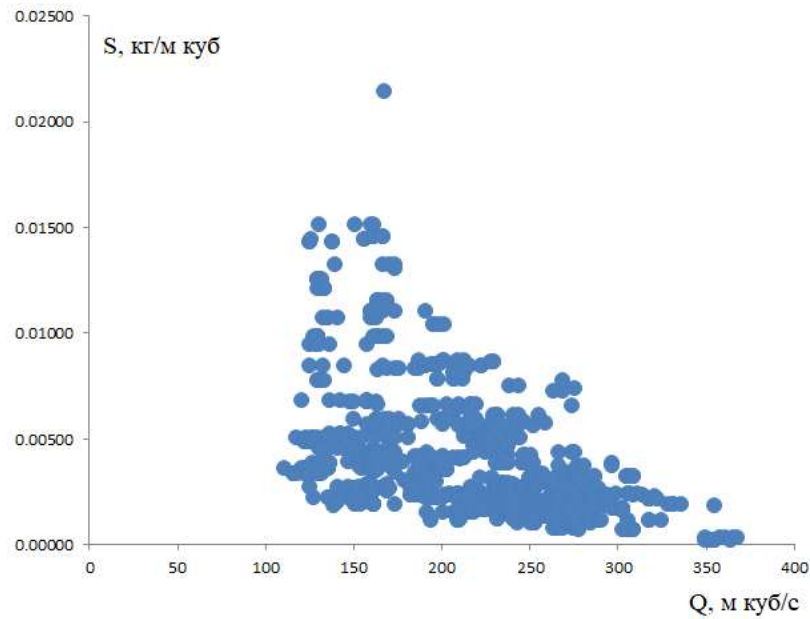


Рисунок 5.7 – Зависимость $S=f(Q)$, р. Нарва – д. Скамья

Выводы по главе

Проведена оценка распространения загрязнений, попавших в реку Неву из реки Ижоры при гипотетической аварийной ситуации на полигоне захоронения токсичных отходов «Красный Бор» (на основе разработанной модели движения воды и твердого вещества). Получены следующие результаты:

Показано, что твердые частицы–адсорбенты при допущении о среднем размере частиц 0.1 мм с соответствующей гидравлической крупностью (8 мм/с), не достигнут первого по пути следования оголовка водоканала и осядут приблизительно в 0.5 км от устья Ижоры.

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.

Оценка статистических параметров мутности воды реки Нарва проводилась по разработанной стохастической модели годового твердого стока и ДС моделирующей системе «погода – сток – наносы». Актуальность оценки статистических параметров мутности воды реки Нарвы определяется ее интенсивным хозяйственным использованием. В связи с хорошей изученностью качества воды в реке в части мутности, особенный интерес представляет оценка режима твердого стока реки Нарва и связанных с ним параметров распределения мутности воды в условиях возможных климатических изменений. Результаты численного эксперимента при реализации сценария изменения климата ЕСНАМ А2 показали уменьшение стока и увеличение мутности воды в расчетном створе на 79 %. Последнее может явиться основой для задания новых ориентиров планирования водопользования на перспективу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многообразие водных объектов по их различной физико-географической принадлежности, морфометрическим и гидравлическим характеристикам, особенностям водосборных площадей и климатическим факторам предполагает и определенные особенности охраны и рационального водохозяйственного использования таковых. Дефицит данных наблюдений за твердым стоком при известной востребованности расчетов, сопряженных с различными характеристиками твердого стока (интенсивность заиления водохранилищ, статистические параметры распределения мутности воды, поля распределения мутности в акватории, динамика перестроения дна водного объекта и многих других) определило актуальность разработки соответствующей методологии оценки твердого стока в различных приложениях.

В основу разработанной 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 перестроения 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.

Одним из основных требований к разработанной методологии оценки твердого стока в различных приложениях является ее широкое применение к водным объектам, расположенным в разных физико-географических зонах. При этом учет региональных физико-географических особенностей состоит в назначении параметров моделей и формул в соответствии со спецификой условий формирования твердого и жидкого стока в водном объекте. Для частного структурного уровня процесса – это крупность донного грунта, учет интенсивности водообмена в коэффициентах турбулентной диффузии, для более обобщенных вычислений – назначение параметров модели формирования стока на водосборе исходя из закономерностей формирования стока на водосборе водных объектов разной физико-географической принадлежности и так далее.

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 водотоках 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев, Г.А. Графоаналитические способы определения и приведения к длительному периоду наблюдений параметров кривых распределения / Г. А. Алексеев // Тр. ГГИ. – 1960. – Вып. 73. – С. 90 – 140.

Алексеев, Г. А. Методика применения кривых и поверхностей распределения вероятностей при анализе многофакторных явлений / Г. А. Алексеев // Тр. ГГИ. – 1950. – Вып. 26. – С. 3 – 26.

Алексеев, Г.А. Приближенный метод определения вероятных значений гидрологических величин, монотонно зависящих от нескольких статистических переменных / Г. А. Алексеев // Тр. ГГИ. – 1957. – Вып. 61. – С. 130 – 136.

Алексеев, Г.А. Расчет максимальных расходов воды с помощью номограмм при отсутствии гидрометрических наблюдений / Г.А. Алексеев // Тр. ГГИ. – 1962. – Вып. 99. – С. 3 – 79.

Алексеев, Г.А. О теоретических основах методов расчета характеристик речного стока / Г.А. Алексеев, А.И.Чеботарев // Тр. III. Всесоюз. гидролог. съезда. – Т. 2. –1959. – С. 30 – 144.

Алексеевский, Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа / Н.И., Алексеевский // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 9. – Стр. 100 – 105.

Бабков, В.Ф. Грунтоведение и механика грунтов / В.Ф. Бабков, Н.И. Быковский, А.В. Гербурт-Гейбович, А.Я. Тулаев. – М.: Дориздат, 1950. – 334 с.

Банникова, О.А. К вопросу об установлении региональных нормативов качества воды / О.А. Банникова, Е.Н. Бычкова // Водное хозяйство России: Проблемы, Технологии, Управление. – 2011. – № 6. – С. 54 – 68.

Баренблатт, Г. И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке: Автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук: / Баренблатт Григорий Исаакович. – Москва, 1953. – 7 с.

Баула, В.А. Упрощенный метод определения границ зон мутности при работе земснарядов / В.А. Баула // В сб. научн. трудов НГАВТ «Развитие внутренних водных путей Сибири и Саха (Якутии)». – Изд-во: НГАВТ, Новосибирск, 1994. – С. 12 – 28.

Бахметев, Б.А. Гидравлика открытых русел / Б.А. Бахметев. – М.: Государственное транспортное издательство, 1934. – 248 с.

Бернадский, Н.М. Опыт теории и практики расчета прудов-холодильников / Н.М. Бернадский, Б.В. Проскуряков // В кн.: Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР. – Вып. 5. – М. – Л., 1931. – 128 с.

