

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЛЛ Л


Чалов Сергей Романович

Речные наносы в эрозионно-русловых системах

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты

— ***Ермолаев Олег Петрович,***

*доктор географических наук, профессор
кафедры моделирования экологических
систем ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) федеральный
университет»*

Поздняков Шамиль Рауфович,

*доктор географических наук, директор
Института озераведения РАН*

Коронкевич Николай Иванович,

*доктор географических наук, профессор,
з.н.с. лаборатории гидрологии Института
географии РАН*

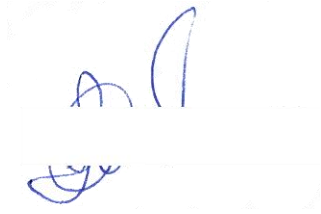
Защита диссертации состоится «7» **октября 2021 г. в 15 часов** на заседании диссертационного совета МГУ.11.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18 этаж, аудитория 1801.

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/370001421/>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Бассейны рек и составляющие водосборы временных и постоянных водотоков – транзитная зона материковой части глобального круговорота воды. Здесь происходит формирование речного стока, к которому относят сток воды, наносов, растворенных веществ, тепла [Муравейский, 1960]. Перемещение наносов является проявлением эрозионно-аккумулятивных процессов – взаимодействия водных потоков и подстилающей поверхности [Алексеевский, 1998]. Оно определяет нисходящий литодинамический поток и образует особую пространственную структуру в пределах речных бассейнов – каскадные эрозионно-русловые системы (ЭРС) [Чалов Р.С., 1999]. Нижние – речные звенья ЭРС осуществляют по русловой сети транспорт наносов, поступающих со склонов, из овражно-балочной сети и образующихся в результате русловых деформаций.

Речные наносы – важнейшая производная денудации, фактор и выражение русловых процессов. Они определяют перемещение в реках широкого спектра химических веществ – солей, тяжелых металлов, биогенных и органических элементов, радионуклидов, бактерий и вирусов, в результате чего становятся причиной глубоких изменений в ландшафте [Перельман, 1961]. Вопросы, связанные с речными наносами, традиционно изучаются географо-гидрологическими и гидравлическими (гидродинамическими) методами в рамках гидрологии, эрозиоведения и русловедения; эколого-геохимическими методами в рамках геохимии, геоэкологии и водной экологии. В последние годы значимые исследования, относящиеся к первой группе, были выполнены в глобальном масштабе [Borrelli и др., 2017; Cohen, Kettner, Syvitski, 2014; Milliman, Farnsworth, 2013; Syvitski, Kettner, 2011; Walling, Fang, 2003], а также на уровне отдельных регионов и бассейнов [Brown и др., 2009; Hinderer, 2012; Walling, Collins, 2016]. В России последние обобщающие работы по стоку наносов связаны с работами 15-летней и более давности, когда появились на свет фундаментальные труды Н.Н. Бобровицкой [1992], Н.И. Алексеевского [1993; 1998] и В.Н. Голосова [2003; 2006]. Современные исследования проводились на региональном уровне (труды А.В. Гусарова [2003; 2004; 2015]; Д.В. Магрицкого [2011; 2013]; Ш.Р. Позднякова [2011]; Т.Г. Потемкиной [2011; 2015]; М.В. Шмаковой [2015; 2020]). Развитие методов оценки донных (влекомых) наносов проводилось в работах М.Р. Гусейновой [2004], З.Д. Копалиани [2004], А.Ю. Сидорчука [2015], М.В. Шмаковой [2020] и др.; с помощью эмпирической и полуэмпирической параметризации развивались модели бассейновой

эрозии [Литвин, 2002; Лисецкий и др., 2012], на основе которых выполнено районирование почвенной и овражной эрозии Поволжья [Ермолаев, 2002] и Предуралья [Гареев, Хабибуллин, 2010]. Эколого-геохимические исследования, посвященные механической миграции, были направлены на изучение связи состава материкового стока речных наносов с гидроклиматическими особенностями территорий [Viers, Dupré, Gaillardet, 2009; Савенко, 2006], геохимическими аномалиями [Gaillardet, Viers, Dupré, 2013; Horowitz, 2008], уровнем техногенной нагрузки [Эколого-географический атлас-монография «Селенга-Байкал», 2018; Касимов, 2013; Turner, Brewer, Macklin, 2008; Verstraeten, Lang, Houben, 2009]. В работах В.С. Савенко [2006], D. Viers et al [2009], В.В. Гордеева [2011] были выполнены обобщения по химическому составу взвешенных наносов рек мира. Указанные исследования выполняются изолированно друг от друга, что препятствует созданию единой теории формирования стока и состава наносов.

Речные наносы отождествляются с понятиями «муть» (термин В.И. Вернадского [Вернадский, 1960]), «взвесь», «седименты», «твёрдофазное вещество», «минеральные частицы». Различные классификации речных наносов не согласованы между собой. Существует несоответствие между численными, экспериментальными и мониторинговыми подходами к изучению стока наносов в пределах речных ЭРС. Несмотря на большое количество работ, посвященных соотношению суммарной эрозии на водосборе и стока наносов в замыкающем створе бассейна [Collins и др., 2017; Gellis, Mukundan, 2013; Голосов, 2006; Эрозионно-русловые системы, 2017], почти не изучается вклад русловых деформаций в поток наносов. Отсутствуют работы, посвященные гидрологическим закономерностям формирования состава наносов. Исследования химического состава речных наносов традиционно выполняются исключительно для взвешенных форм транспорта или донных отложений, их отличает высокая неопределенность оценок [Navratil и др., 2011; Rode, Suhr, 2007]. Распространенная схема распределения химических элементов в составе речных вод «вода – взвешенные наносы – донные отложения» [Lick, 2008; Папина, 2001] не учитывает гидравлическую сортировку состава наносов по глубине рек [Bouchez и др., 2011; Lupker и др., 2011]. Отсутствуют сведения о химическом составе влекомых наносов. Наконец, относительно слабо изучена экологическая роль транспорта наносов [Кемп и др., 2011; Русанов, Зюсько, Ольшванг, 1990]. Отсутствие соответствующих научных разработок находит отражение в несовершенстве существующих требований

нормирования взвешенных веществ, методик расчета ущерба водным биоресурсам при ведении хозяйственной деятельности [Методика исчисления размера вреда..., 2011], ведении мониторинга различных видов хозяйственной деятельности и др.

Все это определяет актуальность изучения гидролого-геохимических закономерностей транспорта и состава речных наносов в эрозионно-русловых системах. Своевременность развития этого направления научного поиска связана, с одной стороны, с тем, что в условиях климатических изменений и меняющегося антропогенного воздействия наблюдается быстрая трансформация эрозионно-русловых систем, что требует актуализации данных. С другой стороны, взрывное развитие методов натурных и лабораторных исследований стока наносов, развитие информационных ресурсов и аналитических средств определения их механического и химического состава создает условия для теоретических и методологических разработок в этой области.

Предмет исследования: изучение речных наносов, их транспорта, механического (гранулометрического) и химического состава. **Объектом исследования** являются речные звенья каскадных эрозионно-русловых систем (малые, средние и крупные реки).

Цель исследования: выявление механизмов и количественная оценка формирования и пространственно-временной изменчивости транспорта и состава речных наносов в пределах эрозионно-русловых систем.

Задачи:

I. Развитие гидролого-геохимического подхода к изучению характеристик баланса и химического состава речных наносов на разных уровнях эрозионно-русловых систем.

II. Научное обоснование набора полевых, сетевых, дистанционных и численных методов исследования речных наносов и оценка точности их применения.

III. Исследование закономерностей пространственно-временной изменчивости форм транспорта, физических и химических характеристик речных наносов.

IV. Исследование баланса наносов и его химического состава в глобальном (общемировом) масштабе и в пределах отдельных речных бассейнов, в том числе в условиях горнодобывающей деятельности и массового нереста лососевых рыб.

V. Исследование многолетней, сезонной, синоптической и внутрисуточной (макротурбулентной) изменчивости стока и состава наносов и соотношений между ними.

VI. Разработка классификации воздействий речных наносов на сообщества речных организмов, определение критических диапазонов изменений мутности воды для ихтиоценов.

Предметом защиты является решение фундаментальной научной проблемы — разработки теоретических и методологических основ изучения речных наносов в эрозионно-русловых системах, в том числе особенностей формирования и пространственно-временной изменчивости их стока и состава.

Защищаемые положения:

1. Количество перемещаемых наносов и их состав формируются под влиянием эрозии, транспорта (миграции), аккумуляции, физико-химических и биологических процессов, что определяет единство гидролого-геохимических подходов к их изучению.
2. Исследование баланса и состава наносов основано на интегральном использовании мониторинговых, экспедиционных, дистанционных и численных методов.
3. Гранулометрический состав – универсальный фактор дифференциации потока наносов по форме транспорта и химическому составу, определяющий единство гидролого-геохимической шкалы.
4. Бассейны крупных рек России представляют собой области аккумуляции, в которых основная часть продуктов бассейновой эрозии не достигает устьев. Ведущая роль в формировании стока речных наносов принадлежит русловым факторам – размывам берегов и задержке наносов в днищах речных долин и в водохранилищах.
5. Многолетние, сезонные и синоптические изменения стока наносов широкопойменных рек определяются режимом русловых деформаций. Внутричасовые колебания мутности соответствуют разным частотам спектра турбулентных возмущений скоростного поля речного потока.
6. Мутность воды является важнейшим экологическим параметром речных наносов. Дифференциация ее критических (допустимых) значений для разных семейств ихтиофауны определяет региональные принципы рыбохозяйственного нормирования.

Новизна исследования связана с выявлением гидролого-геохимических закономерностей формирования и транспорта речных наносов и их экологических функций.

