

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет



На правах рукописи

УДК 556.535.6, 556.531.3

ПРОМАХОВА Екатерина Васильевна

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ МУТНОСТИ РЕЧНЫХ ВОД
В РАЗНЫЕ ФАЗЫ ВОДНОГО РЕЖИМА**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель

АЛЕКСЕЕВСКИЙ НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ

доктор географических наук, профессор

Официальные оппоненты

КОРОНКЕВИЧ НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ

*доктор географических наук, профессор,
заведующий лабораторией ФГБУН «Институт
географии РАН»*

ТАНАНАЕВ НИКИТА ИВАНОВИЧ

*кандидат географических наук, ведущий научный
сотрудник ФГБУН «Институт мерзлото-
ведения им. П.И. Мельникова Сибирского
отделения РАН»*

Ведущая организация

**ФГБУН «Байкальский институт природо-
пользования Сибирского отделения РАН»**

Защита состоится **19 мая 2016 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета Д 501.001.68, созданного на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, ГЗ, МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ломоносовский проспект, 27, А8. Диссертация и автореферат размещены на сайте географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: **www.geogr.msu.ru**. Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, ГЗ, МГУ, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.68, e-mail: science@geogr.msu.ru, факс: +7 495 9328836.

Автореферат разослан **«22» марта 2016 г.**

Ученый секретарь

диссертационного совета,

*доктор геолого-минералогических наук,
профессор*



Савенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Мутность воды является важной гидрологической характеристикой, влияние которой на деформации речного русла, эффективность работы водозаборов, водосбросов, заиление водохранилищ недостаточно изучено. Мутность влияет на качество воды, воздействуя на её органолептические показатели, тем самым определяя финансовые и временные затраты, необходимые на водоподготовку и водоочистку. Содержание взвешенных минеральных частиц влияет на структурно-функциональные характеристики первичного звена пищевой цепи водных экосистем, оказывая механическое воздействие на гидробионтов, определяя их метаболические свойства, вызывая гибель фитопланктона, лимитируя первичную продукцию, изменяя кормовую базу. Взвешенные наносы влияют на содержание загрязняющих веществ в воде, сорбируя органические и неорганические примеси. В результате мониторинг содержания в воде взвешенных минеральных частиц составляет одну из задач системы наблюдений за изменением гидрологического состояния и режима рек.

Степень разработанности темы. Большинство ранее проводимых исследований мутности речных вод в основном базируются на информации, получаемой с гидрометрических постов [Лопатин, 1952; Шамов, 1959; Швебс, 1974; Сток наносов..., 1977; Россинский, Дебольский, 1980; Дедков, Можжерин, 1984; Копалиани, 1985; Walling, 2000; Бобровицкая, 2008 и др.]. Особенности пространственной изменчивости мутности речных вод в разные фазы водного режима часто отличаются от среднеемноголетних показателей и практически не изучены. Существующая гидрометрическая сеть не позволяет эффективно оценивать относительно быстрые пространственно-временные изменения мутности в связи с большой дискретностью измерений и редким расположением постов наблюдений за стоком взвешенных наносов. Открытым остается вопрос об оценке и прогнозировании поступления взвешенных частиц ниже хозяйственных объектов, влияние которых может носить разновременный характер.

Цель работы – оценка закономерностей изменения мутности речных вод в разные фазы водного режима и обоснование современных методов её мониторинга.

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

- 1) анализ современных методов определения мутности воды и оценка их применимости;
- 2) выявление особенностей пространственной изменчивости мутности речных вод в разные фазы водного режима на реках, протекающих в различных природных условиях;
- 3) изучение локальных закономерностей изменения мутности по ширине и глубине рек;
- 4) исследование антропогенного влияния на режим мутности и гранулометрический состав взвешенных наносов, разработка методов расчёта и прогноза его воздействия.

Научная новизна работы:

- 1) впервые проведена комплексная оценка эффективности современных технологий определения мутности воды. В рамках оптического метода определения мутности получены региональные регрессионные зависимости для рек России и Монголии;
- 2) выявлены закономерности формирования и факторы изменчивости мутности воды вдоль участков рек в зависимости от фаз водного режима, местных условий, антропогенных воздействий;
- 3) впервые определены закономерности быстрой изменчивости мутности воды по ширине и глубине рек, которые обусловлены типом русла, изменением водности, гранулометрическим составом и интенсивностью осаждения взвешенных наносов;
- 4) разработан аналитический математический алгоритм распределения продольной мутности воды вдоль участка реки ниже источников поступления взвешенных наносов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в выявлении закономерностей пространственной изменчивости мутности речных вод в разные фазы водного режима на участках рек в естественных и хозяйственно-преобразованных условиях. На основе анализа современных технологий определения мутности воды исследована возможность использования полученных регрессионных зависимостей между весовой мутностью и мутностью, определённой косвенными способами для рек с аналогичными условиями формирования стока взвешенных наносов. Разработана математическая модель продольного распределения мутности воды на основе уравнения турбулентной диффузии взвешенных частиц, которая позволяет оценивать влияние существующих и будущих хозяйственных объектов на распределение мутности воды вдоль участков рек. Полученные в работе закономерности изменения мутности воды на участках рек могут быть применены для оценки развития русловых процессов, качества воды, гидроэкологических условий, заиления водохранилищ.

Результаты работы вошли в научные отчёты по проектам федеральных целевых программ «Разработка моделей и технологий дистанционной диагностики состояния и режима водных объектов суши» (2011–2014 гг.); «Разработка научно-методических основ мониторинга и прогнозирования состояния бассейна р. Селенга с целью контроля трансграничного переноса загрязняющих веществ и их выноса в оз. Байкал и оптимизации использования и охраны водных ресурсов» (2011–2013 гг.); государственной бюджетной научно-исследовательской работе «Эволюция эрозионно-русловых систем и их составляющих в условиях изменения климата и антропогенных нагрузок» (2011–2015 гг.).

Материалы диссертационного исследования представлены в научных отчётах по грантам РФФИ: «Речные наносы: формирование, пространственно-временная изменчивость, гидрологические и экологические функции» (проект 15-05-05515), «Разработка научных основ управления русловыми процессами для обеспечения гидрологической безопасности на реках» (проект 15-05-

03752), «Речной перенос взвешенных частиц ниже объектов хозяйственной инфраструктуры: технологии и гидрологическое моделирование» (проект 14-05-31351), «Разработка научно-методических основ мониторинга и прогнозирования воздействия месторождений тяжелых металлов на речные системы Северной Евразии в условиях изменения климата» (проект 12-05-33090), «Закономерности изменения гидрологического состояния и режима рек при их слиянии и делении на рукава» (проект 12-05-00069) и другим проектам.

Научные результаты работы использованы при подготовке научных отчётов по грантам Президента Российской Федерации «Эрозионно-русловые системы и безопасность земле- и водопользования» (НШ-1010.2014.5), «Природные и техногенные закономерности изменения стока наносов по длине речных систем» (МК-2857.2012.5); Русского Географического Общества «Экспедиция Селенга–Байкал» (2011–2014 гг.).

Материалы работы использованы для выполнения договорных проектов «Мониторинг воздействия геологоразведочных работ и разработки россыпных месторождений платины на условия воспроизводства и состояние рыбных запасов в бассейне р. Вывенка» (2009, 2011 гг.), «Обеспечение экологического мониторинга и обоснование инженерных решений по снижению воздействия разработок россыпной платины на состояние водных экосистем в бассейне р. Вывенка» (2012, 2013 гг.).