Бикбулатов, Э.С. Гидрология и гидрохимия озера Неро / Э.С. Бикбулатов, Е.М. Бикбулатова, А.С. Литвинов, С.А. Поддубный. – Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский дом печати», 2003 – 192 с.

Болгов, М.В. Нестационарная стохастическая авторегрессионная модель гидрологических процессов с сезонным ходом / М.В. Болгов // Водные ресурсы. – 1996. – Том 23. – №1. – С. 21 – 28.

Борщ, С.В. Статистический анализ в гидрологических прогнозах / С.В. Борщ, А.В. Христофоров, Н.М. Юмина. – М.: Гидрометцентр России, 2018. – 160 с.

Буторин, Н.В. Донные отложения верхневолжских водохранилищ / Н.В. Буторин, Н.А. Зиминова, В.П. Курдин. – Л.: Наука, 1975. – 158 с.

Бэтчелор, Дж. Введение в динамику жидкости / Дж. Бэтчелор. – М.: Мир, – 1973. – 792 с.

Векслер, А.Б. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций / А.Б. Векслер, В.М. Донненберг. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 217 с.

Великанов, М.А. Динамика русловых потоков / М.А. Великанов. – М.: ГИТТЛ, 1954 – 1955. – Т.1. – 323 с. – Т. 2. – 323 с.

Великанов, М.А. Ошибки измерения и эмпирические зависимости / М.А. Великанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 303 с.

Великанов, М.А. Композиционный метод нахождения распределения для пиковых расходов снегового половодья / М.А. Великанов // Метеорология и гидрология. – 1949. – № 3. – С. 17 – 23.

Виноградов, Ю.Б. Композиционный метод построения кривых обеспеченности гидрологических величин / Ю.Б. Виноградов // Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук. – 1962. – Т.2. – С. 58 – 64.

Виноградов, Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Опыт критического анализа / Ю.Б. Виноградов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.

Виноградов, Ю.Б. Современные проблемы гидрологии / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. – М.: Академия, 2008. — 320 с.

Владимиров, А.М. Охрана и мониторинг поверхностных вод суши / А.М. Владимиров, В.Г. Орлов. – СПб: РГГМУ, 2009. – 220 с.

Власова, Т. В. Физическая география материков и океанов: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. Заведений / Т. В. Власова, М. А. Аршинова, Т. А. Ковалёва. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 640 с.

Водные объекты Санкт-Петербурга / Под ред. С.А. Кондратьева, Г.Т. Фрумина. – СПб.: Символ, 2002. – 348 с.

Возняк, А.А. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример / А.А. Возняк, А.П. Лепихин // Географический вестник. – 2018. – № 2 (45). – 103 – 115 с.

Водохранилища мира. – М.: Наука, 1979. – 288 с.

Волны, течения и водные массы водоемов. Конспект лекций / Под ред. проф. Б.Б. Богословского. – Л.: Изд. ЛГМИ, 1980. – С. 4 – 25.

Вольцингер, Н.Е. Теория мелкой воды / Н.Е. Вольцингер, Р.В. Пясковский. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 207 с.

ВРДС 12-05-03 МО РФ «Методические указания по расчету распространения зон мутности при дноуглублении и дампинге на акваториях ВМФ». М.: 2003. – 80 с.

Временные указания по оценке повышения мутности при землечерпательных работах, проводимых для обеспечения транзитного судоходства на реках и учету ее влияния на качество воды и экологию гидробионтов. – М.: МРФ РСФСР, 1986. – 120.

ВСН 163–83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). – М.: Миннефтегазстрой, 1985. – 117 с.

Гагарина, О.В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы / О.В. Гагарина. – Ижевск: Изд. «Удмуртский университет», 2012. – 199 с.

Гельфан, А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока / А.Н. Гельфан. – М.: Наука, 2007. – 280 с.

Гидрологический ежегодник. 1972. Т.4. Бассейн Каспийского моря (без Кавказа и Средней Азии). Выпуск 1 – 3. (Бассейн р. Волга до г. Чебоксары. Бассейн р. Ока). – Горький: Верхне-Волжское УГМС, 1974. – 454 с.

Гидрологический ежегодник. 1973. Т.4. Бассейн Каспийского моря (без Кавказа и Средней Азии). Выпуск 1 – 3. (Бассейн р. Волга до г. Чебоксары. Бассейн р. Ока). – Горький: Верхне-Волжское УГМС, 1975. – 458 с.

Гидрологический ежегодник. 1974. Т.4. Бассейн Каспийского моря (без Кавказа и Средней Азии). Выпуск 1 – 3. (Бассейн р. Волга до г. Чебоксары. Бассейн р. Ока). – Горький: Верхне-Волжское УГМС, 1977. – 466 с.

Гидрология суши. Термины и определения. ГОСТ 19179—73 Издание официальное. Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва. – 1988. – 36 с.

Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 269 с.

Гончаров, В.Н. Динамика русловых потоков / В.Н. Гончаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 366 с.

Горбачев, П.Ф. Формулы скорости течения жидкости / П.Ф. Горбачев. – М. – Л.: ОНТИ, 1936. 96 с.

Горошков, И.Ф. Гидрологические расчеты / И.Ф. Горошков. – Л.: Гидрометеиздат, 1979 г. – 433 с.

Григорьев, В. Я. О гидравлике потоков на склонах в связи со смывом почв / В. Я. Григорьев, М. С. Кузнецов // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. – 1976. – Вып. 5. – С. 75 – 83.

Гришанин, К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К.В. Гришанин. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 184 с.

Гришанин, К.В. Динамика русловых потоков / К.В. Гришанин. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.

Грушевский, М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах / М.С. Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.

Давыдов, Л.К. / Л.К. Давыдов, А.А. Дмитриева, Н.Г. Конкина. – Общая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 463 с.

Дедков, А.П. Глобальный сток наносов в океан: природная и антропогенная составляющие / А.П. Дедков, В.И. Мозжерин // Эрозионные и русловые процессы. – М.: Изд-во МГУ. – 2000. – Вып. 3. – С. 15-23.

Дедков, А.П. Современная пространственно-временная изменчивость речного стока взвешенных наносов в мировой океан: природная и антропогенная составляющие / А.П. Дедков, А.В. Гусаров, В.И. Мозжерин // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2007. – № 5. – С. 387 – 395.

Дедков, А.П. Соотношение между продуктами русловой и бассейновой денудации в стоке взвешенных наносов / А.П. Дедков, В.И. Мозжерин // Труды 6 гидрологического съезда, 2006. – С. 216–218.

Динамика ландшафтов в зоне влияния Куйбышевского водохранилища. – СПб.: Наука, 1991. – 224 с.

Дмитриев, В.В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе / В.В. Дмитриев // Биосфера. – 2010. – Т. 2. № 4. – С. 507 – 520.