1. Впервые закономерности формирования состава речных наносов и их транспорта речными потоками рассматриваются с единых позиций. Выполнена оценка особенностей распределения химических элементов между взвешенными и влекомыми наносами, и получены эмпирические подтверждения существования количественных соотношений между гидравлическими параметрами потока и химическим составом наносов.
2. В максимально высоком пространственном разрешении $3'' \times 3''$ проведены оценки эрозии почв на основе универсального уравнения RUSLE для шести водосборов рек бассейна Северного Ледовитого океана (р. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма), бассейна р. Камчатки и бассейна р. Дон. Таким образом, крупномасштабными расчетами была покрыта значительная часть территории РФ. Дополнительно для 111 водохранилищ рек РФ объемом больше 0.1 км^3 были выполнены оценки наносоудерживающей способности и заиления. На основе реализации метода идентификации плановых переформирований (ИПП) проведены расчеты объемов поступления наносов за счет размывов берегов нижней Оби ниже слияния с р. Вах, нижнего Иртыша (ниже г. Горноправдинск), Енисея (ниже с. Ярцево, 1500 км русла), более 8000 км русловой сети рек бассейна Селенги и 650-километрового участка р. Камчатка с глубиной анализа до 50 лет. Предложена глобальная оценка стока взвешенных и влекомых наносов в Мировой океан, выполненная по единой методологии, для более чем 1500 рек мира.
3. Впервые системно исследуются и обосновываются пространственно-временные закономерности проявления ведущей роли русловых процессов в балансе наносов. Соответствующие оценки выполнены как в масштабе отдельных речных бассейнов, так и в глобальном масштабе, а также для таких антропогенно преобразованных ЭРС, как долины рек, нарушенные горнодобывающей деятельностью. Изучено влияние русловых процессов на формирование многолетней, сезонной и синоптической изменчивости стока наносов широкопойменных рек.

4. Осуществлены региональные оценки характеристик стока и химического состава наносов в разных временных масштабах (от внутрисуточных до многолетних) и при разном сочетании природных и антропогенных факторов. Выполнено научное обоснование изучения быстрых (с характерной частотой 20 минут) изменений мутности речных вод, соответствующих низкочастотной области спектра пульсаций скорости речного потока и макротурбулентным изменениям.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В работе развивается междисциплинарный подход к изучению эрозионно-руслowych систем, основанный на интегральном представлении о перемещении различных материальных сред (жидкости, твердых тел, дисперсных систем), затрагивающем разнообразные аспекты гидрологических, геохимических и экологических явлений. Сформулированы подходы к изучению организации и форм перемещения вещества в эрозионно-руслowych системах (ЭРС), направленные на систематизацию знаний о формировании и транспорте наносов и их химическом составе. Выполнены научное обоснование и апробация единых гидролого-геохимических методов изучения формирования и переноса речных наносов в эрозионно-руслowych системах, основанных на использовании набора географо-гидрологических, гидравлических и геохимических методов. Обоснована универсальная гидролого-геохимическая шкала распределения состава речных наносов. Систематизированы оценки пространственно-временной изменчивости стока и состава речных наносов для разных интервалов эволюционно-хронологической шкалы эрозионно-руслowych систем в расширенном диапазоне времени от геологических масштабов до спектра пульсаций скорости речного потока (макротурбулентные колебания).

Практическая значимость работы связана с научным обоснованием новых методов и протоколов измерения характеристик стока наносов – мутности воды с использованием оптических, дистанционных и акустических методов; расхода взвешенных и влекомых наносов по данным доплеровских профилографов; отбора проб взвешенных наносов с применением авторской установки зонда-ловушки взвешенных наносов. Обобщены принципы и методика получения разных типов данных, дается оценка их точности и приводится обоснование рекомендаций по их применению. Для соответствующих типов измерений разработаны протоколы, размещенные в сети

Интернет на ресурсе <https://sediment.ru/>. Разработаны система определения расхода наносов по данным доплеровских измерений АДПТ и технология отбора интегральных проб взвешенных наносов на разных горизонтах речных потоков (авторская установка – патент на полезную модель № 201927 «Зонд-ловушка для взвешенных наносов»). Зонд-ловушка впервые в практике позволяет получать образцы взвешенных наносов с разных глубин крупных рек.

Разработаны региональные подходы к нормированию содержания взвешенных наносов в реках, реализуемые на бассейновом уровне с учетом состава ихтиофауны и фоновых условий. На примере разных фаунистических комплексов рыб рек России определены диапазоны изменения мутности и стока наносов, соответствующие опасным изменениям экологического состояния рек.

Результаты используются при чтении курсов «Водохозяйственные расчеты», «Русловые процессы» и проведении полевых учебных практик на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова; чтении курса «Гидрология с основами гидробиологии» на биологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова; чтении лекций в Институте географии Университета им. Казимира Великого (Быдгощ, Польша) и ФГБОУ «Институт повышения квалификации Росгидромета».

Личный вклад автора.

В основе работы лежит обобщение результатов полевых исследований автора на реках Российской Федерации (Лена, Енисей, Колыма, Северная Двина и ее притоки, Обь, Селенга, Ока, Москва, Протва, Сетунь, реки Камчатки и о. Сахалин), Польши (Висла), Монголии (реки бассейна Селенги), Италии (бассейн р. Съева), Швеции (бассейн р. Тарфала). На этой основе созданы массивы данных о расходах взвешенных и влекомых наносов и гранулометрическом составе взвеси (более 900 определений). Выводы, касающиеся химического состава наносов, основаны на обобщении данных о содержании микроэлементов в воде, взвешенных и влекомых наносах, анализировавшихся методами ICP-MS и ICP-AES (всего – более 1000 определений на реках бассейна Селенги, Лены, Колымы, Енисея и Оби). Обработаны 37 рядов высокочастотных записей мутности (с интервалом записи от 10 секунд до 30 минут и продолжительностью до 150 дней) с автоматических регистраторов, устанавливавшихся в 2012–2019 гг. на 16 реках.

Автором собраны и обработаны гидролого-геохимические данные о влиянии горнодобывающей деятельности на сток наносов, основанные на гидроэкологическом мониторинге воздействия добычи россыпной платины в бассейне р. Вывенка (Корякия), проводившемся с 2003 по 2015 г., и дополненные мониторинговыми наблюдениями в районах добычи россыпного золота в бассейне р. Лангери (о. Сахалин) (2015–2016), р. Туул (Монголия) (2011–2015) и месторождений апатит-нефелиновых пород р. Юкспорройк (Хибинский горный массив) (2017–2018) и меди в бассейне р. Наутанен (Швеция) (2017–2018).

В среде ArcGIS реализованы численные расчеты определения мутности воды по космическим снимкам, оценки объемов наносов, поступающих в результате размыва берегов, расчеты дождевой эрозии в пределах водосборов крупнейших рек РФ и объемов накопления наносов и химических веществ в крупнейших водохранилищах России. Проведены расчеты суммарного стока наносов (взвешенных и влекомых) для более чем 1500 рек мира, впадающих в Мировой океан. Количественное дешифрирование мутности воды выполнено на основе серий снимков LandSAT для 200-километрового участка р. Лена в районе г. Якутска (90 снимков за период с 1992 по 2018 г.) и участка р. Лена от устья р. Алдан до устья р. Вилюй (30 снимков за период с 1999 по 2020 г.), дельты р. Селенга (82 снимка за период с 1989 по 2015 г.), дельты р. Верхняя Ангара (90 снимков за период с 1986 по 2018 г.), дельты р. Лена (50 снимков за период с 1999 по 2019 г.) и дельты р. Колыма (70 снимков за период с 1999 по 2019 г.).

Указанные виды работ выполнены самим автором либо при его непосредственном участии как на стадии полевых, камеральных и лабораторных работ, так и при интерпретации и апробации их результатов, в ходе выполнения более чем 30 научных проектов (гранты РНФ, РФФИ, РФФИ-ГФЕН Китая, РГО, государственные контракты и хозяйственные договора, в десяти из которых автор выступал в качестве руководителя).

Апробация результатов работы.

Полученные результаты были лично представлены автором в форме устных докладов на следующих научных мероприятиях:

Зарубежные научные мероприятия: Международная конференция «Экологические проблемы в предгорной зоне» (Польша, 2008); Генеральная ассамблея союза наук о Земле, EGU (Австрия, 2010, 2013; 2020 — дистанционно); 11th International Symposium on River Sedimentation (Южная Африка, 2010); International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers, 2011, Vienna; Генеральная ассамблея 25th IUGG General Assembly 2011 (Австралия, 2011); 32-й Международный

географический конгресс (Германия, 2012); конференция Sediment transport modeling in hydrological watersheds and rivers (Турция, 2012); конференция Bringing together Selenga-Baikal research, 2012 (Швейцария, 2012); немецкий Гидрологический съезд (Германия, 2013); IGU Regional Conference Changes, challenges, responsibility (Польша, 2014); конференция Bringing together Selenga-Baikal research, 2014 (Германия, 2014); Генеральная ассамблея 26th IUGG General Assembly, 2015 (Чехия, 2015); Международный симпозиум World's Large Rivers Initiative (Австрия, 2015); Конференция Немецкого географического союза (Германия, 2015); конференция 2nd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Science Conference, 2016 (Китай, 2016); Конференция Arsenic in the environment (Швеция, 2016); Конференция Bringing Together Selenga-Baikal Research-3 (США, 2016); конференция комиссии по континентальной эрозии Международной ассоциации гидрологических наук (ICCE IAHS) Integrating monitoring and modelling for understanding, predicting and managing sediment (Великобритания, 2016); конференция Human Impact on the Fluvial Processes of Eurasian Rivers (Польша, 2016); 3rd International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers (Индия, 2017); 1st Joint Research Symposium Lomonosov Moscow State University & Ludwig Maximilians Universität (Германия, 2017); Международная конференция Global Wetland Ecohydrology Network (Колумбия, 2018); Pan Eurasian Experiment implementation conference 2019 (Финляндия, 2019); Форум принца Альберта Arena for the gap analyses in the Arctic Science – AASCO (Монако, 2020, дистанционно).