Материалы и методы исследований. Изменчивость мутности воды изучена на 136 реках, протекающих в России и Монголии, относящихся к бассейнам Атлантического, Северного Ледовитого, Тихого океанов и Каспийского моря. В связи с редкими наблюдениями на сети Росгидромета в основу исходных материалов вошли данные, полученные в ходе экспедиций при участии автора, проведённые кафедрой гидрологии суши географического факультета МГУ, Всероссийским НИИ рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), Институтом экологии Волжского бассейна РАН (ИЭВБ РАН) в 2004–2014 гг. Часть данных получена при анализе архивных материалов научно-

исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов (НИЛЭПиРП) им. Н.И. Маккавеева МГУ и опубликованных источников.

Для обобщения исходной информации в работе применён метод географо-гидрологического анализа. Гидрологические расчёты и регрессионный анализ использовались при оценке применимости косвенных методов определения мутности и выявлении гидрологических закономерностей формирования мутности и стока взвешенных наносов. Математическое моделирование применялось при описании распределения мутности воды вдоль участков рек. Часть исходной информации получена с применением методов дистанционного зондирования Земли и обработана с помощью геоинформационных технологий.

Основные защищаемые положения:

1) современные методы определения мутности воды являются эффективным способом получения её массовых значений при соблюдении границ применимости и проведении калибровок, в частности для оптического метода установлены статистически значимые региональные регрессионные зависимости на реках России и Монголии;

2) мутность воды от истока к устью возрастает в межень и снижается в период повышенной водности. Эта закономерность нарушается главным образом при зарегулированности речного бассейна, несовпадении фаз водного режима на главной реке и её притоках, специфических условиях формирования стока наносов в бассейне реки (вулканические районы, проведение горных работ);

3) вертикальное распределение мутности воды в нижнем течении больших равнинных рек часто носит равномерный или обратный характер вне зависимости от фазы водного режима, при этом основным фактором изменения мутности по глубине служит транспортирующая способность потока. Распределение мутности по ширине рек зависит от морфодинамического типа русла и является нестабильным в период повышенной водности;

4) для описания и прогноза переноса взвешенных частиц в реках ниже техногенных источников их поступления получена формула продольного распределения мутности воды вдоль участков рек.

Степень достоверности и апробация результатов. Все исследования, проведенные в рамках диссертационного исследования, включая сбор, подготовку и анализ материалов, выполнены при соблюдении необходимых требований и методик [Методические..., 2002; Наставление..., 1975, 1978; Сток наносов..., 1977].

Результаты работы доложены на конференциях Международного географического союза IGU (Москва, 2015); «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» (Петрозаводск, 2015); «Объединение исследований в бассейне Байкала и Селенги» (Лейпциг, Германия, 2014; Женева, Швейцария, 2012); XII Международном симпозиуме по речным наносам ISRS (Киото, Япония, 2013); X Генеральной ассамблеи Европейского союза наук о Земле EGU (Вена, Австрия, 2013); XXVII пленарном совещании Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (Ижевск, 2012); IX научном семинаре молодых ученых высших учебных заведений, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Волгоград, 2012); VII Конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2009).

По теме диссертации опубликовано **26** научных работ, в том числе **3** статьи в научных журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 2 статьи в изданиях, индексируемых в системе цитирования *Web of Science*. Автором получено 2 патента на седиментационные ловушки.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы –

228 страниц, текст изложен на 194 страницах, включая 99 рисунков и 18 таблиц. Список литературы состоит из 232 наименований, в том числе 84 – на иностранных языках.

Автор останется навсегда благодарен своему Учителю профессору Николаю Ивановичу Алексеевскому за то, что привил интерес к науке, внимание и поддержку. Автор особо признателен за помощь в работе и организацию исследований д.г.н., проф. Н.Л. Фроловой, д.б.н., проф. Т.Д. Зинченко, к.г.н. С.Р. Чалову, академику РАН Н.С. Касимову, Л.А. Анисимовой, А.В. Улатову и другим сотрудникам и выпускникам МГУ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, указана степень её разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая значимость диссертации, даны сведения об исходных материалах и методах исследования, представлены основные защищаемые положения, указана степень достоверности и апробация результатов работы.

В **главе 1** рассмотрены основные факторы формирования мутности и гранулометрического состава взвешенных наносов, изучены гидравлические условия их перемещения, изложены основные положения диффузионной теории движения взвешенных частиц, которой придерживается автор в работе.

Мутность воды S – основная характеристика стока взвешенных наносов, которая даёт представление о содержании в воде взвешенных минеральных частиц при данных гидрологических условиях [Шамов, 1959; Караушев, 1977; Сток наносов..., 1977; Россинский, Дебольский, 1980; Алексеевский, 1998; 2006; Knighton, 1998].

К относительно быстрым изменениям мутности воды отнесены её флуктуации, вызванные динамикой вихревых турбулентных образований, переносом взвешенных минеральных частиц по глубине, ширине потока, их изменением вдоль участков рек в ритмике суточной, синоптической и в пределах фаз водного режима вариацией интенсивности эрозионно-

аккумулятивных, гравитационных и других процессов на поверхности водосборов и на склонах речных долин. Такой тип временной изменчивости мутности прослеживается в разных пространственных масштабах гидрологических событий.

Распределение мутности воды в потоке описывается уравнением турбулентной диффузии взвешенных частиц [Маккавеев, 1931; Караушев, 1977]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) - \left(v \frac{\partial S}{\partial x} + u \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \omega \frac{\partial S}{\partial y}, \quad (1)$$

где A – коэффициент турбулентного обмена, u , v , w – составляющие вектора местной скорости, x , y , z – продольная, вертикальная (возрастает от поверхности воды ко дну) и поперечная пространственные координаты соответственно, ω – гидравлическая крупность взвешенных частиц. Первый член в правой части уравнения определяет изменение величины S в связи с турбулентным перемещением минеральных частиц. Второй член характеризует изменение мутности под влиянием продольного (адвекции), поперечного (дисперсии) и вертикального (конвекции) переноса взвешенных частиц. Последний член уравнения (1) отражает влияние силы тяжести на величину S .

Влияние продольного переноса взвешенных наносов на изменения мутности воды в течение различных фаз водного режима наиболее чётко проявляется при анализе изменения характеристик стока наносов по длине протяженных участков рек. Изменение мутности на участках рек в этом случае определяется соотношением фактической её величины и мутности, соответствующей транспортирующей способности потока, которая зависит от особенностей его гидравлического состояния. Роль процессов, определяющих неравномерность распределения мутности по ширине и глубине рек, при этом пренебрежимо мала.

Величина мутности в локальных точках потока изменяется в зависимости от поступления взвешенных частиц на участок реки, их распределения в поперечном сечении русла, а также от гидравлического состояния водной

толщи. При прочих равных условиях глубина и скорость потока влияет на скорость осаждения минеральных частиц, возможность их устойчивого (неустойчивого) взвешивания, что и определяет содержание этих частиц на определенном горизонте, начиная от поверхности воды (дна).

Во второй главе дана гидролого-географическая характеристика исследованных объектов, описаны условия формирования мутности воды на изученных реках России и Монголии в зависимости от сочетания физико-географических факторов, связанных с особенностями развития эрозионных процессов на водосборе и в речном потоке.