Дмитриев, В.В. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия геосистем / В.В. Дмитриев, Е.А. Примаков, В.К. Скрыгина //

Международный журнал экспериментального образования. – 2011. – № 5. – С. 137 – 138.

Дмитриевский, В.И. Гидромеханика / В.И. Дмитриевский. – М.: «Морской транспорт», 1962. – 296 с.

Егиазаров, И.В. О расходе влекомых наносов / И.В. Егиазаров. // Изд. АН СССР. – 1949. – Т. 2. – С. 321 – 338

Зайцев, Н.И. Крупномасштабная вихревая структура турбулентного потока в прямолинейном лотке / Н.И. Зайцев // Труды ГГИ. – Вып. 318. – 1984. – С. 3 – 17.

Законнов, В. В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: дис. ... д. геогр. наук: 25.00.27 / Виктор Васильевич Законнов. – Борок, 2007. – 379 с.

Закономерности гидрологических процессов. – М.: ГЕОС, 2012. – 736 с.

Замарин, Е.А. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах / Е.А. Замарин. – М.–Л.: Гострансиздат, 1951. – 82 с.

Зиминова, Н. А. Взвешенное вещество в равнинных водохранилищах // Гидрология озер и водохранилищ / Н. А. Зиминова. – Ч. 2. М.: Изд-во МГУ, – 1975. – С. 89 – 96.

Зиновьев, Е.А. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну / Е.А. Зиновьев, А.Б. Китаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. № 5. – С. 283 – 288.

Зиновьев А.Т., Копылов Ю. Н., Кузьмин А. А., Сапрыкина Я. В. Модель процесса седиментации в глубоких водоемах / А.Т. Зиновьев, Ю. Н. Копылов, А. А. Кузьмин // Первая Всесибир. конф. «Математические проблемы экологии»: Тез. докл. – Новосибирск: Изд – во ИМ СО РАН. – 1992. – С. 22 – 23.

Знаменская, Н.С. Гидравлическое моделирование русловых процессов / Н.С. Знаменская. – СПб: Гидрометеиздат, 1992. – 239 с.

Иванов, П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине / П.В. Иванов // Бюл. ЛГУ, 1948. № 21 – С. 29-36.

Карасев, И.Ф. Русловые процессы при переброске стока / И.Ф. Карасев. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 288 с.

Карасев, И.Ф. Статистические методы речной гидравлики и гидрометрии / И.Ф. Карасев, В.В. Коваленко. – СПб.: Гидрометеиздат, 1994. – 208 с.

Караушев, А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков / А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 390 с.

Караушев, А.В. Распределение скоростей и коэффициентов турбулентного обмена по вертикали / А.В. Караушев // Труды ГГИ. – 1947. – Вып. 2 (56). – С. 38 – 78.

Караушев, А.В. Теория и методы расчета речных наносов / А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1977 – 272 с.

Карлин, Л. Н. Прогностические оценки влияния изменения климата на экологическое состояние Балтийского моря / Л. Н. Карлин. – Отчет по проекту РФФИ № 09-05-13553. 2010.

Картвелишвили, Н.А. Стохастическая гидрология / Н.А. Картвелишвили. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 200 с.

Клавен, А.Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани. – СПб: Нестор-История, 2011. – 544 с.

Клеванный, К.А. Распространение взвеси и ее воздействие на биоту при дноуглублении в Кольском заливе (Баренцево море). 1. Исходные данные и используемые модели / К.А. Клеванный, Е.В. Смирнова, А.А. Шавыкин, П.С. Ващенко // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 3. – С. 18 – 24.

Козменко, А.С. Гидрологические исследования Тульской губернии / А.С. Козменко // Труды Гидрол. отд. Тульского губернского земства. – М., 1913.

Комплексная экологическая реабилитация озера Неро в Ростовском районе Ярославской области. Проектная документация. Раздел 1. Пояснительная записка – ООО Форватер. – 2014. – 50 с.

Кондратьев, Н.Е. Русловые процессы рек и деформации берегов водохранилищ / Н.Е. Кондратьев. – СПб: Изд. «Знак», 2000. – 258 с.

Кондратьев, С.А. Гидродинамический режим мелководного водоема: опыт математического моделирования / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018 а. – № 52. – С. 88 – 102.

Кондратьев, С.А. Детерминированно-стохастическая оценка воздействия климатических изменений на сток с водосбора реки Невы / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Труды IV Конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов». – Москва. – 2015. – С. 302 – 304.

Кондратьев, С.А. Детерминированно-стохастическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоем / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Фундаментальная гидрофизика. – 2018 б. – Т. 11. № 4. – С. 55 – 65.

Кондратьев, С.А. Детерминировано-стохастическое моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты (на примере Финского залива Балтийского моря) / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова. В.И. Уличев. – СПб: Изд. Нестор-История, 2013. – 36 с.

Кондратьев, С.А. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Тр. XII съезда РГО. Т. 6. – СПб: Наука, 2005. – С. 99 – 104.

Кондратьев, С.А. Математическое моделирование в системе водосбор – водоток – водоем / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова. – СПб: Нестор-История, 2019. – 248 с.

Кондратьев, С.А. Математическое моделирование как основа планирования рационального использования водных ресурсов / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017 а. – № 48. – С. 85 – 93.

Кондратьев, С.А. Опыт создания математических моделей, описывающих процессы стока и выноса примесей с водосбора / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова // Общество. Среда. Развитие. – 2017 б. – № 1 (42). – С. 80 – 84.

Кондратьев, С.А. Оценка воздействия ливневых сбросов очистных сооружений Санкт-Петербурга на качество воды Невской губы (по данным математического моделирования) / С.А. Кондратьев, В.А. Рябченко, В.Н. Коноплев, Ш.Р. Поздняков, М.В. Шмакова // Известия РГО. – 2006. – Т. 138. № 4. – С. 47 – 54.

Кондратьев, С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования / С.А. Кондратьев. – СПб.: Наука, 2007. – 253 с.

Кондратьева, Т.А. Влияние добычи нерудных строительных материалов на экосистемы Куйбышевского водохранилища / Т.А. Кондратьева, С.Д. Захаров, Л.Ю. Халиуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. № 19. – С. 116 – 119.

Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

Косов, Б.Ф. Эрозионное районирование срединного региона СССР / Б.Ф. Косов, Е.М. Белова, Е.Ф. Зорина, З.П. Кирюхина, Г.С. Константинова, Б.П. Любимов, Г.Т. Митяева // Эрозия почв и русловые процессы. – 1975. – Вып.5. – С. 46 – 75.

Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

Кременецкая, Е.Р. О роли взмучивания донных отложений в балансе взвешенного вещества в Можайском водохранилище в летний период / Е.Р. Кременецкая, В.М. Перекальский, Д.В. Ломова // Вода: химия и экология. – 2013. – № 2 (56). – С. 12 – 18.