Научные мероприятия в Российской Федерации (в том числе международные): пленарные совещания Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (Ульяновск, 2005; Чебоксары, 2006; Новочеркасск, 2007; Калуга, 2008; Астрахань, 2010; Ижевск, 2012; Архангельск, 2016; Уфа, 2017; Курск, 2020); конференции молодых ученых при Межвузовском научно-координационном совете по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (Пермь, 2002; Брянск, 2004, 2006; Волгоград, 2006; Курск, 2008; Уфа, 2010; Волгоград, 2012; Белгород, 2014; Нижний Новгород, 2016); третья конференция ДВО РАН «Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова» (Владивосток, 2005), научная конференция «Фундаментальные проблемы изучения и использования водных ресурсов» (Иркутск, 2005), VII научная конференция «Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей» (Петропавловск-Камчатский, 2006); X симпозиум по речным наносам ISRS-10 (Москва, 2007); конференции «Маккавеевские чтения» (Москва, 2007, 2012, 2016); Чтения памяти академика К.В. Семакова (Магадан, 2009); Международная конференция «Земля из космоса – наиболее эффективные решения» (Москва, 2009); VII научная конференция «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2009); Российско-итальянский симпозиум Water Erosion and mass movement (Москва, 2010); конференция Social and environmental responsibility of mining. Russian and international experience (Москва, 2012); VII Всероссийский гидрологический съезд (Санкт-Петербург, 2013); региональная конференция Международного географического союза IGU (Москва, 2015); Всероссийская конференция с международным участием «Ломоносовские чтения» (Москва, 2018); XIV общероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2018); конференция Green technologies and infrastructure to enhance urban ecosystem services (Москва,

2018); 2-й Международный молодежный форум по сохранению почв и вод суши и симпозиум ICCE (2nd IYFSWC/ICCE, Москва, 2018); Всероссийская научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии, водном хозяйстве и геоэкологии» (Уфа, 2019); V Всероссийская научная конференция с международным участием «Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях» (Москва, 2019).

Диссертация была доложена на семинарах кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ (сентябрь 2019), кафедры моделирования экологических систем ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (март 2019), кафедры гидрометеорологии и геоэкологии Башкирского государственного университета (март 2019) и отдела гидрологии речных бассейнов Института водных проблем РАН (апрель 2019).

Результаты исследований изложены в 163 научных публикациях в базе РИНЦ, в том числе в 82 научных изданиях, определенных в п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также в шести монографиях и главах в коллективных монографиях (в соавторстве) и одном учебном пособии.

В рамках развития методических средств изучения речных наносов зарегистрировано три патента на полезную модель: Патент на полезную модель «Седиментационная ловушка» – Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Патент № 120776, дата подачи заявки 27.09.2012); Патент на полезную модель «Седиментационная ловушка для малых водотоков» (Патент № 127471, дата подачи заявки 27.04.2013); Патент на полезную модель «Зонд-ловушка для взвешенных наносов» (Патент № 201927 от 21.01.2021).

Благодарности

Становлением в профессии автор обязан двум людям – отцу, профессору Р.С. Чалову, и научному руководителю курсовых, дипломной и кандидатской работ проф. Н.И. Алексеевскому. Важную роль в развитии научных взглядов сыграл акад. Н.С. Касимов. Большую помощь на разных этапах работы оказали д.г.н. В.Н. Голосов и д.г.-м.н. В.С. Савенко. Автор благодарен всем им за приобщение к научной школе географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, всестороннюю поддержку и советы.

Появление этой работы не было бы возможно без совместных исследований, экспедиций и обсуждений с сотрудниками кафедры гидрологии суши, лаборатории

эрозии почв и русловых процессов, кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ, кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ, ИВП РАН – в первую очередь к.г.н. В.М. Морейдо, к.г.н. М.Ю. Лычагина, к.г.н. П.Н. Терского, к.г.н. М.А. Самохина, к.г.н. А.С. Завадского, к.г.н. Г.Л. Шинкаревой, к.г.н. А.Г. Косицкого, к.г.н. Д.В. Магрицкого, А.М. Вервальда, Д.И. Школьного, а также коллег из университета Стокгольма, Швеция (проф. Jerker Jarsjö и Jan Pietron), университета Райса, США (проф. J. Nittrouer), Гельмгольц-центра по окружающей среде, Германия (проф. D. Karthe и P. Theuring), университета Павия, Италия (проф. Michael Maerker), университета г. Быдгощ, Польша (проф. Michał Habel и Dawid Schaetten). Бесценная помощь в оформлении работы была оказана Е.Р. Чаловой и М.Р. Вервальд.

Особо автор благодарит за 17 лет плодотворной совместной работы коллег из Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) – к.б.н. В.Н. Лемана, к.б.н. Е.В. Есина и к.г.н. С.Л. Горина. Многие исследования состоялись благодаря сотрудникам Байкальского института природопользования СО РАН, Российско-монгольской Комплексной биологической экспедиции РАН-МАН, Камчатского филиала ВНИРО, Института географии СО РАН – в первую очередь член-корр. Е.Ж. Гармаеву, проф. П.Д. Гунину. Наконец, большая благодарность студентам и выпускникам кафедры, вместе с которыми проводились многие исследования, – к.г.н. А.С. Цыпленкову, к.г.н. М.К. Тарасову, В.А. Ефимову, М.П. Пашкиной, А.О. Романченко, К.Н. Прокопьевой, В.А. Иванову, М.О. Переяславцевой, к.г.н. Е.В. Промаховой, к.г.н. Г.А. Айзелю, к.г.н. Л.В. Кобыльченко, к.г.н. Т.Д. Миллионщиковой, В.Н. Цыпленковой, В.О. Базиловой, Е.А. Крастынь и И.А. Солоникову.

Отдельное спасибо – супруге Саше и детям, разделявшим многие экспедиции и дарившим вдохновение.

Состав и объем работы

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Она состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы составляет 358 страниц, в том числе 157 рисунков и 76 таблиц. Список литературы включает в себя 670 наименований.

Содержание исследования

Глава 1. Основы понятия теории речных наносов

Перемещаемые реками наносы исключительно разнообразны по своему происхождению, форме переноса, составу. В работах А.В. Караушева [1977], П.Н. Линника и Б.И. Набиванца [1986], К.И. Россинского и В.К. Дебольского [1986], Н.И. Алексеевского [1998], Е.П. Янина [2002], Ш.Р. Позднякова [2011], Р. Guu [1970], Friedman и Sanders F [1978], A. Horowitz [1985], D. Knighton [1998], A. Robert [2003], T. Burt и R. Allison [2010] рассматриваются механические и миграционные классификации твердого вещества (наносов, грунтов, почвенной массы и почв). Поток наносов представляет собой сложную и изменчивую систему, где кроме пространственно-временных координат на его состав и величину влияют физико-химические и биологические продукционно-деструкционные процессы a_s . Состав наносов, таким образом, описывается неконсервативной моделью вида:

$$C_i = C(t, x, y, z, \frac{\partial a_s}{\partial t}), \quad (1)$$

где x – продольный (по длине реки, дисперсия потока наносов), y – поперечный (по ширине русла, или конвекция взвешенных частиц), z – вертикальный (по глубине русла, адвекция частиц), t – временной масштабы.

Диапазоны крупности частиц задаются индексом РМ (от англ. Particulate Matter). Так, РМ10 обозначает частицы крупностью менее 0.01 мм (илистые по классификации Росгидромета), РМ(10–100) – частицы размерностью от 0.01 до 0.1 мм (пылеватые по классификации Росгидромета), РМ > 100 – с размерами более 0.1 мм. Частицы (химические элементы и соединения) переносятся речными водами в грубодисперсном состоянии РМ > 0.1, в коллоидно-дисперсном состоянии (в составе коллоидов РМ0.001–0.1) и в молекулярно(ионно)-дисперсном состоянии (в истинно-растворенной форме или в растворенной форме, РМ0.001) [Линник, Набиванец, 1986]. Хотя строгое выделение четких количественных границ агрегатных состояний элементов практически недостижимо, для определения диапазона речных наносов можно принять границу перехода дисперсной и коллоидно-дисперсной систем, которым свойственно осаждение, в гомогенный молекулярный раствор. В таком случае речные наносы – это нерастворенные вещества (крупностью более 0.005 мкм), являющиеся продуктами разрушения горных пород, почв, органических соединений и испытывающие влияние

физико-химических и биологических продукционно-деструкционных процессов, в современной гидроклиматической обстановке перемещаемые речными потоками. Согласно принятой практике, в качестве нижней границы диапазона речных наносов используется размер 0.45 мкм, определяемый согласно размерам пор фильтров выделения взвеси и соответствующий границе грубодисперсных и коллоидно-дисперсных систем («условно растворенных» и нерастворенных форм). Нерастворенные частицы $PM > 0.45$ разной массы перераспределяются по глубине, между водной толщей и придонными слоями, формируя поток взвешенных Q_R и влекомых наносов Q_G , перемещаемых, соответственно, в толще потока выше придонного слоя $a = 2d_s$ и в слое a , где d_s – линейный размер (диаметр) частиц (рис. 1).

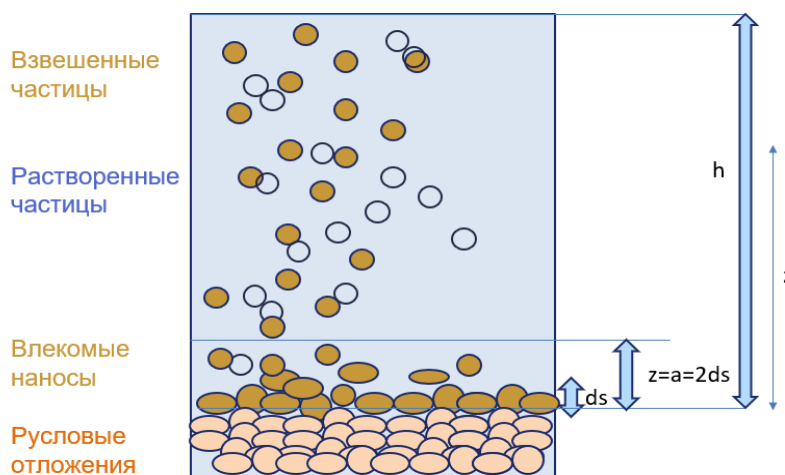


Рисунок 1. Формы нахождения наносов в речных потоках

Перемещение наносов в ЭРС характеризуется «каскадностью» и состоит из серии подсистем, динамически связанных потоками массы и энергии [Clayton, Chorley, Kennedy, 1972]. Представление о структурности движения наносов в ЭРС развивалось в работах Н.И. Маккавеева [1955], R. Ferguson [1981], K. Fryirs [2013], L. Bracken [2015], Н. Joусе [2018]. Горизонтальная структура выделяется на основе учета однотипности поступления вещества от различных источников, его переотложения и аккумуляции и соответствует выделению в пределах ЭРС эрозионно-склоновых, овражно-балочных и речных подсистем (частей «каскада») [Литвин, 2002; Чалов Р.С., 1999], где ведущую роль играют, соответственно, склоновые нерусловые, временные русловые и русловые потоки [Маккавеев, 1955]. Вертикальная структура транспорта наносов в пределах ЭРС связана с существованием вложенных друг в друга подсистем флювиальной сети [Симонов, 1999]. В речной подсистеме ЭРС выделяются бассейновый (уровень речных

долин и их склонов), русловой (отдельные участки рек – русла, дельты) и локальный (уровень руслового рельефа – плесы, перекаты) масштабы.