Соотношение характера рельефа, типа растительности и климатических особенностей определяют интенсивность поступления минеральных частиц с поверхности речного бассейна [Krumbein, Sloss, 1963; Сток наносов..., 1977; Аллисон, Палмер, 1984; Дедков, Мозжерин, 1984; Эрозионные..., 1984; Голосов, 2006]. В общем случае мутность воды в реках выше для районов с горным рельефом, слабым растительным покровом, интенсивными осадками. Им соответствуют реки Большого Кавказа; юга Европейской части России (ЕЧР), Сибири и Дальнего Востока; вулканических районов Камчатки. Содержание взвешенных наносов уменьшается на равнинных реках, в районах с хорошей задернованностью почв или малым количеством осадков (реки на севере и в центре ЕЧР, на севере Сибири, невулканический районы Камчатки). Среднегодовая фоновая мутность для изученных рек изменяется в широком диапазоне от значений менее 10 г/м^3 (реки Кольского полуострова, севера Камчатки) до $S > 1000 \text{ г/м}^3$ (в бассейне Терека и на склонах вулканов) [Гидрологический режим..., 1977; Сток наносов..., 1977; Куксина, 2013] (рис. 1).

Сток воды определяет изменение мутности в речном потоке. В целом для рек в одинаковых физико-географических условиях содержание взвешенных наносов оказывается выше в реке с бóльшей водностью. В масштабах одной реки смена фаз водного режима определяет временную изменчивость мутности.



Рисунок 1 – Расположение исследуемых районов с участками рек, где проводились измерения мутности воды (красные точки), и среднегодовая мутность рек: 1) < 10, 2) 10–25, 3) < 25, 4) 25–50, 5) < 50, 6) 50–100, 7) 100–250, 8) 250–500, 9) 500–1000, 10) 1000–2500, 11) 2500–5000 г/м³ [Сток наносов..., 1977], для бассейна Селенги по данным [Гидрологический режим..., 1977], для рек Камчатки по данным [Куксина, 2013]

На локальных участках рек антропогенное воздействие, как правило, приводит к увеличению мутности [Дегтярев и др., 2001; Алексеевский и др., 2010; Syvitski, Kettner, 2011] в связи с изменением условий поступления минеральных частиц с водосборов и при сбросе вод, использованных при хозяйственной деятельности.

В 3 главе проведён анализ современных методов определения мутности воды, основанных на отражении взвешенными частицами электромагнитных волн. Эта особенность используется во всех разновидностях метода: оптический (фотометрический), основанный на применении мутномеров, турбидиметров, нефелометров; акустический (использование доплеровских профилографов), дистанционный (на основе анализа аэрокосмических снимков Земли), лазерный (при применении лазерных дифрактометров) и др. Главное их достоинство – оперативность, возможность измерять мутность воды сравнительно быстро. Основной недостаток косвенных методов – получение значений мутности воды в относительных единицах. Для его преодоления необходимо создание калибровочных зависимостей, связывающих значения мутностей, полученных с помощью прямого и косвенного методов измерений.

Определение мутности воды на основе оптических методов T (НТУ, NTU) требует обоснования тарировочными региональными зависимостями, обусловленными спецификой сочетания факторов формирования стока наносов в речных бассейнах. На основе анализа данных одновременного измерения мутности воды оптическим и гравиметрическим (весовым) способами на участках более 100 рек России и Монголии выявлено, что зависимости между этими величинами имеют линейный характер:

$$S = a + bT. \quad (2)$$

Такие зависимости являются функцией физико-географических (природная зона, размер и тип реки, фаза водного режима) и антропогенных (освоенность водосбора) факторов. В результате анализа и обобщения накопленной информации выделено 9 групп рек отличающихся по

особенностям формирования мутности и величинам коэффициентов a , b в уравнении (2) (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1 – Параметры зависимости (2) для характерных групп рек России и Монголии

Номер группы рек	Тип рек	Параметры				Диапазон мутности		Средний диаметр взвешенных частиц d , мм
		b	a	r	n^*	S , г/м ³	T , НТУ	
1	Средние и малые реки горных областей восточного побережья Камчатки и Черноморского побережья Кавказа с сильной антропогенной деятельностью на водосборе	0,70	2,24	0,95	98	0,18–2690	0,12–3282	0,02
2	Средние и малые реки зоны тундры и лесотундры Сибири	0,85	1,78	0,89	30	0,60–16,2	0,30–21,0	–
3	Большие равнинные реки лесной зоны ЕЧР	0,86	6,72	0,92	61	4,00–107	1,00–112	0,09
4	Малые реки Черноморского побережья Кавказа	0,91	3,65	0,97	32	1,92–137	0,97–164	0,10
5	Большие и средние реки степной зоны Восточной Сибири	1,03	1,45	0,99	91	1,43–2850	0,63–2667	0,06
6	Средние и малые равнинные реки лесной и лесостепной зоны ЕЧР	1,07	5,09	0,96	79	2,25–115	1,60–107	0,17
7	Большие, средние и малые равнинные реки лесной зоны и лесотундры в условиях ледостава	2,44	–2,03	0,92	46	0,58–116	0,46–38,5	0,34
8	Малые реки зоны степей Восточной Сибири и полупустынь ЕЧР	4,55	–2,91	0,94	36	0,93–314	0,53–53,8	0,25
9	Средние и малые реки вулканических районов Камчатки	4,96	87,3	0,86	51	0,58–6700	0,46–1347	0,44

Примечание: n – число точек, в которых одновременно проводились измерения S и T .

Для региональных зависимостей 1–9 (табл. 1) коэффициент b возрастает при увеличении среднего диаметра взвешенных частиц d , коэффициент a зависит от скорости течения и возрастает при увеличении содержания в воде органических взвешенных соединений. Оптические методы оперативного определения мутности речных вод эффективны при необходимости получения