Крестовский, О. И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек / О. И. Крестовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 117 с.

Кучмент, Л. С. Динамико–стохастическое моделирование формирования речного стока / Л. С. Кучмент, А.Н. Гельфан. – М.: Наука, 1993. – 101 с.

Лагута, А.А. Особенности заиления краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок / А.А. Лагута, А.В. Погорелов // Географический вестник. – 2018. – №4 (47). – С. 54–66.

Ламб, Г. Гидродинамика / Г. Ламб. – М.: ОГИЗ, 1947. – 930 с.

Леви, И.И. Динамика русловых потоков / И.И. Леви. – Л. – М.: Гос. энергетическое изд., 1948. – 224 с.

Лепихин, А.П. Основоположник отечественной теоретической гидрологии. К 75-й годовщине трагической гибели А.А. Саткевича / А.П. Лепихин // Вестник Пермского научного центра УРО РАН. – 2013. – №2. – С. 76 – 80.

Лепихин, А.П. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки / А.П. Лепихин, С.И. Головачева // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2015. – № 1. – С. 4 – 13.

Лепихин, А.П. К проблеме верификации гипотез в гидрологии / А.П. Лепихин // Вестник ПФИЦ. 2019. – №2. – Стр. 6 – 17.

Лепихин, А.П. Анализ функциональных зависимостей между содержанием поллютантов, обусловленных техногенными факторами, и расходами водотоков-приемников / А.П. Лепихин, С.А. Мирошниченко // Водохозяйственные проблемы. Вып. 2. – Екатеринбург, 1997. – С. 41 – 60.

Лепихин, А.П. Особенности задания «фоновой» концентрации в естественных водотоках / А.П. Лепихин, С. А. Мирошниченко // Водное хозяйство России: Проблемы, Технологии, Управление. – 2002. – Т3. № 3. – С. 247 – 262.

Лепихин, А.П. Исследование статистических функций распределения гидрохимических показателей качества воды поверхностных водных объектов / А.П. Лепихин, А.А. Возняк // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2012. – № 4. – С. 21 – 32.

Лидов, В.П. Процессы эрозии в зоне дерново-подзолистых почв / В.П. Лидов. – М.: Изд-во МГУ. – 1981.

Лисицин, А.П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах / А.П. Лисицин. – М.: Наука. – 1991.

Лопатин, Г.В. Наносы рек СССР / Г.В. Лопатин. – М.: Географгиз, 1952. – 363 с.

Лукин, А. В. Куйбышевское водохранилище / А. В. Лукин // Изв. ГосНИОРХ. – 1961. – Т. 50. – С. 62 – 72.

Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее / М.И. Львович – М.: Мысль, 1974. – 448 с.

Львович, М.И. Современная интенсивность внутриконтинентальной эрозии суши земного шара. Результаты исследований по международным геофизическим проектам / М.И. Львович, Г.Я. Карасик, Н.П. Братцева и др. – М.: Межвед. геофиз. комитет, 1991. – 336 с.

Лямаев, Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.

Маккавеев, В.М. Учет ветрового фактора в динамике волн и переносных течений / В.М. Маккавеев // Труды ГГИ. – 1951. – Вып. 28 (82). – С. 3 – 35.

Маккавеев, Н.И., Результаты изысканий для обоснования противоэрозионных и противодефляционных мероприятий в Карачаево–Черкесской автономной области / Н.И. Маккавеев, М.Н. Заславский, Е.М. Белова, М.Ю. Белоцерковский, Л.Н. Ганжара, З.П. Кирюхина, Г.А. Ларионов, Л.Ф. Литвин, В.Н. Петров, Л.С. Самодурова, Н.П. Тарабрин // Эрозия почв и русловые процессы. – 1956. – Вып. 5. – С. 5 – 45.

Маккавеев, Н.И. Русловые процессы / Н.И. Маккавеев, Р.С. Чалов. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.

Маккавеев, Н. И. Русло реки и эрозия в её бассейне / Н. И. Маккавеев – М.: АН СССР, 1955. - 346 с.

Максимова, О.Б. Оценка влияния повышенной мутности воды, возникающей при проведении гидротехнических работ, на структурно-функциональные характеристики фитопланктона: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.18 / Ольга Борисовна Максимова. – СПб, 2002. – 182 с.

Материалы наблюдений на водохранилищах (Дополнение к Гидрологическому ежегоднику) / Куйбышев: Приволжское УГМС. 1972. – Т. 4. Вып. 4, 8. – 1969. 270 с.

Медников, Е.П. К теории взвешенных наносов / Е.П. Медников // Метеорология и гидрология. – 1985. – №9. – С. 82 – 94.

Меншуткин, В.В. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 1. Гидродинамика озер / В.В. Меншуткин, Л.А. Руховец, Н.Н. Филатов // Водные ресурсы. – 2013. – Том 40. № 6. – С. 566 – 582.

Меншуткин, В.В. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер / В.В. Меншуткин, Л.А. Руховец, Н.Н. Филатов // Водные ресурсы. – 2014. – Том 41. № 1. – С. 24 – 38.

Методика расчета дополнительной мутности и вторичного загрязнения вод при производстве дноуглубительных работ и добычи НСМ на реках и водоемах. – Министерство речного флота РСФСР, «Ленгипроречтранс», 1990. – 18 с.

Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений / Гос. гидрол. ин-т. – СПб, 2005. – 123 с.

Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под редакцией засл. деят. науки и техники РСФСР проф. А. В. Караушева. Издание 2-е переработанное и дополненное. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 285 с.

Назаров, Н.Н. Переработка берегов равнинных водохранилищ России в современную стадию развития (конец XX — начало XXI вв.) / Н.Н. Назаров // География и природные ресурсы. – 2006. – № 4. – С.12—19.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Вып. 3. – Л.: Гидрометеиздат, 1988 г.

Определение расчетных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14 – 83. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.

Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка современного состояния озера Неро в Ростовском муниципальном округе Ярославской области» (заключительный). – Ярославль: Ярославский государственный университет им. Демидова, 2011. – 45 с.

Печеркин, И. А. Геодинамика побережий Камских водохранилищ / И. А. Печеркин – Пермь: Издательство Пермского государственного университета, 1969. – Ч. II. – 308 с.

Поздняков, Ш.Р. Расчет расхода влекомых наносов на реках с крупнофракционными донными отложениями) / Ш.Р. Поздняков, М.В. Шмакова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 45. – С. 20 – 27.

Поздняков, Ш.Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах / Ш.Р. Поздняков. – СПб: Лема, 2012 – 226 с.

Понкратов, С.Ф. Определение зоны мутности при выемке и перемещении грунта в руслах крупных рек / С.Ф. Понкратов // Сб. науч. Трудов ГосНИОРХ, 1989, Вып. 296. – С. 148 – 156.