В основе количественной характеристики перераспределения наносов в ЭРС лежат балансовые методы. Система масштабных коэффициентов (редукции стока наносов) k определяет соотношение выноса взвешенных и влекомых $W_R + W_G$ наносов за пределы ЭРС и объема перемещаемого материала под действием эрозионных процессов на водосборе $W_{эр}$ и в русле $W_{русл}$, технических средств $W_{техн}$, в результате биологических и эоловых процессов и деятельности ледников $W_{биол}$, $W_{эол}$, $W_{ледн}$ соответственно:

$$k = \frac{(W_{эр} + W_{русл} + W_{техн} + W_{биол} + W_{эол} + W_{ледн})}{W_R + W_G} = K_{эр} + K_{русл} + K_{техн} + K_{биол} + K_{эол} + K_{ледн} \quad (2)$$

В аккумулярующих ЭРС основная часть перемещаемого вещества (более 90 %) не достигает устьевых частей водосбора ($k > 10$). Транзитно-аккумулярующие ЭРС осуществляют вынос более половины перемещаемого материала ($k \approx 2-10$). За пределы транзитных ЭРС выносятся большая часть вещества ($k < 2$). При осреднении за продолжительные периоды времени и учете аккумуляции в водохранилищах $A_{вдхр}$, на склонах междуречных пространств $A_{скл}$ и днищах долин $A_{русл}$ коэффициент k всегда больше 1:

$$\frac{(W_{эр} + W_{русл} + W_{техн} + W_{биол} + W_{эол} + W_{ледн}) - (A_{вдхр} + A_{скл} + A_{русл})}{W_R + W_G} > 1 \quad (3)$$

Соотношение объемов перемещения W и аккумуляции A в разных масштабах ЭРС и выраженность тех или иных составляющих уравнений (2, 3) определяют поступление в реки частиц разного состава. Гетерогенность состава речных наносов, физические и химические свойства которых находятся в тесной взаимосвязи, определяет актуальность развития единого гидролого-геохимического подхода к изучению ЭРС. В его основе лежит исследование закономерностей формирования стока и состава наносов, связи этих процессов с источниками поступления материала, в первую очередь бассейновой и русловой эрозией, и их временной трансформации (**рис. 2**). В совокупности они определяют экологические функции речных наносов.

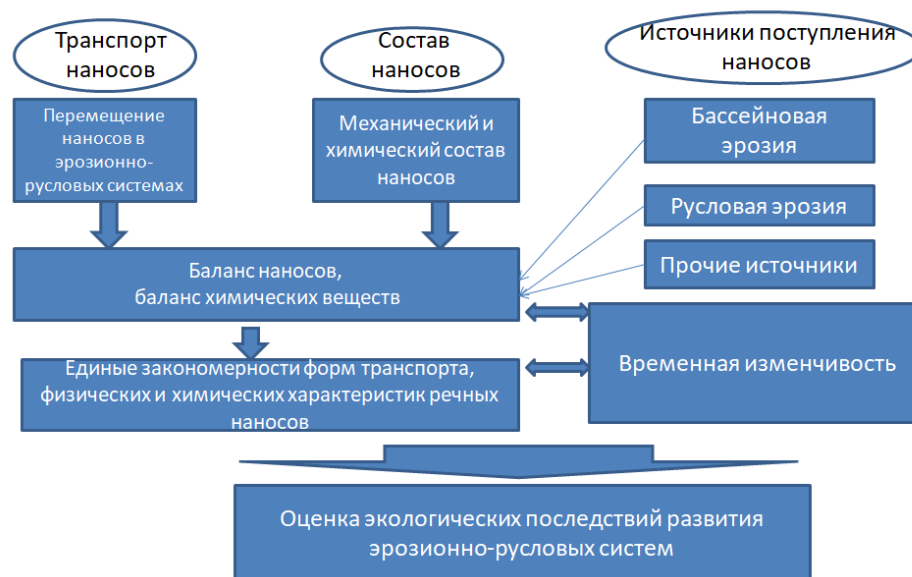


Рисунок 2. Гидролого-геохимический подход к изучению речных наносов в ЭРС

Глава 2. Методы изучения речных наносов в эрозионно-руслowych системах

Развитие гидролого-геохимического подхода в исследовании ЭРС связано с применением методологии интегральной оценки, основанной на использовании мониторинговых (сетевых), экспедиционных, дистанционных и численных данных [Chalov S., Golosov et al., 2017; Chalov S., Millionshchikova et al., 2018]. Она связана с адаптацией независимых, прямых и косвенных, методов и позволяет получить набор сопоставляемых и взаимодополняемых оценок составляющих уравнений (2) и (3) для разных пространственных уровней ЭРС (частей каскада).

Сетевой мониторинг охватывает в настоящее время лишь около 10 % рек, впадающих в Мировой океан [Cohen et al., 2014], что позволяет охарактеризовать около 90 % мирового стока взвешенных наносов. Точность существующих протоколов измерения мутности воды снижается в связи с существованием инструментально-методических ошибок, в первую очередь связанных с несоответствием размера пор используемых на постах УГМС фильтров (от 3 до 10 мкм) и крупности наносов. На основе лабораторных экспериментов показано, что при среднем диаметре частиц ниже 60 мкм большая их доля не задерживается бумажными фильтрами с диаметром пор 10–12 мкм, что приводит к погрешности определения мутности воды по протоколам РД 52.08.104-2002 и РД 52.24.468-2005 в несколько сотен процентов. Методические неопределенности и сокращенное число пунктов наблюдений за мутностью воды, проблемы проведения массовых измерений способствовали развитию альтернативных методов измерений, реализуемых при экспедиционных (полевых) исследованиях.

Экспедиционные исследования связаны с применением прямых (гравиметрических, связанных с фильтрацией проб воды) и косвенных методов, основанных на отражении электромагнитных волн взвешенными частицами (табл. 1). Применение последних лимитируется необходимостью создания региональных связей между регистрируемыми параметрами (оптической мутностью T – при использовании нефелометрического метода, интенсивностью обратного рассеивания BI – при использовании доплеровских технологий, объемной мутностью S_v – при применении методов лазерной дифракции) и мутностью воды, выраженной в весовых единицах (содержание взвешенных частиц, SSC , мг/л). Зависимости вида $SSC = f(T, BI, S_v)$ устанавливаются для каждого водного объекта (речного бассейна, поста). Обоснованы рекомендации применения косвенных методов измерения мутности [Белозерова, Чалов С.Р., 2013; Чалов С.Р., 2019]. Применение доплеровских технологий АДПТ позволяет получить также оценки расхода влекомых наносов [Chalov S. et al., 2020; Морейдо, Чалов С.Р. и др., 2021].

Таблица 1. Основные косвенные методы определения мутности воды

Метод	Типы приборов	Регистрируемый параметр	Длина волн	Дискретность данных	Диапазон измерений
Нефелометрический	Портативные и автоматические натурные датчики; большое число производителей	Оптическая мутность T (НТУ)	800–860 нм	До 10 сек	<3000 мг/л
Акустический (доплеровский)	Доплеровские измерители скорости потока АДПТ	Интенсивность обратного рассеивания $S_t(R)$, дБм	2.5 мм при частоте 600 кГц 1.25 мм при частоте 1200 кГц	В зависимости от размера реки	<500 мг/л
Лазерный (лазерной дифракции)	LISST-SL (Стандарт ISO-13320:2009)	Объемная мутность S_v , мл/л	670 нм	До 10 сек	<3300 мг/л (PM10) <33 000 мг/л (PM100)
Дистанционный	Космические и низколетательные аппараты, смартфоны	Коэффициент спектральной яркости ρ_λ	630–690 нм	Частота съемки	<500 мг/л

Дистанционные методы направлены на изучение объемов поступления наносов в результате русловой эрозии $W_{русл}$ и для получения пространственно распределенных данных о мутности воды. Метод индикации плановых переформирований (ИПП)

основан на полуавтоматическом ГИС-дешифрировании мультиспектральных снимков и использовании глобальных баз данных, в частности Global Surface Water Explorer [Pekel et al., 2016]. Определение площадей размыва дополняется оценкой высот пойменного массива над меженным урезом $H_{\text{пойм}}$, в нашей работе выполняемой с использованием цифровой модели рельефа ArcticDEM. Погрешность определения $H_{\text{пойм}}$ для больших рек оценивается величиной 0.7 м [Чалов С.Р., Чалова, Школьный, 2021]. Это позволяет выполнить расчет объема наносов, поступивших в русло реки в результате размыва берегов протяженных участков русловой сети.



Рисунок 3. Алгоритм моделирования мутности воды SSC по спутниковым снимкам LandSAT, использованный в работе для р. Лена, Селенга, Верхняя Ангара, Колыма

Дистанционные методы определения мутности воды [Чалов С.Р. и др., 2017, 2019; Chalov S. et al., 2017] предполагают создание региональных зависимостей между коэффициентом спектральной яркости ρ_λ и мутностью воды $SSC = f(\rho_\lambda)$. Вид зависимостей имеет региональный характер, трансформируется в течение года в связи с изменением состава взвеси [Чалов С.Р., Прокопьева, 2021]. На спектральный образ воды существенно влияет крупность взвешенных наносов, что исключает возможность получения универсальных зависимостей и требует тщательной калибровки в разные фазы водного режима и для разных участков реки. Наиболее широкие возможности, обусловленные как достаточным пространственным

разрешением для применения на реках разного размера, так и существованием многолетнего архива данных, открывают спутниковые системы LandSAT (рис. 3). Ошибка определения мутности по яркости пикселей спутниковых снимков в красном и ближнем инфракрасном каналах составляет от 12 до 22 %.