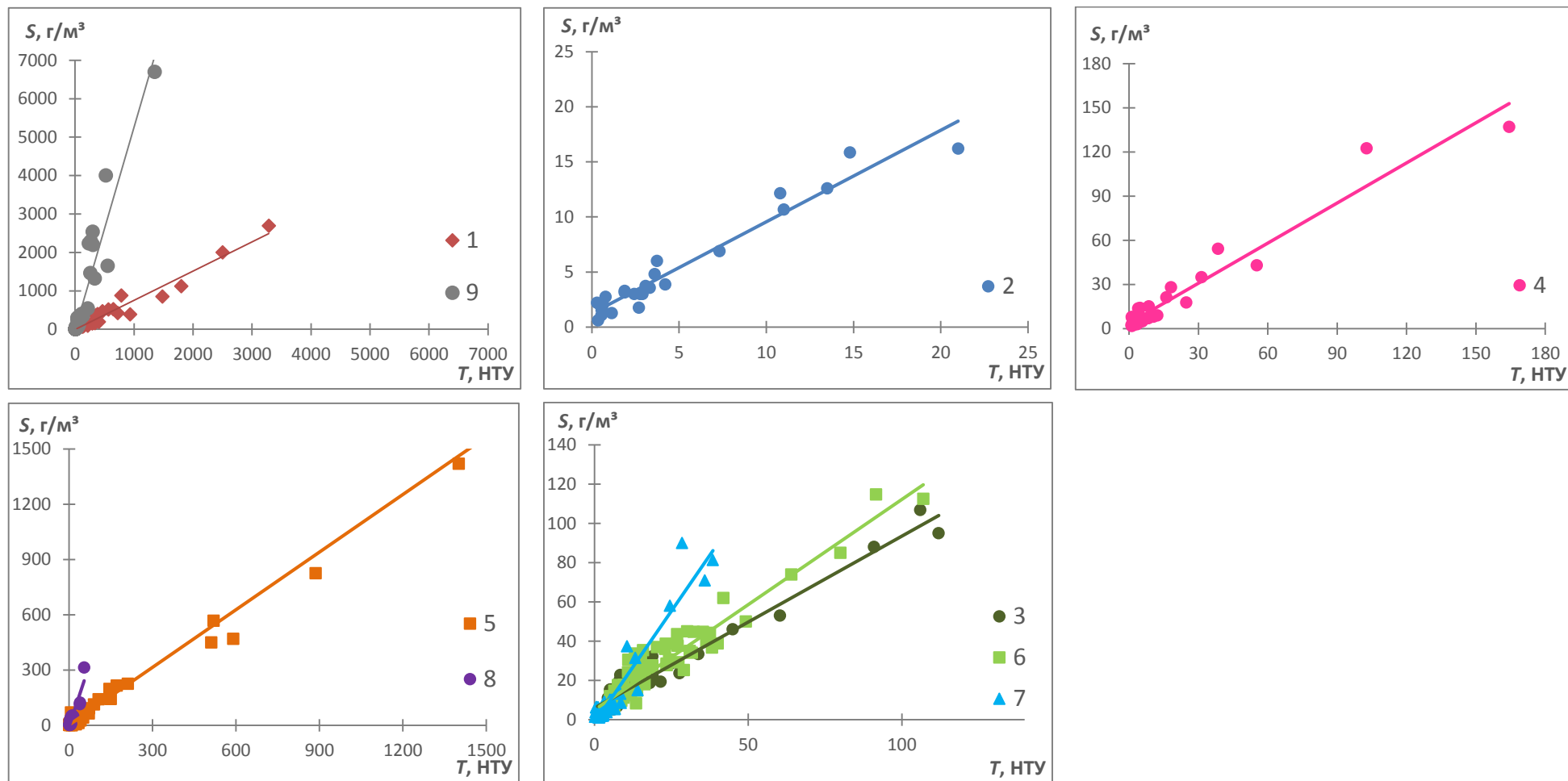


Рисунок 2 – Региональные (1–9) зависимости $S = f(T)$ между весовой S и оптической T мутностями (нумерация групп соответствует таблице 1)

массовых данных о мутности за относительно короткое время и для большого числа водных объектов.

Акустический и лазерный методы определения мутности требуют накопления бóльшего объёма материалов для обоснования достоверных калибровочных зависимостей. Это относится и к перспективам внедрения в гидрометрическую практику дистанционного метода. Увеличение разрешения космических снимков ускорит процесс массового использования дистанционного метода для сбора качественной информации о мутности воды в большом числе водных объектов в пределах заданной территории.

В четвёртой главе изучены закономерности локальных изменений мутности воды по глубине и ширине рек, определены особенности осаждения взвешенных наносов на участках рек. Фактическое распределение взвешенных частиц по глубине потока сопоставлялось с теоретическими эпюрами мутности А.В. Караушева, В.М. Маккавеева, М.А. Великанова – Х. Рауза [Караушев, 1977; Алексеевский, 2006]. Закономерности вертикального распределения мутности воды по глубине рек наиболее детально изучены в бассейне Селенги (121 вертикаль) и в нижнем течении Мезени (146 вертикалей). Выявлено, что вне зависимости от фазы водного режима в 25–50 % случаев мутность воды распределена равномерно по глубине потока, почти в трети случаев эпюра мутности имеет обратный вид (содержание взвешенных наносов уменьшается с глубиной) (**рис. 3**). Это обусловлено превышением вертикальной составляющей пульсационной скорости течения над гидравлической крупностью взвешенных частиц, что отвечает условиям их устойчивого взвешивания [Караушев, 1977]. Классические эпюры мутности воды характерны преимущественно для частной мутности, сформированной песчаными фракциями. В общем случае вертикальное распределение мутности зависит от распределения процессов осаждения и взвешивания частиц.

Закономерности массообмена между потоком и русловыми отложениями изучены с помощью седиментационных ловушек на различных участках рек в бассейнах Оки, Селенги и Вывенки (Камчатка). При увеличении относительной

глубины и снижения продольных скоростей потока происходит рост роли силы тяжести в осаждении частиц. С увеличением продольных компонент скорости интенсивность осаждения взвешенных частиц на дно снижается, т.к. возрастает роль турбулентного переноса и увеличивается их транзит.

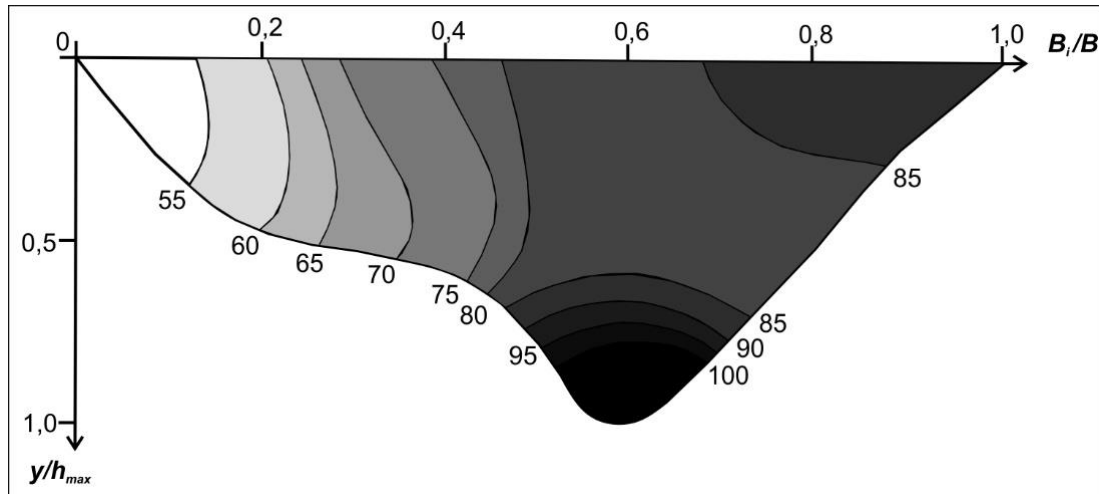


Рисунок 3 – Изменение мутности воды в поперечном сечении нижнего течения р. Джида в паводки (B_i – расстояние от левого берега, $B = 100$ м – ширина реки, $h_{max} = 2$ м – максимальная глубина реки, y – глубина горизонта)

Распределение осреднённой по глубине потока мутности по ширине потока детально исследовано для 152 створов в бассейнах рек Мезени, Москвы, Сока, Дона и Селенги. В 43 % случаев распределение мутности воды по ширине реки зависит от скорости течения и соответствует условиям её уменьшения от стрежня потока к берегам, в наибольшей степени это выражено для участков с высокой мутностью и мелкофракционным составом. Для остальных случаев эта закономерность нарушается в связи с локальными факторами. Исследования при прохождении пика половодья в нижнем течении р. Москвы показали, что в одном и том же створе распределение мутности воды по ширине реки изменяется во времени (**рис. 4**). Наибольшие мутности на стрежне потока наблюдаются в условиях относительно стабильного стока воды и на максимуме нарастания расходов воды. В период подъёма и спада половодья мутность воды у берегов превышает значения на стрежне. Это связано с интенсификацией их размыва и последующими процессами перераспределения взвешенных частиц под влиянием поперечного

турбулентного переноса. Особенности изменения мутности воды зависят от морфометрии русла. Морфодинамический тип русла (разветвлённые, меандрирующие участки), морфометрические особенности (узлы слияния, чередование плёсов и перекатов) способствуют неравномерному распределению мутности по ширине потока, на участках единого русла взвешенные частицы в потоке распределяются более равномерно.