Пособие к СНИП 2.05.03—84 «Мосты и трубы» По изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМ П—91). Проектный конструкторско-технологический институт транспортного строительства. – М.: 1992. – 425 с.

Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 44 с.

Потапов, И.И. Моделирование эволюции песчано-гравийного дна канала в одномерном приближении / И.И. Потапов, К.С. Снигур // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7 № 2. – С. 315 – 328.

Приказ Минсельхоз России «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» от 13 декабря 2016 г. № 552. Москва.

Природа Сестрорецкой низины. – СПб: СПбГУ, 2011. – 263 с.

Распопов, И.М. Высшая водная растительность водохранилища Сестрорецкий Разлив в Курортном районе г. Санкт-Петербурга / И.М. Распопов // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии». – 2010. – Т. 19. № 3. – С. 133 – 139.

Рахуба, А.В. Гидроэкологические исследования водных объектов с использованием измерительно-вычислительной системы «Хитон – Волна» / А.В.

Рахуба // Информационно-вычислительные технологии и их приложения. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С. 64 – 68.

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

Рахуба, А.В. Численное моделирование заиления приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами / А.В. Рахуба, М.В. Шмакова // Метеорология и гидрология. – 2018. – №1. – С. 68 – 75.

РД 52.24.622-2017 «Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод». – Ростов-на-Дону, 1987. – 96 с.

Река Нарва. Реки с заповедными территориями в уезде Вирумаа. – Куру–Тарту, 2010. 176 с.

Рекомендации по инженерным изысканиям для прогноза переработки берегов водохранилищ // ПНИИИС – М.: Стройиздат, 1986. – 56 с.

Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СО 34.21.204-2005. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – СПб, 2006. – 104 с.

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

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

СанПиН 2.1.5.980-00 "Гигиенические требования к охране поверхностных вод".

СанПиН 2.1.4.1074-01 "Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

Саткевич, А.А. Натуральные координаты гидродинамики управляемого руслом потока / А.А. Саткевич // Записки ГГИ. – Том I. – 1926.

Смыжова, Е.С. Оценка стока биогенных веществ с учётом особенностей гидрохимической информации (на примере реки Великой): дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / Елена Сергеевна Смыжова. – СПб., 2010. – 156 с.

Соколовский, Д.Л. Речной сток / Д.Л. Соколовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 528 с.

СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик.

Срибный, М. Ф. Нормы сопротивления движению естественных водотоков и расчет отверстий больших мостов / М. Ф. Срибный. – М. – Л.: Гострансиздат, 1932 – 148 с.

СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08.31-2012 «Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров» – СПб.: Изд-во «Глобус», 2012. – 140 с.

Стокер, Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения / Дж. Стокер. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. – 617 с.

Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под ред. А. В. Караушева. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 240 с.

Ступишин, А. В. Географические особенности формирования берегов и ложа Куйбышевского водохранилища А.В. Ступишин, А.М. Трофимов, В.М. Широков. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1981. – 184 с.

Судольский, А.С. Динамические явления в водоемах / А.С. Судольский. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 263 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Нарва. Книга 1. Общая характеристика речного бассейна реки Нарва. – СПб:

Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов, 2014. – 74 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Нева. Книга 1. Общая характеристика речного бассейна реки Нева. – СПб: Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов, 2010. – 189 стр.

Типовая технологическая схема добычи песка, гравия, песчано-гравийной смеси в руслах судоходных рек и других судоходных водоемах. М.: МРФ РСФСР. Главное управление портов, 1980. – 58 с.

Указания по расчету стока наносов. ВСН 01–73. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 30 с.

Филатов, Н.Н. Динамика озер / Н.Н. Филатов. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 166 с.

Фролова, Н.Л. Мониторинг гидрологических процессов и обеспечение безопасности водопользования / Н.Л. Фролова, Н.И. Алексеевский, В.А. Жук // Природообустройство. – 2014. – № 3. – С. 66 – 69.

Чалов, Р.С. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая / Р.С. Чалов, Н. И. Алексеевский, Шугуан Лю. – М.: МГУ, 2000. – 216 с.

Чалов, Р.С. Сток наносов, транспортирующая способность потоков и их роль в формировании речных русел / Р.С. Чалов // География и природные ресурсы. – 2011 а. – №3. – С. 20 – 27.

Чалов, Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел / Р.С. Чалов. – Москва: URSS, 2011 в. – 960 с.

Чан, Х.Т. Эколого-гидрологические проблемы дельты реки Меконг / Х.Т. Чан // Водное хозяйство России. – 2019. № 1. – Стр. 24 – 39.

Чигиринский, П. Ф. О течениях в Куйбышевском водохранилище на основании четырехлетних наблюдений / П.Ф. Чигиринский // В сб.: Сборник работ Комсомольской гидрометеорологической обсерватории. Вып. 2. – Л., 1962. – С. 200 – 233.

Чоу, В. Т. Гидравлика открытых каналов. / В. Т. Чоу. – М.: Госстройиздат, 1969. – 462 с.

Шамов, Г.И. Заиление водохранилищ / Г.И. Шамов. – М. – Л.: Гидрометеиздат, 1939. – 139 с.

Шамов, Г.И. Речные наносы / Г.И. Шамов. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 377 с.

Шамов, Г.И. Формулы для определения предельной скорости и расхода донных наносов / Г.И. Шамов // Труды ГГИ. – 1952. – Вып. 36 (90). – С. 3 – 17.

Шелутко, В.А. Оценка стока биогенных веществ р. Луги с учетом водности и неэквидистентности информации / В.А. Шелутко, А.В. Студеникина. // В сборнике: Экологические проблемы промышленных городов Сборник научных трудов по материалам 6-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2013. – С. 310-314.

Шелутко, В.А. Влияние учета особенностей гидрохимической информации на результаты расчета стока биогенных веществ по р. Луга / В.А. Шелутко, А.В. Мулява // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2015. – № 40. – С. 203 – 213.

Шелутко, В.А. Динамика стока биогенных веществ по реке Великая в Псковско-Чудское озеро / В.А. Шелутко, Е.С. Смыжова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 14. – С. 131 – 146.

Шелутко, В.А. Анализ влияния учета водности рек на точность расчета средних годовых концентраций загрязняющих веществ / В.А. Шелутко, Е.В. Колесникова // Вестник Санкт-Петербургского университета. – Серия 7. Геология. География. – 2008. – № 3. – С. 81 – 88.

Шелутко, В.А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний стока / В.А. Шелутко. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 159 с.

Широков, В. М. Формирование подводного рельефа Куйбышевского водохранилища: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.25 / Вячеслав Михайлович Широков. – Казань, 1964. – 196 с.

Шкодин, Н. В. Влияние дноуглубительных работ на физиолого-биохимические показатели гидробионтов и кормовую базу рыбохозяйственных водоемов / Н. В. Шкодин // ВЕСТНИК АГТУ. – 2005. – № 3 (26). – С. 228 – 232.