Численные методы направлены на изучение процессов, для которых применение натурных или дистанционных данных ограничено. В данной работе методы

математического моделирования используются для определения объемов дождевой эрозии на водосборе $W_{\text{эр}}$ и задержки наносов в водохранилищах $A_{\text{вдхр}}$. Оценка $W_{\text{эр}} = M_{\text{эр}}F$, где F – площадь бассейна, основана на модифицированном универсальном уравнении дождевой эрозии почв (RUSLE) [Renard и др., 1997]:

$$M_{\text{эр}} = \text{ЭПО} \times \text{ПОЧВ} \times LS \times C \times P, \quad (4)$$

где $M_{\text{эр}}$ – смыв почвы с единицы площади в $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$; ЭПО, ПОЧВ, LS , C , P – факторы осадков, эродируемости (смываемости) почвы, склона, землепользования и противоэрозионных мер соответственно. Чувствительность расчетов $M_{\text{эр}}$ в первую очередь контролируется величинами LS и ЭПО. Неопределенность (погрешность) созданной в работе модели RUSLE высокого разрешения 6 водосборов рек бассейна Северного Ледовитого океана (р. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма), бассейна р. Камчатка и бассейна р. Дон, основанной на ЦМР ViewFinderPanoramas ($3'' \times 3'' \approx 90 \text{ м}$) [Ferranti de, 2014], оценивается в 30 %.

Для учета трансформации стока и состава наносов в водохранилищах использована обобщенная воднобалансовая модель Бруна [Brune, 1953], ранее верифицированная для водохранилищ разных регионов мира [Vörösmarty и др., 2003]:

$$TE = 1 - \frac{0,5}{\sqrt{D_{SR}}}, \quad (5)$$

где D_{SR} – период условного водообмена (годы), TE – наносоудерживающая способность (%), определяемая по разности между поступлением наносов в водохранилище $\sum (W_R + W_G)_{\text{приток}}$ и стоком наносов в нижнем бьефе $(W_R + W_G)_0$:

$$TE = \Delta(W_R + W_G) / \sum (W_R + W_G)_{\text{приток}} = 1 - (W_R + W_G)_0 / \sum (W_R + W_G)_{\text{приток}}, \quad (6)$$

где $\Delta(W_R + W_G) = (W_R + W_G)_{\text{приток}} - (W_R + W_G)_0$. Сравнение с фактическими данными о TE для 15 крупных водохранилищ России позволило установить диапазон отклонений рассчитанных значений в интервале от 1 до 30 % (среднее = 10 %).

Глава 3. Гидролого-геохимические закономерности переноса наносов русловыми потоками

Формирование стока и состава речных наносов в реках определяется едиными закономерностями. Важнейшую роль в дифференциации вещества по форме транспорта и химическому составу играет гранулометрический состав, для взвешенных наносов рек России характеризующийся средней крупностью $d_{50} = 0.087 \text{ мм}$, долей фракций РМ10 – 26 %, фракций РМ10–100 – 54 % [Чалов С.Р., Ефимов, 2021]. В разных природных

условиях преобладают двумодальные распределения состава взвешенных наносов (71 % случаев). В горных и полугорных реках в 30 % случаев наблюдаются трехмодальные распределения в связи с наличием третьего максимума концентраций частиц РМ(750–1250). Для горных ледниковых рек характерно наличие примерно одинаковых пиков мутности РМ5–10 и РМ50–100, у полугорных и равнинных рек пики мутности смещаются в сторону мелких фракций РМ1–5 и РМ10–30 (рис. 4).

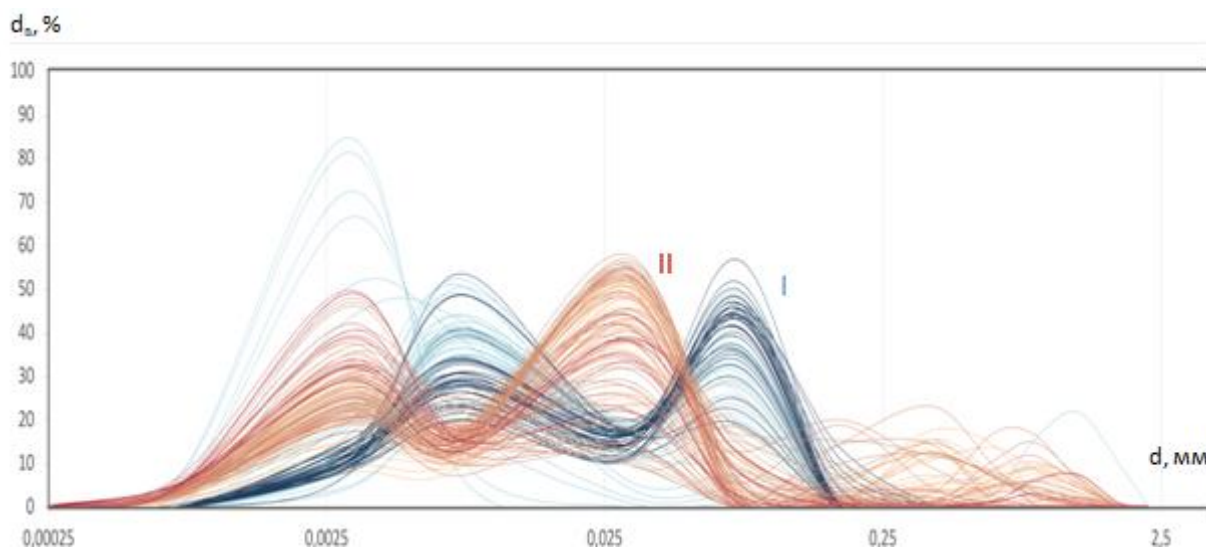


Рисунок 4. Сопоставление осредненных распределений гранулометрических составов рек горных территорий с ледниковым режимом стока – р. Тарфала и р. Джанкуат (I) и нижнего течения крупных равнинных рек (Обь, Лена, Енисей и Терек) (II)

Для параметризации роли крупности в дифференциации наносов по форме транспорта и химическому составу использован гидравлический параметр – число Рауза (Rouse, 1937). В упрощенном виде оно представляет собой соотношение между гидравлической крупностью w и динамической скоростью потока V^* , соответствующей скорости касательного напряжения:

$$Ro = \frac{w}{\beta k V^*} \quad (7)$$

Величина Ro задает критериальные условия распределения наносов между взвешенными и влекомыми $Q_R / (Q_R + Q_G)$, отличающиеся для рек разного размера (табл. 2). По мере увеличения $\frac{V^*}{w}$ (снижения Ro) большая часть наносов взвешивается в толще потока. На малых водотоках ($\frac{h}{d_s} < 100\,000$) выделяются условия неподвижности наносов при $Ro > 12$, смешанного потока взвешенных и влекомых наносов $Q_R / (Q_R + Q_G) = 0.4 \div 0.6$ при $Ro \div 0.5-12$ и исключительно взвешенных наносов при $Ro < 0.5$. На песчаных реках ($\frac{h}{d_s} > 100\,000$) преобладание взвешенных наносов $Q_R / (Q_R + Q_G) = 0.6 \div 0.8$

отмечается в широком диапазоне значений Ro ($Ro \div 0.01-4$). При осреднении для руслового масштаба ЭРС формируются устойчивые зависимости:

$$Q_G = aQ_R^b, \quad (8)$$

которые также дифференцируются по размерам рек. Для рек России и Китая по базе данных [Алексеевский, 1998] эмпирические коэффициенты в уравнении (8) равны: $a = 1,8$, $b = 0.32$ при $Q < 500 \text{ м}^3/\text{с}$ и $a = 0.23$ и $b = 1.08$ при $Q > 500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 2. Гидравлические критерии транспорта наносов малых ($\frac{h}{d_s} < 100\,000$) и больших ($\frac{h}{d_s} > 100\,000$) рек

Тип транспорта наносов	Малые реки, $\frac{h}{d_s} < 100\,000$ *	Большие реки, $\frac{h}{d_s} > 100\,000$ **
Неподвижные	>12.5	>12.5
Граничные условия неподвижности частиц	~ 12.5	~ 12.5
Преобладание влекомых наносов	$5 \div 12.5$	$6 \div 12.5$
Смешанный перенос наносов	$1.25 \div 5$	$4 \div 6$
Преобладание взвешенных наносов	$0.5 - 1.25$	$0.01 \div 4$
Исключительно взвешенные	<0.5	<0.01

* Данные лабораторных экспериментов [Guy, Simons, Richardson, 1966; Julien, 2010] и А.Б. Клавена (СТО ГУ ГГИ 08.29–2009); ** По измерениям АДТП на р. Лена, Енисей, Колыма, Обь, Селенга в 2018–2020 гг.

Роль крупности частиц в химической дифференциации вещества определяется ее влиянием на удельную поверхность ($\text{м}^2/\text{г}$) и концентрации элементов c_x (на единицу массы наносов, $\text{мкг}/\text{г}$) и Vc_x (на единицу объема, $\text{мкг}/\text{л}$). Анализ распределений петрогенных элементов [Lick, 2008; Гордеев, 2009; Демина, 1982; Янин, 2002], тяжелых металлов [Bouchez и др., 2011; Tansel, Rafiuddin, 2016; Yao и др., 2015; Zhang, Yu, Hutchinson Simon, 2001; Добровольский, 2003; Савенко, 2006], биогенов [Meng и др., 2015; Meng, Yao, Yu, 2014; Walling, Collins, Stroud, 2008], радионуклидов [Abril, Fraga, 1996; Antonelli и др., 2008], а также результаты химического анализа фракций взвешенных наносов, отобранных с помощью зонда-ловушки на реках Колыма, Лена, Обь, Селенга и сепарированных методами отмучивания [Вадюнина, Корчагина, 1986], характеризует типовые размеры переноса разных групп химических соединений и элементов (**рис. 5**). Для нерастворенных форм $PM > 0.45$ выделяются три основные группы – грубых (1) и тонких (2) фракций и переходная группа (3). К первым относятся переносимые в составе фракций PM_{100} и крупнее оксиды SiO_2 , Na_2O и Ca_2O и микроэлементы – Eu, Hf, Nb, Zr, Be. Вторую группу определяют переносимые исключительно в нерастворенной форме $PM > 0.45$ и преимущественно