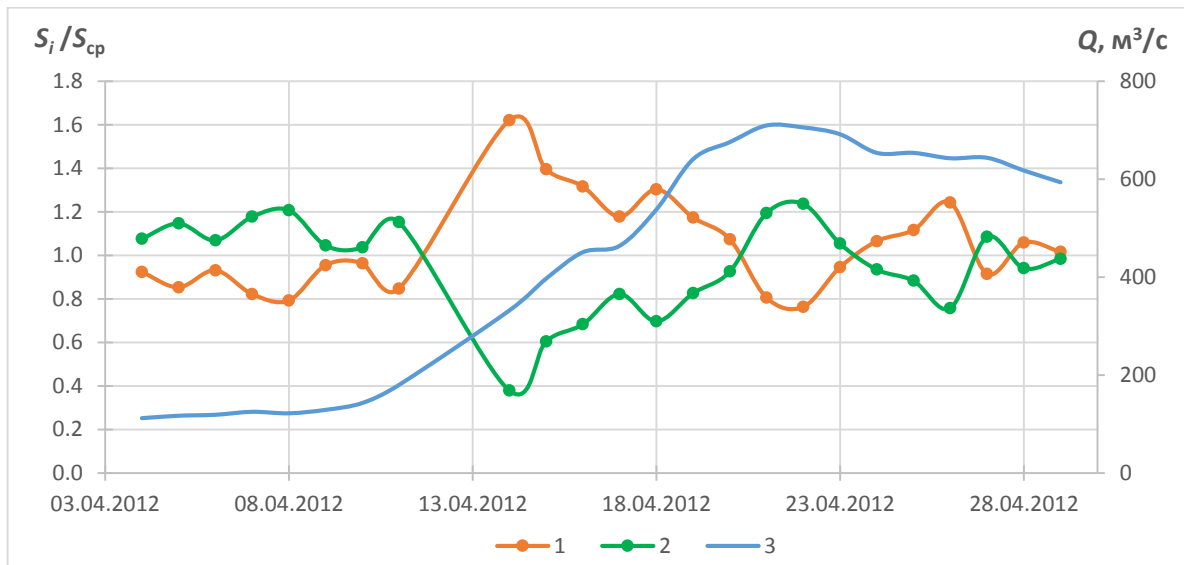
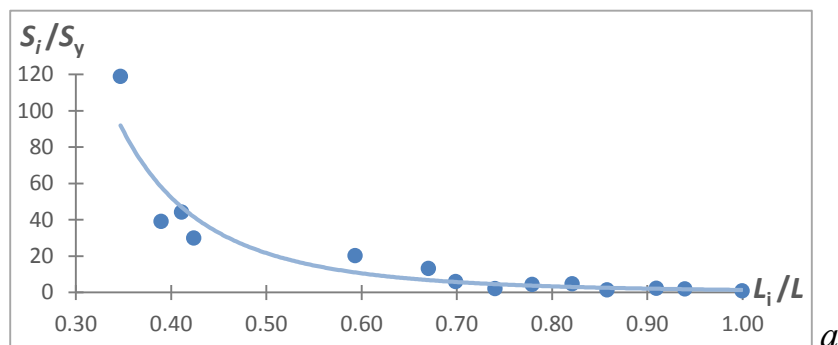


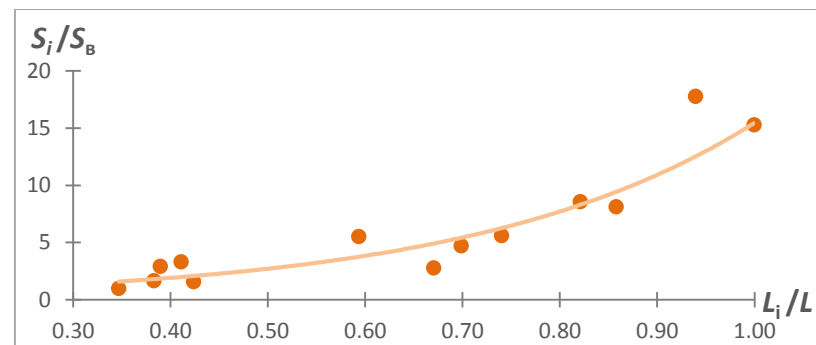
Рисунок 4 – Изменение по ширине потока мутности воды, осреднённой по глубине (1 – у правого берега, 2 – на стрежне), и расхода воды Q (3) в период половодья на р. Москва, п. Северка (S_i – средняя мутность на вертикали, S_{cp} – средняя мутность в поперечном сечении реки, за исследуемый период средняя мутность составила 22,2 г/м³)

В 5 главе рассмотрены закономерности изменения мутности воды и стока взвешенных наносов по длине рек в различных природных и техногенных условиях.

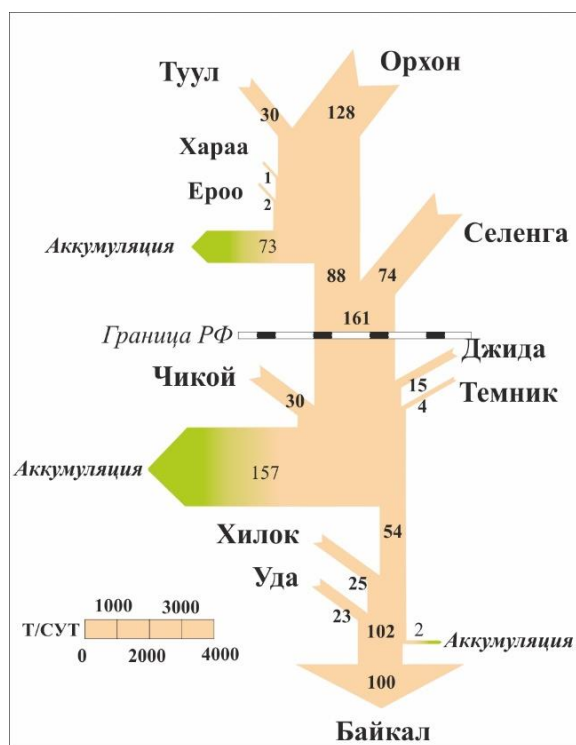
По длине Селенги (большой незарегулированной реки) увеличение мутности воды в период повышенного стока вызвано поступлением частиц бассейнового генезиса. Вдоль реки содержание взвешенных наносов убывает в 120 раз (рис. 5 а, в). В межень, наоборот, в результате размыва русловых отложений и впадения притоков, на которых фазы водного режима могут не совпадать с главной рекой, мутность воды возрастает от истока к устью в 15 раз (рис. 5 б, г). Эта закономерность нарушается на локальных участках рек вследствие изменения транспортирующей способности потока и наличия дополнительных источников наносов.



a



б



в



г

Рисунок 5 – Изменение относительной мутности воды по длине речной системы Орхон–Селенга в период: *а*) дождевых паводков (июль–август 2011 г.) ($S_y = 10,6 \text{ г/м}^3$ – мутность воды в вершине дельты); *б*) летней межени (июнь 2012 г.) ($S_b = 4,20 \text{ г/м}^3$ – мутность воды в верхнем течении; $L = 1546 \text{ км}$ – длина реки; S_i – мутность в створе, находящемся на расстоянии L_i от истока). Изменение стока взвешенных наносов в бассейне Селенги *в*) в паводочный период года, *г*) в межень (в абсолютных значениях, т/сут и в % от величины в вершине дельты)

В условиях маловодья изменчивость мутности зависит исключительно от транспортирующей способности потока, что изучено на примере малых и средних рек Нижнего Поволжья. Содержание взвешенных наносов вдоль рек закономерно увеличивается при нарастании стока воды за счёт впадения притоков и дренирования подземных водоносных горизонтов. На реках зарегулированных небольшими водохранилищами и прудами такой зависимости не выявлено. На малых реках аридной зоны (бассейн оз. Эльтон) в условиях экстремально низкой межени на продольный перенос взвешенных наносов влияют местные факторы: подпор от озера, сгонно-нагонные явления в связи с сильными ветрами, уменьшение уклонов.