Шмакова, М.В. Анализ и расчеты твердого стока (на примере североамериканских рек) / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016 а. – № 43. – С. 51 – 66.

Шмакова, М. В. Аналитическая формула расхода наносов. Методика расчетов // Метеорология и гидрология. 2013 а. № 8. С. 61 – 68.

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

Шмакова, М.В. Гидродинамическое моделирование течений и транспорта наносов в водоеме при наличии макрофитов (на примере Сестрорецкого Разлива) / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 49. – С. 85 – 93.

Шмакова, М.В. К вопросу о математическом моделировании русловых деформаций / М.В. Шмакова, И.Н. Липовицкая // Ученые записки РГГМУ. – 2014. – № 37. – С. 28 – 36.

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

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

Шмакова, М.В. Математическое моделирование речных потоков / М.В. Шмакова. – СПб: Издательство Лема, 2011. – 89 с.

Шмакова, М.В. Математическая модель движения воды и наносов в открытых руслах / М.В. Шмакова, А. Н. Кондратьев // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 6. С. 81 – 88.

Шмакова, М.В. Оценка заиления водохранилищ по данным о годовом твердом стоке притоков (на примере Сестрорецкого Разлива) / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев // Ученые записки РГГМУ. – 2014. – № 34. С. 134 – 141.

Шмакова, М.В. Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев. Е.Г. Маркова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 44. – С. 61 – 69.

Шмакова, М.В. Расчет заносимости русловых карьеров / М.В. Шмакова // Ученые записки РГГМУ. 2012 в. – № 26. – С. 46 – 57.

Шмакова, М.В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ / М.В. Шмакова. – СПб: Издательство ВВМ, 2018. – 149 с.

Шмакова, М.В. Стохастическая Модель Погоды в системе детерминированно – стохастического моделирования характеристик стока: дис. ... канд. техн. наук: 11.00.07 / Марина Валентиновна Шмакова. – СПб, 2000. – 129 с.

Шмакова, М.В. Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки / М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев // Метеорология и гидрология. – 2014. – №9. – С. 74 – 84.

Шмакова, М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков / М.В. Шмакова. – СПб: Издательство Лема, 2013 в. – 142 с.

Эдельштейн, К.К. Гидрология материков: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / К.К. Эдельштейн. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 297 с.

Эдельштейн, К. К. Лимнология: учеб. пособие для академического бакалавриата / К. К. Эдельштейн. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 398 с.

Эрозионные процессы. Под редакцией Маккавеева Н.И. и Чалова Р.С. М.: Мысль, 1984. – 256 с.

Ясинский, С.В. Влияние региональных колебаний климата и хозяйственной деятельности на изменения гидрологического режима водосборов и стока малых рек / С.В. Ясинский, Е.А. Кашутина // Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. № 3. – С. 269 – 291.

Ackers, P. Sediment transport: new approach and analysis / P. Ackers, W. R. White // Journal of the Hydraulic Division. ASCE. – 1973. – No. NY11. – P. 2041 – 2060.

Ailliot, P. Stochastic weather generators: an overview of weather type models / P. Ailliot, D. Allard, V. Monbet, P. Naveau // Journal de la Société Française de Statistique. – 2015. – 156 (1). – P.101 – 113.

Bagnold, R.A. An approach to the sediment transport problem from general physics. Us geological survey professional / R.A. Bagnold. – 1966. – 422 p.

Bailey, N.T.J. The Elements of Stochastic Processes John Wiley. / N.T.J. Bailey. – New York, 1964. – P. 39

Braydlay, I. N. Hydraulics bridge water ways / I. N. Braydlay // Hydraul.Res. Sez № 1. Div. Hydraul. Res. of Public. Roads. Wash., D. C. – 1960. – P. 1 – 53.

Billard, R. Influence de sediments argileux incirpores an milicud' ensemination sur le success de la fecundation chez la truite arienciel (*Salmo gairdneri*) / R. Billard // Water Res. – 1982. – V. 16. № 5. – P. 725 – 728.

Blumberg, A.F. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model / A.F. Blumberg, G.L. Mellor // In: Heaps N. (Ed.) Three-dimensional Coastal Ocean Models. American Geophysical Union. – 1987. – 208 p.

Bobrovitskaya, N.N. Development of transboundary surface water monitoring system / N.N. Bobrovitskaya, A.V. Kokorev // XX111 Nordic Hydrological Conference, Tallinn, Estonia 8-12 August 2004. Selected articles/Editor: Arvo Jarvet, Vol.11, NHP Report No. 48. – Tartu. – P. 415 – 423.

Bobrovitskaya, N.N. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers / N.N. Bobrovitskaya, A.V. Kokorev, N. A. Lemeshko // Global and Planetary Change. – 2003. – Vol. 39. – P. 127 – 146.

Bobrovitskaya, N.N. Long-term variations in mean erosion and sediment yield from the rivers of Former Soviet Union / N.N. Bobrovitskaya // In Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996. IAHS Publ. – 1996. – No 236. – P. 407 – 413.

Bogárdi, J. Sediment transport in alluvial streams / J. Bogárdi / Budapest: Akadémiai Kiadó. – 1974. – 826 p.

Bosch, J.M. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration / J.M. Bosch, J.D. Hewlett // *Journal of Hydrology*. – 1982. – No55. – P. 3 – 23.

Box, G. Time series analysis, forecasting and control (revised edn.) / G. Box, G. Jenkins. – Holden-Day. San Francisco, 1976.

Boyd, Claude E. Water quality An Introduction / Claude E. Boyd. – KLUWER ACADEMIC Publishers. Boston. Dordrecht. London, 2000. – 330 p.

Brown, R.M. A water quality index – do we dare? / R.M Brown, N.J. Mc Lelland, R.A. Deininger, R.Z Fozer // *Water and Sewage Works*, 1970.

Cao, Z. Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers / Z. Cao, R. Day, S. Egashira // *J. Hydraulic Eng., ASCE*. – 2002. – 128(3). – P. 306 – 321.

Cooper, A.C. The effects of transported stream sedi-ments on the survival of the sockeye and pink salmon eggs and alevin / A.C. Cooper // *Bull. Internal. Pacific Salmon Fish Comiss N 18*, 1965. – 71 p.

Engelund, F. A monograph on Sediment transport In Alluvial Streams / F. Engelund, E. Hansen // *Nordic Hydrology*. – No 7. – 1967.

Gleick, P. H. Water in Crisis / P. H. Gleick. – New York Oxford University Press. – 1993.

Guidelines for safe recreational water environments // *Costal and fresh waters*. Vol. 1. WHO. Geneva, 2003. – 219 p.

Gumbel, E.J. Statistics of Extremes / E.J. Gumbel. – Columbia Univ. Press, New York. Google, 1958.

Gumbel, E.J. Statistical forecast of droughts / E.J. Gumbel // *IAHS Bulletin*. – 1963. – Vol. 8. No. 1. – P. 5 – 23.