концентрирующиеся во фракциях PM20 оксиды Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO и K_2O и сопутствующие металлы (катионогенные – Mn, Pb и некоторые литофильные комплексообразователи – Bi, W). Для тяжелых металлов характерным является двумодальное распределение: в тонких фракциях PM10 их концентрации связаны с органическими комплексами и адсорбированными на них и на глинистых частицах металлами; в более крупных фракциях PM(>100) – с остаточной формой металла в решетке минералов. К соединениям и элементам переходной группы 3 относятся переносимые во фракциях PM1, т. е. в условно растворенной (PM0.45) и нерастворенной формах (PM > 0.45), халькофильные тяжелые металлы Zn, Cd, Cu, а также Sn [Касимов и др., 2019; Chalov S. et al., 2020], биогенные элементы (POC, P) и радионуклиды. Перераспределение между нерастворенной и растворенной формами транспорта характеризует величина DS (D , растворенные; S , взвешенные), т. е. соотношение объемных концентраций V_{c_x} элемента x между нерастворенными ($i = \text{PM} > 0.45$) и растворенными формами ($i = \text{PM}0.45$):

$$DS = c_{x(\text{PM}>0.45)} / (V_{c_x(\text{PM}0.45)} + V_{c_x(\text{PM}>0.45)}) = \frac{S \cdot c_x(\text{PM}>0.45) \cdot 10^{-3}}{(S \cdot c_x(\text{PM}>0.45) \cdot 10^{-3}) + MM_{(\text{PM}0.45)}}, (\%) \quad (9)$$

Исключительно в растворенной форме PM0.45 переносятся анионогенные тяжелые металлоиды – Mo, U, Sb, As, а также легкий металлоид B, соли NaCl , KCl , MgSO_4 , MgCl_2 , CaSO_4 , CaCl_2 .

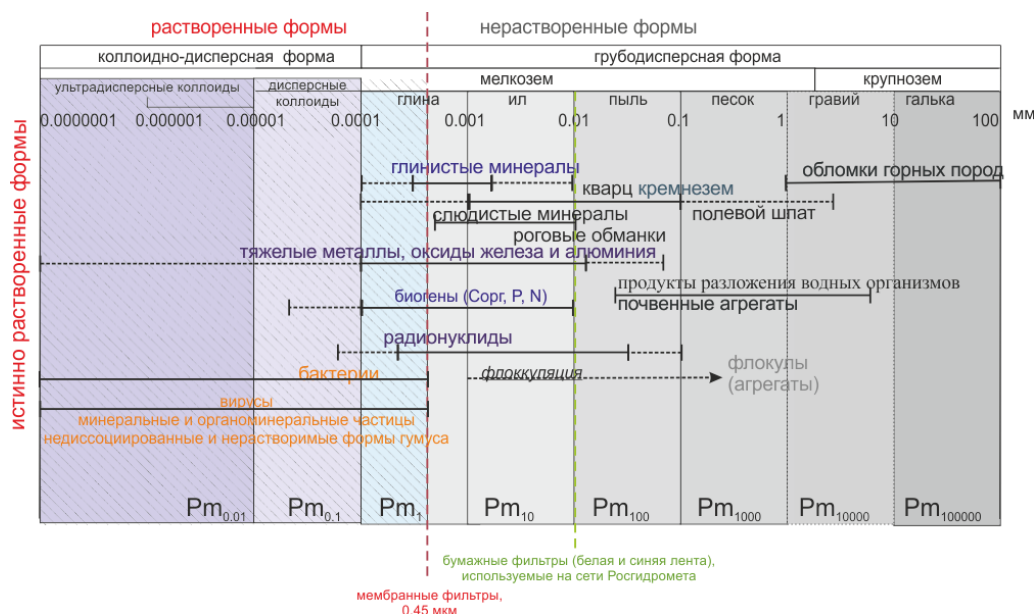


Рисунок 5. Геохимическая дифференциация речных наносов по крупности частиц (оранжевым цветом выделены соединения, встречающиеся исключительно в растворенной форме (PM0.45); синим – встречающиеся и в растворенной PM0.45, и в нерастворенной формах PM > 0.45; серым – преимущественно нерастворимые формы) (сплошная линия – основные диапазоны встречаемости; пунктирная линия – эпизодическая встречаемость)

Зависимость типа транспорта наносов $Q_R / (Q_R + Q_G)$ от гидравлических параметров Ro (табл. 2) и распределение химического состава по классам крупности определяют существование единой шкалы гидролого-геохимической дифференциации. Разные группы химических элементов и соединений переносятся в составе взвешенных или влекомых наносов. Распределение микроэлементов характеризует индекс SB (S, suspended; B, bed) – отношение весовой концентрации элемента x в составе влекомых наносов (или в придонных слоях) во фракции PM100 к его суммарной концентрации (в составе взвешенных $PM > 0.45$ и влекомых наносов (или в придонных слоях)):

$$SB(\%) = c_x (PM100)_{вл} / (c_x (PM100)_{вл} + c_x (PM > 0.45)_{взв}) \quad (10)$$

При изменении скоростных характеристик потока меняется типовой химический состав взвешенных и влекомых наносов. В низкокинетичных потоках ($V^* = 0.05$ м/с) в составе взвешенных наносов могут переноситься лишь частицы PM100, более крупные частицы PM100–500 находятся в составе влекомых наносов. В составе взвешенных наносов, как правило, отсутствуют элементы грубых фракций. За счет сортировки частиц PM10–50 по глубине происходит увеличение концентраций элементов тонких фракций с глубиной ($SB > 1$). Для дельты Селенги [Chalov S. et al., 2020] установлена тенденция ($cor = -0.32$, $p\text{-value} < 0.001$, $n = 150$) между гидравлическими условиями транспорта наносов Ro и параметром SB для элементов тонких фракций (Fe, Al, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, As, Mn, Sr):

$$SB = 1.25 Ro^{-0.08} \quad (11)$$

Среднекинетичными потоками ($V^* = 0.25$ м/с) во взвеси переносится часть первичных минералов, кварца, роговых обманок, полевого шпата наносов (рис. 6). В высококинетичных бурных потоках, встречаемых на горных реках ($V^* = 0.4$ м/с), происходит взвешивание первичных минералов, крупнообломочный материал может перемещаться в составе влекомых наносов. В составе перемещаемого материала за счет увеличения содержания SiO_2 величины c_{Al}/c_{Si} и c_{Fe}/c_{Si} распределяются с глубиной равномерно, что соответствует $SB_x = 1$. Эти соотношения являются в своем роде первым эмпирическим подтверждением количественных соотношений между особенностями транспорта наносов и их составом.

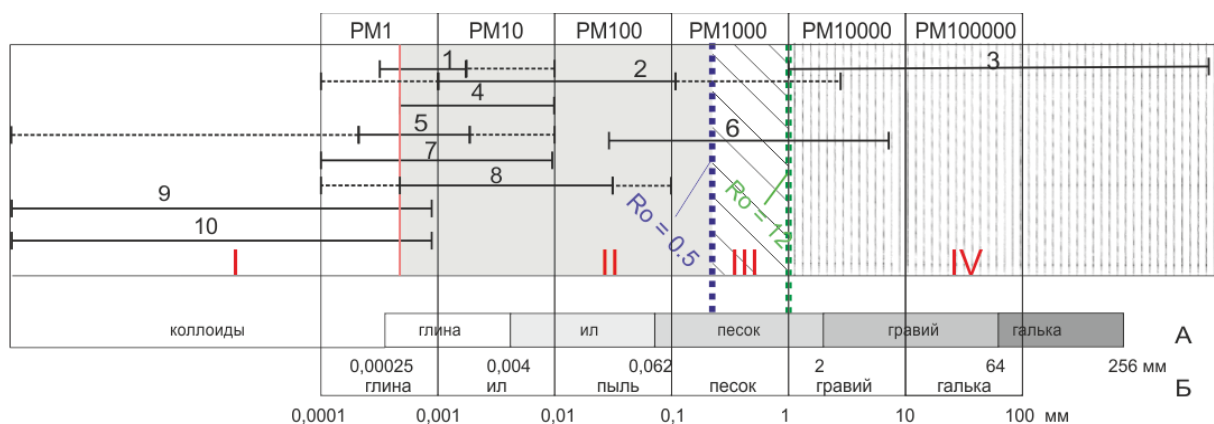


Рисунок 6. Пример шкалы гидролого-геохимической дифференциации состава речных наносов – для условий $V^* = 0.25$ м/с между формами транспорта вещества – условно растворенными (I), в составе взвешенных наносов (II), в составе взвешенных и влекомых наносов (III), находящимися в составе донных отложений (IV).

Типы химических соединений: 1 – глинистые минералы; 2 – первичные минералы; 3 – обломки горных пород; 4 – слюдистые минералы; 5 – тяжелые металлы; 6 – продукты разложения водных организмов; почвенные агрегаты; 7 – биогены; 8 – радионуклиды; 9 – бактерии; 10 – вирусы; минеральные и органоминеральные частицы; недиссоциированные и нерастворимые формы гумуса.

Классификации механического состава: А – [Friedman, Sanders, 1978]; Б – [Караушев, 1977]

Глава 4. Формирование стока и состава речных наносов в эрозионно-русловых системах

Бассейновая и русловая эрозия являются основными процессами, определяющими движение вещества в ЭРС. Современный объем потенциальной дождевой эрозии $W_{эр}$ (без учета талой эрозии) только по 6 крупнейшим бассейнам сибирских рек бассейна Северного Ледовитого океана (р. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма) оценивается величиной $6888 \cdot 10^6$ т/год, что более чем в 50 раз превосходит сток взвешенных наносов всех арктических рек России. В пределах крупных ЭРС $W_{эр}$ увеличивается в субширотном направлении с севера на юг, что соответствует усилению сельскохозяйственного использования земель (табл. 3). В южной части бассейна р. Енисей смыл почв увеличивается в 15 раз по сравнению с северными районами, в бассейне р. Обь и Дон – почти в 10 раз. Характерной особенностью распределения $W_{русл}$ является его максимальный рост на главной реке бассейна за счет преобладания здесь широкопойменного разветвленного русла и большей удельной мощности потока, способствующих формированию протяженных участков размыва [Чалов С.Р., Чалова, Школьный, 2021]. Увеличение объема наносов руслового происхождения, поступающих в русла рек, $W_{русл}$ и, следовательно, рост $K_{русл}$ характерны для слабоосвоенных частей ЭРС, особенно крупнейших рек. Например, в наименее освоенных частях бассейна Селенги $W_{эр} / (W_{эр} + W_{русл})$ снижается до 75 %.