Мутность воды по длине рек вулканических районов Камчатки формируется за счёт взаимодействия водного потока и рыхлых вулканогенных отложений. В результате на реках наблюдаются циклические потери стока на инфильтрацию, обуславливающие изменение мутности воды во времени с периодичностью в несколько минут. В связи со специфическими условиями формирования стока наносов в таких районах [Кукулина, 2013] мутность воды вдоль рек распределяется крайне неравномерно.

На участках рек ниже сброса вод, использованных при хозяйственной деятельности, наблюдается значительное изменение мутности воды и стока взвешенных наносов W_R по сравнению с фоновыми величинами. В районах проведения горных работ к количеству минеральных частиц в речной воде, формирующихся в природных условиях $W_{Рест}$, добавляются взвешенные частицы, поступающие в реки вследствие размыва руслоотводов $W_{Ррус}$, склоновой эрозии с отвалов $W_{Рскл}$, просачивания вод из технологических водоёмов $W_{Ртехн}$ и сброса отработанных сточных вод $W_{Рсб}$:

$$W_{Рест} + W_{Ррус} + W_{Рскл} + W_{Ртехн} + W_{Рсб} - W_{Рак} = W_R. \quad (3)$$

Большинство составляющих уравнения (3) обуславливают увеличение W_R по длине реки. Лишь величина $W_{Рак}$, определяющая количество взвешенных частиц, переходящих в состав русловых отложений, имеет противоположное значение для W_R . Величина W_R на выходе с участка производства открытых

горных работ обычно больше по сравнению с её значениями на верхней границе участка реки.

Техногенные стоки с территории россыпных месторождений в бассейне Селенги (реки Туул, Бороо) и Вывенки (реки Левтыринываям, Пенистый) обуславливают сезонное превышение фоновой мутности воды в 1,6 – 3,3 раза в межень и в 2,7–8,8 раза в паводки (**табл. 2**). Поступление сточных вод с открытых разработок угля в бассейне Селенги вызывает превышение фоновой мутности до 37 раз. Сооружение траншеи для закладки трубопровода через русло р. Авачи (Камчатка) вызывает эпизодическое воздействие на мутность речных вод. Количество взвешенных минеральных частиц, поступающих в поток в этом случае, превышает фоновые значения более чем в 200 раз, их основная часть, обусловленная крупными фракциями (песок и крупнее), вновь переходит в состав русловых отложений на расстоянии около 200–700 м от источника наносов. Оба вида техногенного воздействия приводят к поступлению большого количества илисто-глинистых частиц в реки, которые переносятся транзитом на большие расстояния (**рис. 6**).

Таблица 2 – Изменение мутности речных вод ниже участков разработки месторождений россыпных благородных металлов

Река, месторождение	Фаза водного режима	L_i/L				S_{max}/S_{ϕ}	L , км
		0	0,24	0,35-0,77	1		
		S_{ϕ} , г/м³	S_i , г/м³				
Туул, «Заамар»	Летние паводки	107	108	289	184	2,7	127
	Летняя межень	84,8	100	136	77,1	1,6	
Бороо, «Бороо Гоулд»	Летние паводки	24,3	–	–	212	8,8	64,0
	Летняя межень	39,2	–	–	64,2	1,6	
Левтыринываям, «Левтыринываям»	Летняя межень	7,01	7,07	21,8	23,2	3,3	3,28
Пенистый, «Левтыринываям»	Летняя межень	6,51	4,77	20,5	21,4	3,3	8,92

Примечание: S_{ϕ} – фоновая мутность воды, S_{max} – максимальная мутность воды, S_i – мутность воды в некотором створе, L_i – расстояние от начала участка до места расположения створа, L – длина от начала участка до устья.

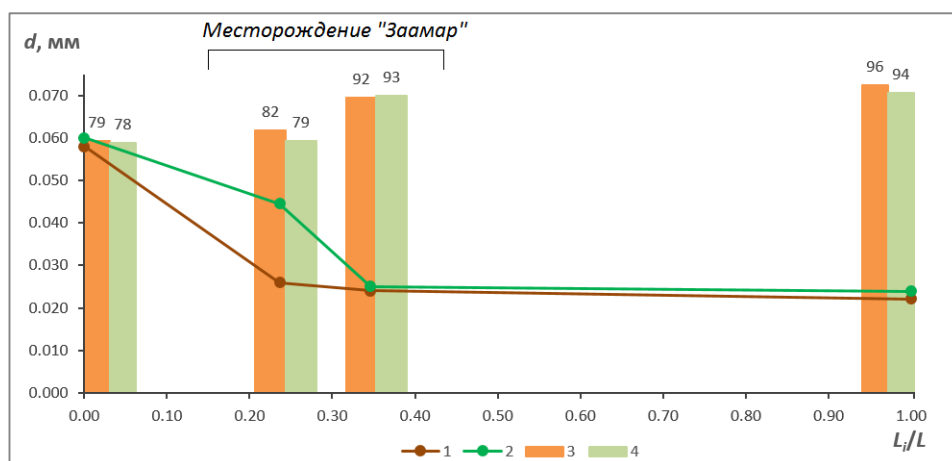


Рисунок 6 – Изменение крупности d и содержания в воде бассейновых фракций (крупностью менее 0,05 мм) (%) природного и антропогенного происхождения (1, 3 – в паводки, 2, 4 – в межень) в составе взвешенных наносов в нижнем течении р. Туул (L_i – расстояние от начала участка до створа; L – длина от начала исследуемого участка до устья)

В шестой главе представлена математическая модель продольного распределения мутности воды вдоль участков рек, исследована возможность её применения ниже техногенных источников поступления взвешенных наносов.

Получено аналитическое решение распределения осреднённой в поперечном сечении мутности воды на основе уравнения турбулентной диффузии взвешенных частиц (1) при её установившемся режиме ($\partial S / \partial t = 0$):

$$S(x) = S_0 e^{-\frac{c}{h} \left(\frac{\omega}{v_{cp}} \right)^2 x}, \quad (4)$$

где $c = \frac{2mC_{ш}}{g} \approx 4,88C_{ш}$, $m = 24$ – параметр параболы Базена по Буссинеску [Маккавеев, 1931; Караушев, 1977], $C_{ш}$ – коэффициент Шези, S_0 – начальная мутность на верхней границе участка, h – глубина потока, v_{cp} – средняя скорость течения.

Поскольку взвешенные наносы в потоке представлены частицами разного диаметра и переносятся на различное расстояние от начального створа, то расчёт продольного переноса мутности по формуле (4) целесообразно вести отдельно для частиц i -й фракции, которые формируют частную мутность s_i . В итоге, с учётом зависимости $s_{i0,1,2,...,n} = f(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, где n – число фракций, общая искомая мутность определяется по уравнению [Алексеевский, 2006]

$$S = \sum_{i=1}^n s_i. \quad (5)$$

Моделирование продольного распределения мутности воды ниже хозяйственных объектов, являющихся источником дополнительной мутности в реках, проведено для участков горных работ в бассейнах Селенги и Вывенки (рис. 7) и ниже сооружение траншеи трубопровода через р. Авачу, точность расчётов изменяется от 3 до 31 %.