Harrison, C.G.A. Rates of continental erosion and mountain building / C.G.A. Harrison // *Geol. Rundsch*. – 1994. – № 83. – P. 431 – 447.

Harrison, C.G.A. What factors control mechanical erosion rates? / C.G.A. Harrison // *Int. J. EarthSci*. – 2000. – № 88. – P. 752 – 763.

HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W., Brunner, Version 4.1 January 2010. – 411 p.

Heise, S. Risk from Historical Contaminated Sediments in the Rhine Basin / S. Heise, U. Förstner // *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. – 2006.

Hines, W.G. Formulation and use of fractional models for river quality assessment / W.G. Hanes, D.A. Rickert, S. Mckenric, I.P. Bennet // *J. Water Pollution Control Federation*. – 1975. – V. 47. № 10. – P. 2357 – 2370.

Hutter, K., Wang Y., Chubarenko I. *Physics of Lakes. Vol. 1: Foundation of the Mathematical and Physical Background* / K. Hutter, Y. Wang, I. Chubarenko. – Springer Verlag; Berlin; Heidelberg, 2011. – 434 p.

Jones, J.W. A simulated environmental model of temperature, evaporation, rainfall and soil moisture / J.W. Jones, R.F. Colwic, E.D. Threadgill // *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.* – 1972. – № 15.

Jørgensen, S.E. *Fundamentals of Ecological Modelling* / S.E. Jørgensen. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – P. 450.

Jørgensen, S.E. Overview of the model types available for development of ecological models / S.E. Jørgensen // *Ecol. Modelling*. – 2008. – V. 215. – P. 3–9.

Karim, M.F. *Computer-based Predictors for Sediment Discharge and Friction Factor of Alluvial Streams* / M.F. Karim, J.F. Kennedy. – Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, 1983. – Report No. 242.

Kerssens, P.J.M. Model for non-steady suspended sediment transport / P. J.M. Kerssens, L. C. Van Rijn // *Project Engineers Delft hydraulics laboratory, Delft, Netherlands*, 1977. – 8 p.

Larsen, G.A. Stochastic simulation of daily climatic data for agronomic models / G.A. Larsen, R.B. Pense // *Agronomy Journal*. – 1982. – V. 74. – № 3.

Ludwig, W. River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets / W. Ludwig, J.-L. Probst // *Amer. J. Sci.* – 1998. – № 298. – P. 265 – 295.

Mahmood, K. *Unsteady Flow in Open Channels* / K. Mahmood, V. Yevjevich // *Water Resources Publications. Fort Collins, CO*. – Vol. 1. – 1975.

McLennan, S.M. Weathering and global denudation / S.M. McLennan // *J. Geol.* 1993. – № 101. – P. 295-303.

Milliman, J.D. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers / J.D. Milliman, J.P.M. Sivitsky // *J. Geol.* 1992. – № 100. – P. 525-544.

Milliman, J. D. River discharge to the sea. A global river index (GLORI) / J. D. Milliman, C. M. Rutkowski, M. Meybeck // *LOICZ Reports and Studies.* – 1995.

Molinas, A. Transport of sediment in large sand-bed rivers / A. Molinas, B. Wu // *Journal of Hydraulic Research.* – 2001. – 39. No. 2. – P. 135 – 145.

Moore, J.N. Grain size partitioning of metals in contaminated coarse-grained river flood plain sediment, Clark Fork River, Montana / J.N. Moore, E.J. Brook, C. Johns // *Environ. Geol. Wat. Sci.* – 1989. – No. 14. – P. 107-115.

Naidu, B. S. K. Addressing the problems of silt erosion at hydro plants / B. S. K. Naidu // *Hydropower and Dams Issue Three.* – 1997.

Naidu, B. S. K. Siltation an encroachment on hydro / B. S. K. Naidu // *International Water Power & Dam Construction.* – 2000.

NASA Global Climate Change, Vital Signs. Retrieved. 2 April 2018.

Nick, A.D. Stochastic generation of temperature and solar radiation data / A.D. Nick, J.F. Harp // *Journal of Hydrology.* – 1980. – 48 p.

Nicolas, A.P. Modeling and monitoring flow and suspended sediment transport in lowland river flood plain environments / A.P. Nicolas // *Erosion and Sediment transport Measurement in River: Technological and Methodological Advances (Proceedings of the Oslo Workshop, June 2002).* IAHS Publ. 283. – 2003.

Nicolas, A.P. Numerical simulation of overbank processes in topographically complex floodplain environments / A.P. Nicolas, C.A. Mitchell // *Hydrol. Processes.* 2003. – No 17. – P. 727 – 746.

Nicolas, A.P. Modeling flood hydraulics in topographically–complex lowland flood plain environments / A.P. Nicolas // *In: River Flow 2002 (ed. by D. Bousmar & Y. Zech).* Balkema, Rotterdam, Niderlands, 2002. – P. 253 – 261.

Noges, P. Primary production, sedimentation and resuspension in large shallow lake Vortsjarv / P. Noges, L. Tuvikene, T. Noges, A. Kisand // *Aquatic Sci. Res. Across Boundaries*. – 1999. – Vol. 61. – N 2. – P. 168 – 182

Onof, C. Rainfall modeling using Poisson-cluster processes: a review of developments / C. Onof, R. Chandler, A. Kakou, P. Northrop, H. Wheeler, V. Isham // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. – 2000. – 14. – 384 – 411 p.

Oriani, F. Simulation of rainfall time-series from different climatic regions using the direct sampling technique / F. Oriani, J. Straubhaar, P. Renard, G. Mariethoz // *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*. – 2014. – 11. – 3213 – 3247 p.

Ouyang, D. Soil erosion and sediment assessment in the Great Lakes Basin / D. Ouyang, J. Bartholic. – Michigan State University, Institute of Water Research. – 2003.

Oven, P. Late Holocene sediment yield in small and subalpine drainage basins. British Columbia / P. Oven, H. Slaimaker // *IAHS Publ*, – 1992. – №209.

Qian, Budong. Performance of stochastic weather generators LARS-WG and AAFC-WG for reproducing daily extremes of diverse Canadian climates / Budong Qian, Samuel Gameda, Henry Hayhoe // *CLIMATE RESEARCH*. – 2008. – Vol. 37. – P. 17 – 33.

Racsko, P.L. A serial approach to local stochastic weather models / P.L. Racsko, L. Szeidl, M. Semenov // *Ecological Modelling*. – 1991. – 57. – P. 27 – 41.

Rajagopalan, B. A k-nearest neighbour simulator for daily precipitation and other variables / B. Rajagopalan, U. Lall // *Water resources research*. – 1999. – 35(10). – 3089 – 3101 p.

River, B. Habitat modifications and Freshwater fish / B. River, J. Segulier // *Proc. Symp. Enr. Inland fish. Adv. Comiss. Aarchus. 23-25 May. 1984. London et al.* – 1985. – P. 131 – 146.