Таблица 3. Интегральные оценки составляющих баланса наносов некоторых крупных рек РФ

Широта	Дон	Обь	Енисей	Селенга	Лена	Яна	Индиگیرка	Колыма	Камчатка
	Бассейновая эрозия $W_{эр}$, 10^6 т/год								
40–45 (44–45)	8.51								
45–50	132.07	430	425	425					
50–55	121.03	293	1070	185	26.1				
55–60		34.1	146		729				
60–65		17.6	29.4		606	8.03	796	366	
65–70		4.32	211		266	194	853	338	
70–75					40.5	5.21	0.71		
ВСЕГО по бассейнам	261.6	778	1881	609	1668	207	1650	704	21.8
	Сток наносов $W_R + W_G$, млн т/год								
	1.39	58.2	32.5	2.5	38.6	5.55	16.77	19.9	2.5
	Масштабный коэффициент $K_{эр}$								
	188.2	13.4	57.9	243	43.2	37.3	98.4	35.4	8.72
	Русловая эрозия $W_{русл}$, 10^6 т/год								
	-	34.13	27.3	15.1 (28.6)*	-	-	-	-	4.6
	Масштабный коэффициент $K_{русл}$								
	-	0.59	0.84	6.04 (11)	-	-	-	-	1.84
	Объем задержки в водохранилищах $A_{вдхр}$, 10^6 т/год								
		11	32	0	0.42	0	0	1.32	0
	Объем задержки наносов на склонах и днищах речных долин $A_{скл} + A_{русл}$, 10^6 т/год								
		742	1844	635	-	-	-	-	3.94

* В скобках указаны значения, полученные при оценке для р. Селенги и ее притоков общей протяженностью 8617 км речной сети.

В бассейновом масштабе соотношения эрозии и стока наносов $K_{русл}$ и $K_{эр}$ определяются широтной зональностью и зависят от размера ЭРС (рис. 7). В бассейнах малых рек ключевую роль играют местные факторы формирования стока наносов – ледниковая экзарация (р. Джанкуат) или объемы техногенного стока, например сбросы сточных вод с территорий разработок (р. Лангери). Усложнение структуры ЭРС определяет рост масштабной редукции стока наносов и смену транзитных ЭРС горных территорий ($k < 2$) на транзитно-аккумулирующие ($k \div 2-10$) и аккумулирующие ($k > 10$) при увеличении размера водосбора. Для крупных рек объемы эрозии на водосборе превосходят сток наносов в десятки ($K_{эр} = 13.4$ для р. Обь) и сотни раз на южных реках ($K_{эр}$ для р. Дон и Селенга составляет соответственно 188 и 243). Средняя величина коэффициента доставки наносов бассейнового происхождения, обратная масштабному коэффициенту $K_{эр}$, у крупных рек России составляет 0.02, т. е. только 2 процента продуктов бассейновой эрозии достигают устьевых областей крупных рек. В пределах южных освоенных территорий величины $K_{эр}$ значительно выше по сравнению с

северными территориями. Так, для ЭРС бассейна Оби $K_{эп}$ увеличивается в направлении с севера на юг от 1 до 146 (среднее – 26.5), в бассейне р. Дон – от 5 до 121 (среднее – 36.2). При учете талой эрозии согласно имеющимся расчетным и экспериментальным данным [Сурмач, 1976; Танасиенко, 2003; Евсеева, 2009; Шынбергенов, Ермолаев, 2017], величина $K_{эп}$ может увеличиваться на 20–30 %. В формировании аккумулятивного режима крупных ЭРС значительную играет задержка наносов в водохранилищах $A_{вдхр}$. Для 111 водохранилищ рек РФ объемом больше 0.1 км^3 средняя величина наносодерживающей способности TE по модели Бруна (5) оценивается в 91.3 %. Создание водохранилищ в среднем на 45 % снижает сток взвешенных наносов рек ($A_{вдхр} = 220 \cdot 10^6 \text{ т/год}$).

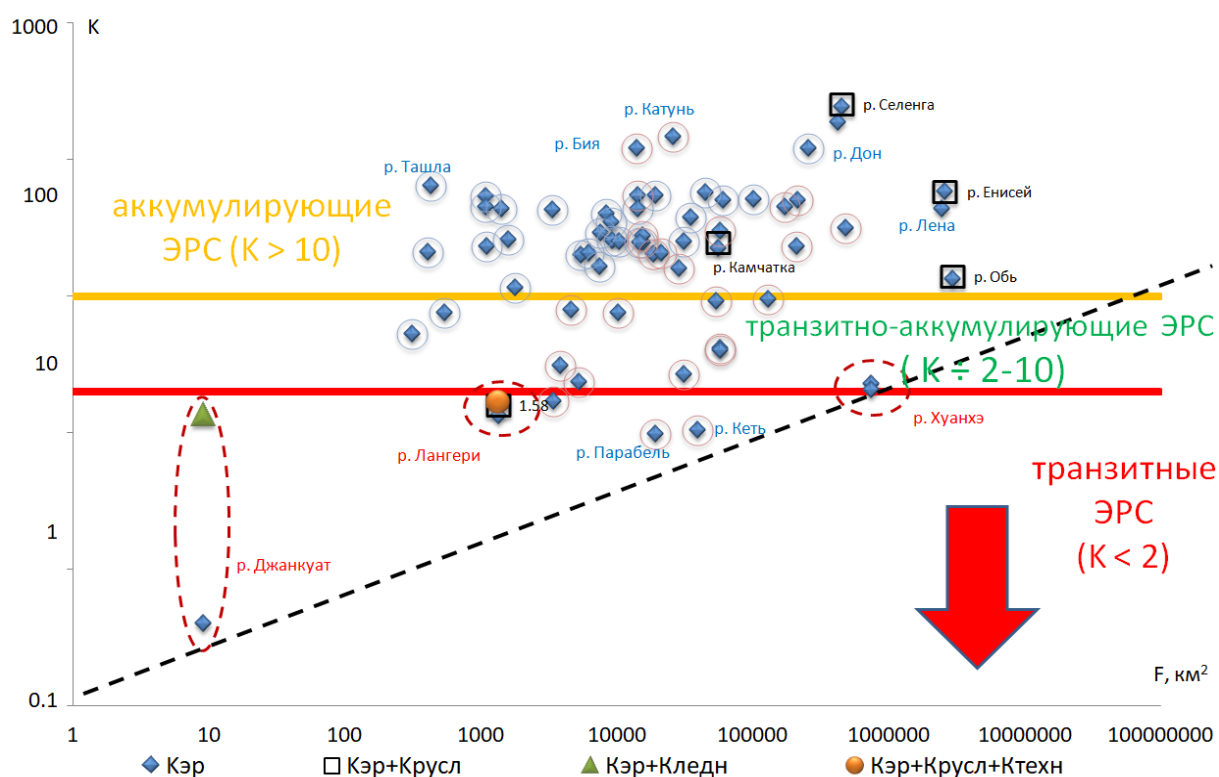


Рисунок 7. Связь площади ЭРС F и коэффициентов масштабной редукции k для рек России, оцененных относительно разных источников перемещения массы грунта (обозначения в тексте). Синими кругами обведены посты в бассейне р. Дон, красными – в бассейне р. Обь

Перехват в пределах водосбора и в днищах речных долин значительной части наносов восполняется русловой эрозией в нижнем течении рек. Масштабные коэффициенты редукции русловой эрозии (табл. 3) в пределах речных бассейнов южных рек, где широко распространены слабоустойчивые и неустойчивые русла, превышают 1 (в бассейне Селенги $K_{русл} = 6$, а при учете русловой эрозии 15 рек общей протяженностью 8617 км $K_{русл} = 11$). На реках большего размера вклад наносов –

продуктов эрозии главной реки, сопоставим со стоком наносов в замыкающем створе: на Оби и Енисее $K_{\text{русл}} < 1$. Это прослеживается и при оценке химического состава наносов, поступающих в русла рек в результате русловых размывов. В бассейне Селенги объемы русловой эрозии $= 28.6 \cdot 10^6$ т/год (**табл. 3**) были сопоставлены с данными о концентрациях тяжелых металлов (на примере Pb) в пойменных разрезах береговых уступов ($c_{\text{Pb}} = 20.4$ мкг/г, $n = 12$). Рассчитано, что в реки поступает за счет размывов берегов $= 1.6$ т/сут свинца. В то же время измеренные значения потоков свинца в нижнем течении р. Селенги по фактическим измерениям 2011–2016 гг. не превышали для разных фаз водного режима $W_{\text{Pb}} = 0.28$ т/сут [Lychagin et al., 2017; Эколого-географический атлас... 2019]. Таким образом, за счет размыва берегов в нижнем течении Селенги в русла рек поступает масса свинца, более чем в 5 раз превышающая его суммарный поток в замыкающем створе, значительная часть которого, соответственно, задерживается в днище речной долины.

Ведущая роль русловой эрозии в общем стоке наносов прослеживается и в глобальном масштабе. Современный сток взвешенных наносов рек мира определен по наиболее полной базе данных Д. Миллимана и К. Фарнворта в $18.6 \cdot 10^9$ т/год [Milliman, Farnsworth, 2013] и уточнен для арктических рек РФ [Магрицкий, 2010] и рек Каспийского и Черного морей (**табл. 4**). Оценка стока влекомых наносов W_G рек мира по единой методологии на основе уравнения (8) дает величину суммарного стока наносов рек мира $W_R + W_G$ в размере $27.2 \cdot 10^9$ т/год. На этой основе вклад русловых деформаций в сток наносов, т. е. разница между объемами материала, поступающего в результате размыва берегов и задерживаемого в пределах русловой сети, $W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}}$:

$$W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}} = W_R + W_G - A_{\text{вдхр}} - W_{\text{эп}} SDR - W_{\text{техн}}, \quad (12)$$

оценивается величиной в диапазоне $10.2 \cdot 10^9 \div 16.4 \cdot 10^9$ т/год, что соответствует коэффициенту генетической значимости наносов руслового происхождения $\alpha_{\text{русл}}(\%) = (W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}}) / (W_R + W_G - A_{\text{вдхр}}) = 60 \div 95.2\%$.