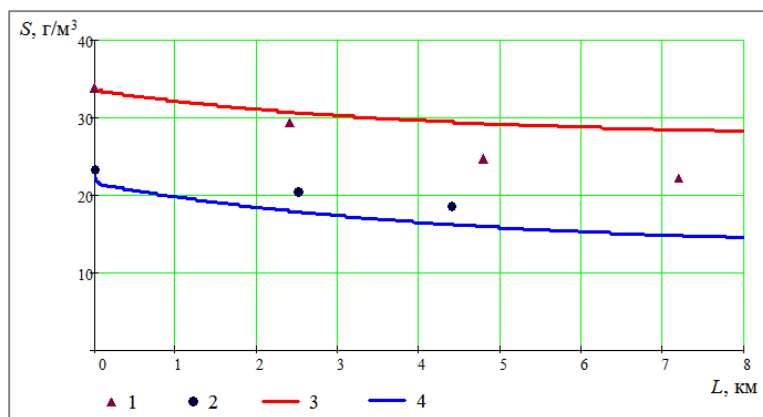


Рисунок 7 – Изменение фактической (1, 2) и расчётной мутности (3, 4) по длине L р. Левтыринываям при интенсивной добыче платины (1, 3) и при её снижении (2, 4)

Разработанный алгоритм расчёта распределения осреднённой в поперечном сечении мутности воды вдоль рек перспективен для оценки и прогноза хозяйственной нагрузки на водотоки. Он позволяет получать серии номограмм для прогнозирования характера распределения мутности воды в реке в зависимости от режима техногенного воздействия (рис. 8).

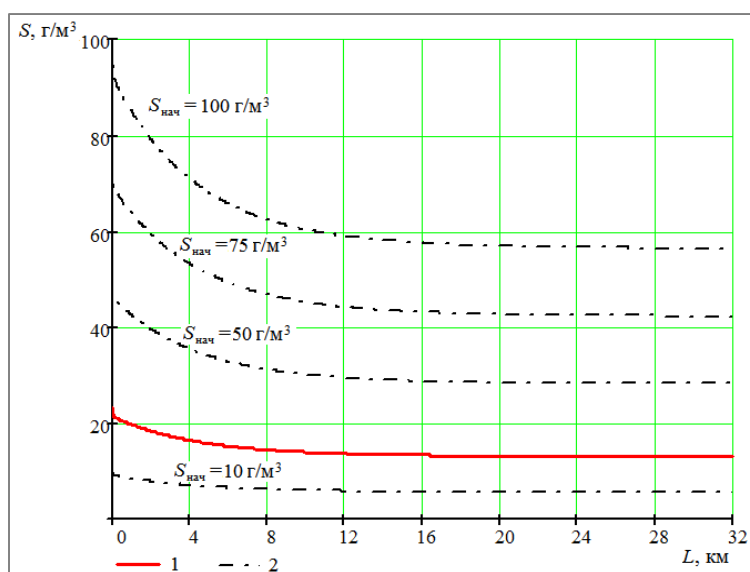


Рисунок 8 – Изменение расчётной фактической (1) и прогнозной (2) мутности при постоянном гранулометрическом составе взвешенных частиц по длине L р. Левтыринываям в условиях снижения добычи россыпной платины

В заключении сформулированы основные *выводы*.

1. Применение современных косвенных методов определения мутности воды выявило, что они обеспечивают возможность оперативного определения этой характеристики на реках разных размеров, и протекающих в разных природных условиях, при наличии соответствующих калибровочных зависимостей, позволяющих переходить от косвенных оценок содержания в воде взвешенных наносов к весовым.

2. Использование оптического метода определения мутности воды эффективно при необходимости проведения массовых измерений за короткий промежуток времени. Определено, что для российских и монгольских рек применение этого метода мониторинга ограничено мутностью $2,85 \text{ кг/м}^3$, для вулканических районов – $6,70 \text{ кг/м}^3$. В разных ландшафтных зонах переход от оптической мутности к весовой можно производить по линейному уравнению с эмпирическими коэффициентами, числовые значения которых зависят от крупности взвешенных наносов и содержания в воде взвешенных органических примесей. Полученные региональные зависимости перспективно применять для перехода от оптической мутности к весовой для рек, протекающих в аналогичных условиях формирования стока взвешенных наносов.

3. Вертикальное распределение мутности в разные фазы водного режима в нижнем течении больших равнинных рек в 25–50 % случаев имеет равномерный вид и почти в 30 % случаев носит обратный характер (уменьшается с глубиной). Закономерное увеличение содержания взвешенных наносов в потоке к поверхности дна выражено только для крупных частиц. Такое распределение может наблюдаться на отдельных створах по ширине реки или характерно для всего поперечного сечения. Исследование процессов осаждения взвешенных частиц в реках с помощью седиментационных ловушек подтвердило, что оно зависит от транспортирующей способности потока: интенсивность осаждения возрастает при увеличении относительной глубины потока, мутности воды, крупности взвешенных минеральных частиц и

уменьшается при увеличении скоростей течения, определяющих роль турбулентного переноса.

4. Изменение содержания взвешенных наносов по ширине реки зависит от распределения скоростей водного потока, уменьшаясь от стрежня к берегам, что наиболее выражено в период повышенного стока, для которого характерны высокое содержание и мелкофракционный состав взвешенных частиц. В межень отличия мутности по ширине рек выражены относительно слабо. К основным факторам неравномерного поперечного распределения мутности относятся повышение водности реки и морфодинамический тип русла (в частности, русловая многорукавность препятствует смешению вод; на участках неразветвлённого русла перемешивание происходит интенсивнее).

5. Изменение мутности воды по длине рек зависит от интенсивности поступления наносов с поверхности речных бассейнов и из русловой сети. В период повышенного стока относительно высокое содержание в воде взвешенных наносов обусловлено притоком частиц бассейнового генезиса. Оно убывает от верхних к нижним звеньям речных систем. В межень мутность воды в основном зависит от боковой приточности, массообмена между потоком, с одной стороны, и русловыми и пойменными отложениями, с другой. Содержание взвешенных наносов в этом случае возрастает от истока к устью рек. Зарегулированность бассейна даже малыми водохранилищами, одновременное прохождение паводков на главной реке и притоках, особые условия формирования стока наносов в бассейнах рек (в вулканических районах), нарушают такую закономерность.

6. Ниже хозяйственных объектов наблюдается значительное изменение мутности воды по сравнению с фоновой. На локальных участках рек и при непрерывном поступлении в поток техногенных частиц сезонное превышение фоновой мутности воды ниже участков разработки россыпных месторождений составляет 1,6–8,8 раз в зависимости от размера реки и фазы водного режима. При эпизодическом воздействии (сооружение траншеи для закладки трубопровода), связанным со взмучиванием донных отложений, оно достигает

200 раз и больше. Частная мутность воды, обусловленная наличием в потоке крупных частиц, приближается к фоновым значениям на расстоянии около 200–700 м от источника поступления наносов. Техногенные частицы, представленные фракциями ила и глины, переносятся транзитом на большие расстояния.