Robertson, D.M. Regionalized loads of sediment and phosphorus to Lakes Michigan and Superior – High flow and long-term average / D.M. Robertson // *Journal of Great Lakes Research*. – 1997. – 23(4). – P. 416 – 439.

Robertson, D.M. Present and Reference Concentrations and Yields of Suspended Sediment in Streams in the Great Lakes Region and Adjacent Areas / D.M. Robertson, D.A. Saad, D.M. Heisey // U.S. Geological Survey. USGS-5066. – 2006.

Saiedi, S. Coupled modeling of alluvial flows / S. Saiedi // J. Hydraulic Eng., ASCE. – 1997. – 123 (5). – P. 440 – 446.

Sanchez, A. A non-equilibrium sediment transport model for coastal inlets and navigation channels / A. Sanchez, W. Wu // In: Roberts T.M., Rosati J. D., and Wang P. (eds.) // Proceedings, Symposium to Honor Dr. Nicholas C. Kraus. Journal of Coastal Research. Special Issue. – 2011. – No. 59. – P. 39 – 48.

Sedaei, N. Suspended Sediment Formulae Evaluation, Using Field Evidence from Soolegan River / N. Sedaei, A. Honarbakhsh, F. Mousavi, J. Sadatinegad // World Applied Sciences Journal. 2012. – 19 (4). – P. 486 – 496.

Singh, V. Two dimensional sediment transport model using parallel computers / V. Singh // B. Tech., Banaras Hindu University, India. – 2002. – 109 p.

Singh, V.P. Hybrid formulation of kinematic wave model of watershed runoff / V.P.Singh // J. Hydrology. – 1975. – V. 27 (1/2). – P. 33 – 50.

Smith, B. Suspended sediment load for Canadian tributaries 1972-2005 (LS 1990-2009) /B. Smith. – Water Survey of Canada, Ontario Region. – 2010.

Smith, R. A two-equation model for contaminant dispersion in natural streams / R. Smith // J. Fluid Mech. – 1987. – V. 178. – P. 257 – 277.

Smith, R.E. A Kinematic Model for Surface Mine Sediment Yield / R.E. Smith // Trans. ASAE. – 1981. – V. 24. No 6. – P. 1508 – 1514.

Stallard, R. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial / R. Stallard // Global Biogeochemical Cycles. – 1998. – № 12. – P. 231 – 257.

Suspended sediment load for Lake Erie tributaries. Heidelberg University National Center for Water Quality Research. 1997-2001.

Taylor, G.I. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe / G.I. Taylor // Proc. Roy Soc. (London) A. 223. – 1954. – P. 446 – 468.

US EPA. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs, US Environmental Protection Agency. – Washington. DC. EPA-822-B00-001. – 2000.

Vanoni, V.A. Sediment transportation mechanics: suspension of sediment / V.A. Vanoni // J. Hydr. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. – 1963. – 89.

Vanoni, V.A. Fifty years of sedimentation / V.A. Vanoni // J. Hydraul. Eng. – 1980. – V. 110. No 8.

Van Rijn, L. C. Sedimentation of dredged channels by currents and waves / L. C. Van Rijn // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. – 1986. – Vol. 112. No 5. – P. 541 – 559.

Van Rijn, L.C. Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport / L.C. Van Rijn // Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. – 1984. – Vol. 110. No 11.

Visser, J. Paul. Application of sediment transport Formulae to sand-dike breach Erosion / J. Paul Visser // Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering. Report № 94-3. Faculty of Civil Engineering. Delft University of Technology. – 1995.

Walling, D.E. Erosion and sediment yield: a global overview / D.E. Walling, B.W. Webb // IAHS Publ., – 1996. – № 236 – P. 19–28.

Water recreation and disease. – Plausibility of Associated infections: acute effects, sequelae and mortality. – WHO. London, 2005. – 239 p.

Wildish, D.I. Avoidance of suspended sediments by smelt as determined by a new “single fish” behavioral bioassay / D.I. Wildish, I. Power // Bul. Environ. Contam. and Technol. – 1985. – 34. No 5. – P. 770 – 774.

Wilks, D. The weather generation game: a review of stochastic weather models / D. Wilks, R. Wilby // Progress in Physical Geography. – 1999. – 23 (3). – P. 329 – 357.

Wischmeier, W.H. Evolution of factor in the soil-loss equation / W.H. Wischmeier, D.D. Smith, R.E. Uhland // Agric. Eng. – 1958. – Vol. 39. No 8.

Wu, Weiming. Computational River Dynamics / Weiming Wu. – CRC Press. – 2007. – 509 p.

Yang, C. T. Unit stream power equation for total load / C. T. Yang // Journal of Hydrology. – 1979. – 40. No 1. – P. 123 – 138.

Yang, S. Q. Total load transport formula for flow in alluvial channels / S. Q. Yang, S. Y. Lim // Journal of Hydraulic Engineering. – 2003. – 129. No 1. – P. 68 – 72.

Yiou, P. Weather and event generators based on analogues of atmospheric circulation (invited) / P. Yiou, A. Arakelian // 2nd conference on stochastic weather generators, Avignon (France), 16-19 September 2014.

Zheng, C.Z. Flow and Sediment Transport Numerica Modeling of Complex River Networks / C.Z. Zheng, G.C. Zhang // Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, Hawaii, USA, June 19-24. – 2011.

<http://chydesa-mira.ru/reka-chuanche/>

<http://kiwi.atmos.colostate.edu/group/dave/pdf/ShallowWater.pdf>

<https://lektsii.org/17-123.html>

<http://pubs.usgs.gov/of/1989/0067/report.pdf>

<http://www.csoft.ru/catalog/soft/aquaterra/aquaterra-2013.htm>

<https://www.deltares.nl/en/software/sobek/>

<http://www.dhigroup.com>

Приложение А. Свидетельства о государственной регистрации
программ для ЭВМ



Рисунок А.1 – Свидетельство о государственной регистрации программы для
ЭВМ №2014612518

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015614228

Стохастическая модель погоды

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озераедения Российской академии наук (ИНОЗ РАН) (RU)*

Автор: *Шмакова Марина Валентиновна (RU)*

Заявка № **2014664021**

Дата поступления **31 декабря 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 апреля 2015 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



Рисунок А.2 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614228



Рисунок А.3 – Свидетельство о государственной регистрации программы для
ЭВМ №2016612803



Рисунок А.4 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018615451

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015614210

Расчет формирования стока на водосборе на основе модели ПЛНМ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озераедения Российской академии наук (ИНОЗ РАН) (RU)*

Авторы: *Кондратьев Сергей Алексеевич (RU), Шмакова Марина Валентиновна (RU)*

Заявка № 2014664208

Дата поступления 31 декабря 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 апреля 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Рисунок А.5 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614210