7. Разработана математическая модель продольного распределения мутности воды в реках ниже источников поступления взвешенных наносов. Её эффективность проверена для условий проведения горных работ и сооружения траншеи трубопровода на Камчатке и в монгольской части бассейна Селенги. Применение модели обеспечивает точность расчетов в диапазоне 3–31 %, и целесообразно для оценки хозяйственной деятельности на мутность речных вод. Перспективной задачей дальнейших исследований является разработка модели для неустановившегося режима мутности и её решение с помощью численных методов.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. **Белозёрова Е.В.**, Чалов С.Р. Определение содержания взвешенных частиц в речных водах оптическими методами // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2013. – № 6. – С. 39–45.
2. Алексеевский Н.И., **Белозёрова Е.В.**, Касимов Н.С., Чалов С.Р. Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2013. – № 3. – С. 60–65.
3. Чалов С.Р., Школьный Д.И., **Промасова (Белозёрова) Е.В.**, Леман В.Н., Романченко А.О. Формирование стока наносов в районах открытых разработок россыпных месторождений // География и природные ресурсы. – 2015. – № 2. – С. 22–30.

Публикации в рецензируемых журналах и сборниках:

4. Thorslund J., Jarsjö J., Chalov S., **Belozerova E.** Gold mining impact on riverine heavy metal transport in a sparsely monitored region: the upper Lake Baikal Basin case // Journal of Environmental Monitoring. – 2012. – № 14. – P. 2780–2792.
5. Chalov S.R., Zavadsky A.S., **Belozerova E.V.**, Bulacheva M.P., Jarsjö J., Thorslund J., Yamkhin J. Suspended and dissolved matter fluxes in the upper Selenga River Basin: synthesis // Geography, Environment, Sustainability. – 2012. – Vol. 2. – № 5. – P. 78–94.

6. Chalov S., Kasimov N., Lychagin M., Alexeevsky N., **Belozerova E.**, Shinkareva G., Theuring P., Romanchenko A., Garmaev E. Water resources assessment of the Selenga-Baikal river system // *Geo-öko.* – 2013. – № XXXIV. – P. 77–102.

7. Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N., Romanchenko A., Pietron J., Thorslund J., **Promakhova E.** Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga river basin, Mongolia and Russia // *Environmental Earth Sciences.* – 2015. – Vol. 73. – № 2. – P. 663–680.

8. Чалов С.Р., **Белозёрова Е.В.** Оптическое измерение мутности в исследовании русловых процессов // Двадцать пятое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – Астрахань: Астраханский университет, 2010. – С. 205–206.

9. **Белозёрова Е.В.** Современные методы измерения мутности вод // Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность: сборник трудов шестой международной научной конференции молодых учёных и талантливых студентов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных проблем РАН. – М.: ИВП РАН, 2012. – С. 74–76.

10. **Белозёрова Е.В.** Транспорт взвешенных наносов рек бассейна Селенги // Общие и методические проблемы эрозии- и русловедения. – М.: Планета, 2012. – С. 24–31.

11. Чалов С.Р., **Белозёрова Е.В.**, Пунтцагбалжир Н. Пространственная изменчивость состава взвешенных наносов бассейна Селенги // Двадцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – Ижевск: Удмуртский университет, 2012. – С. 197–199.

12. Чалов С.Р., **Белозёрова Е.В.**, Гладкова М.В. Мониторинг мутности поверхностных вод с помощью методов дистанционного зондирования // Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление. – М.: ИВП РАН – кафедра гидрологии суши МГУ, 2012. – С. 260–273.

13. Chalov S.R., Alexeevsky N.I., **Belozerova E.V.**, Theuring P., Karthe D., Garmaev E.G. Monitoring and modeling of sediment transport in Selenga transboundary // *Conference Proceedings Sediment transport modeling in hydrological watersheds and rivers.* – Istanbul (Turkey), 2012. – P. 205–212.

14. Karthe D., Chalov S., Theuring P., **Belozerova E.** Integration meso- und makroskaliger Ansätze zum Wasserressourcen-Monitoring und Management im Baikal-Selenga-Einzugsgebiet // *Beiträge zum 44. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie 2012.* – Lunz am See (Österreich), 2012. – S. 95–99.

15. Чалов С.Р., Лычагин М.Ю., **Белозёрова Е.В.**, Завадский А.С., Николаев И.В. Оценка стока речных наносов р. Селенги: трансграничный аспект // *Маккавеевские чтения – 2012.* – М.: Географ. ф-т МГУ, 2013. – С. 43–59.

16. Alexeevsky N., Chalov S., Kasimov N., **Belozerova E.** Sediment budget of the scarce monitored transboundary Selenga river system // *Advances in River Sediment Research.* – London (United Kingdom): Taylor & Francis Group London, 2013. – P. 193. (4 p. on CD-ROM).

17. Chalov S., **Belozerova E.**, Shkolny D., Romanchenko A., Piotrovsky A. Sediment transfer in the extreme volcanic environment (case study of the Kamchatka peninsula) // *Advances in River Sediment Research.* – London (United Kingdom): Taylor & Francis Group London, 2013. – P. 73. (4 p. on CD-ROM).

18. Karthe D., Chalov S., Theuring P., **Belozerova E.** Integration of meso- and macroscale approaches for water resources monitoring and management in the Baikal-Selenga-basin // Beitrage zum 44. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie. Geographica Augustana – Augsburg (Germany): Geographica Augustana, 2013. – P. 90–94.

19. Шинкарева Г.Л., **Промахова Е.В.** Изменение потоков тяжелых металлов в бассейне реки Селенги в связи с горнорудной деятельностью // Эрозионные и русловые процессы и современные методы их исследования. – Белгород: ЛитКараВан, 2014. – С. 222–227.

20. Chalov S., Mouri G., Shkolny D., Tsyplenkov A., **Belozerova E.** Sediment transfer in the extreme volcanic environment (case study of the Kamchatka peninsula) // Engineering for green development. – М.: MSU Publishers, 2014. – P. 160–164.

21. Чалов С.Р., Школьный Д.И., **Промахова Е.В.**, Кукулина Л.В., Романченко А.О., Цыпленков А.С. Формирование стока наносов в районах открытых разработок россыпей // Эрозия почв и русловые процессы. Т. 19. – М.: Географ. ф-т МГУ, 2015. – С. 236–260.

22. **Промахова Е.В.**, Чалов С.Р. Современные технологии определения мутности воды // Маккавеевские чтения – 2014. – М.: Географ. ф-т МГУ, 2015. – С. 82–94.

23. Алексеевский Н.И., **Промахова Е.В.**, Романченко А.О., Чалов С.Р. Мониторинг техногенных изменений мутности речных вод и их гидроэкологический анализ // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»: Сборник научных трудов. Т. 1. – Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2015. – С. 216–222.

24. **Promakhova E.**, Alexeevsky N. Source to sink: water and sediment transport in the Selenga-Baikal catchment // Water and Environment in the Selenga Baikal Basin: International Research Cooperation for an Ecoregion of Global Relevance. – Stuttgart (Germany): Ibidem-Verlag, 2015. – P. 167–178.

Разделы в монографиях:

25. **Белозёрова Е.В.** Гидрологические и морфометрические характеристики рек Байтуган и Кондурча // Особенности пресноводных экосистем малых рек Волжского бассейна. – Тольятти: Кассандра, 2011. – С. 22–26.

26. Чалов С.Р., Завадский А.С., Улатов А.В., **Промахова Е.В.** Прокладка трубопроводов через реки // Опасные русловые процессы и среда обитания лососёвых рыб на Камчатке. – М.: Изд-во ВНИРО, 2014. – С. 98–113.

Патенты:

27. Алексеевский Н.И., **Белозёрова Е.В.** (патентообладатель), Чалов С.Р. Патент на полезную модель «Речная седиментационная ловушка» № 120776, 27.09.2012.

28. Алексеевский Н.И., **Белозёрова Е.В.** (патентообладатель), Чалов С.Р. Патент на полезную модель «Седиментационная ловушка для малых водотоков» № 127471, 27.04.2013.