Таблица 4. Оценка составляющих баланса наносов стока рек в Мировой океан

Параметр	Оценка			Источник данных
W^* , т/год	$34.5 \cdot 10^9$			Borelli et al, 2017
W_R , т/год	$10 \cdot 10^9$			Vorosmarty et al., 2003
W_G , т/год	$0.14 \cdot 10^9$			Асарин и др. 2012
$W_R + W_G$, т/год	$27.2 \cdot 10^9$			См. пояснения в тексте
Сценарии доставки наносов SDR	$SDR = 0.2$	$SDR = 0.1$	$SDR = 0.02$	
W_{SDR} , т/год	$6.9 \cdot 10^9$	$3.4 \cdot 10^9$	$0.69 \cdot 10^9$	
Генетическая значимость бассейновой эрозии $\alpha_{эр}$	40.1 %	20.1 %	4 %	
	$10.2 \cdot 10^9$	$13.6 \cdot 10^9$	$16.4 \cdot 10^9$	
Генетическая значимость русловой эрозии $\alpha_{русл}$	59.07 %	79.13 %	95.2 %	

* Без областей внутреннего стока, за исключением бассейнов Каспийского и Азовского морей.

Особые условия формирования ЭРС характерны для территорий, где большую роль в переносе вещества могут играть технические средства, а также биологические процессы. В условиях горнодобывающей деятельности формирование потока наносов в пределах нарушенных долин $(W_R + W_G)_{горн}$ меньше среднегодового стока наносов $W_R + W_G$ в замыкающих створах нарушенных водосборов [Chalov S., 2014]:

$$W_R + W_G = (W_R + W_G)_{горн} + (W_R + W_G)_{пр}, \quad (13)$$

где $(W_R + W_G)_{пр}$ – годовой сток наносов с ненарушенной части бассейна. Поток наносов формируется за счет продуктов поверхностного смыва (склоновой эрозии) $W_{скл}$; перетоков из технологических водоемов $W_{тех.вод}$; русловой эрозии по длине искусственных русел (руслоотводов) $W_{р.иск}$ и сбросов сточных вод из илоотстойников $W_{сточ}$:

$$(W_R + W_G)_{горн} = W_{скл} + W_{тех.вод} + W_{р.иск} + W_{сточ} \quad (14)$$

За счет активизации русловых деформаций в руслоотводах ведущую роль в балансе наносов горных систем играет $W_{р.иск}$. Наблюдения на реках бассейна р. Вывенка (разработки россыпной платины Сейнав-Гальмознанского горного узла, Корякия) и р. Туул (разработка россыпного золота, бассейн р. Селенга) показали, что величина $W_{р.иск}$ может достигать 90 % от годового стока наносов техногенного происхождения $(W_R + W_G)_{горн}$. Изменения баланса наносов определяют трансформацию гранулометрического и химического состава наносов. Происходят уменьшение крупности переносимых реками наносов, рост концентраций и потоков биогенов (минеральный фосфор), тяжелых металлов и металлоидов, сопровождающиеся увеличением доли взвешенной формы транспорта [Чалов С.Р. и др., 2015; Pietron, Chalov S. et al., 2017; Jarsjo, Chalov S. et al., 2017]. Рекам районов горнодобывающей деятельности характерно увеличение DS (9) и

коэффициентов обогащения EF (рис. 8). Расчет последнего выполнен по формуле $EF = (C_{xi}/C_{Sc}) / (C_{xg}/C_{Scg})$, где C_{xi} образец – содержание химического элемента в объекте исследования; C_{Sc} образец – содержание скандия в объекте исследования, C_{xg} образец – содержание химического элемента в горной породе; C_{Scg} образец – содержание скандия в горной породе.

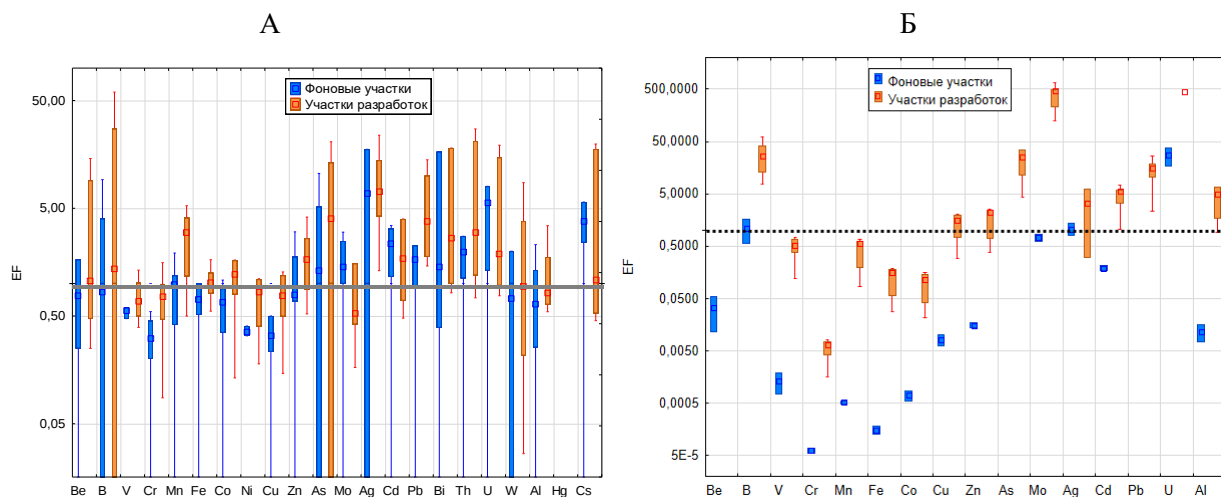


Рисунок 8. Распределение коэффициента обогащения EF для взвешенных форм микроэлементов в бассейнах рек, нарушенных горнодобывающей деятельностью: р. Туул, Монголия (А); р. Юкспорйок, Хибинский горный массив (Б) (диапазон без выбросов, среднее, стандартная ошибка (STD) и доверительный интервал 25–75 %)

Особенности влияния биологических процессов на ЭРС рассмотрены на примере экосистем литофильных рыб семейства лососевых (*Salmonidae*), которые закапывают икру в аллювий и создают специфические микроформы руслового рельефа – нерестовые бугры. В процессе нереста лососевых в локальном масштабе ЭРС воздействие происходит за счет формирования величины $W_{\text{биол}}$. Выполненные натурные наблюдения на реках Камчатки, а также исследования на реках Британской Колумбии (Канада) [Albers, Petticrew, 2013; Hassan и др., 2008] и северо-западных штатов США [Fremier, Yanites, Yager, 2018], характеризуют типовые количественные изменения стока наносов под влиянием лососевых рыб. Объем транспортируемых влекомых наносов в результате нереста лососевых рыб $W_{\text{биол}}$ составляет 25–40 % от общего годового стока наносов $W_R + W_G$. Расход влекомых наносов может возрасть в 10–20 раз [Albers, Petticrew, 2013; Fremier, Yanites, Yager, 2018; Hassan и др., 2008]), взвешенных – в 2–3 раза.

Глава 5. Временная изменчивость транспорта речных наносов

Эволюционно-хронологические интервалы ЭРС выделены в ряду от геологических и исторических изменений стока наносов (периоды 10^{4+} и 10^2 лет) до турбулентных колебаний мутности. Характерным шагом во времени многолетних колебаний служат среднегодовые значения стока наносов ($\Delta T = 3.2 \cdot 10^7$ с). Сезонные колебания ($\Delta T = 2.6 \cdot 10^6$ с) устанавливаются для периода времени $\Delta T < 3.2 \cdot 10^7$ (1 год), синоптические – для $\Delta T < 2.6 \cdot 10^6$ (1 месяц). Более быстрые изменения стока наносов проявляются в различных временных масштабах (от первых секунд до часов), в частности, в виде пульсаций мутности. Они соответствуют прохождению через створ двух последовательных больших вихрей [Гришанин, 1992; Clifford et al., 1995; Kirkbride, Ferguson, 1995], т. е. масштабам макротурбулентности $\Delta T < 3.6 \cdot 10^3$ ($\Delta T = 0.9 \cdot 10^3$ сек).

Для территории России прослеживается вариация в субширотном направлении многолетней изменчивости составляющих баланса наносов – $W_{\text{зр}}$, W_R . На постах севернее 60° с. ш. преобладают тенденции на увеличение стока наносов ($\Delta W_R > 0$), определяемые по среднегодовым расходам взвешенных наносов при сравнении периодов с 1980–1990-х гг. по 2010–2016 гг. (с продолжительностью периода наблюдений не менее 20 лет):

$$\Delta W_R = (W_{R2} - W_{R1}) / W_{R1} (\%), \quad (15)$$

где W_{R1} – среднегодовой расход взвешенных наносов за начальный период времени, W_{R2} – среднегодовой расход взвешенных наносов за конечный период времени. Наоборот, на юге, на фоне значительного снижения водного стока и большой естественной его зарегулированности, в начале XXI века преобладают тенденции уменьшения стока взвешенных наносов ($\Delta W_R < 0$). Широтная зональность в многолетнем изменении стока наносов связана с контрастными условиями преобразования ЭРС – их максимальном освоении в южных регионах [Кобылкин, Баженова, 2013; Медведева и др., 2018] и слабой освоенностью в северных. Большую роль играет снижение темпов смыва почв с пахотной части водосборов за последние десятилетия, определяемое сокращением объемов поверхностного стока со склонов в период снеготаяния из-за повышения температуры воздуха в весеннее время года, уменьшения глубины промерзания почв и снижения частоты выпадения экстремальных ливней [Шарифуллин, Гусаров, Голосов, 2018]. На Селенге изменения режима осадков между двумя климатическими периодами (до 1978 года и после 1978 года) и разные тенденции развития хозяйства в пределах

русской и монгольской частей бассейна определили противоположную направленность трендов эрозии (рис. 9). Отмечается двухкратное снижение интенсивности эрозии в бассейнах рек Уда, Хилок, Чикой, шестикратное – в бассейне Джиды. Для многих водосборов в Монголии характерно увеличение $W_{эр}$ [Karthe, Chalov S., Borchardt, 2015].

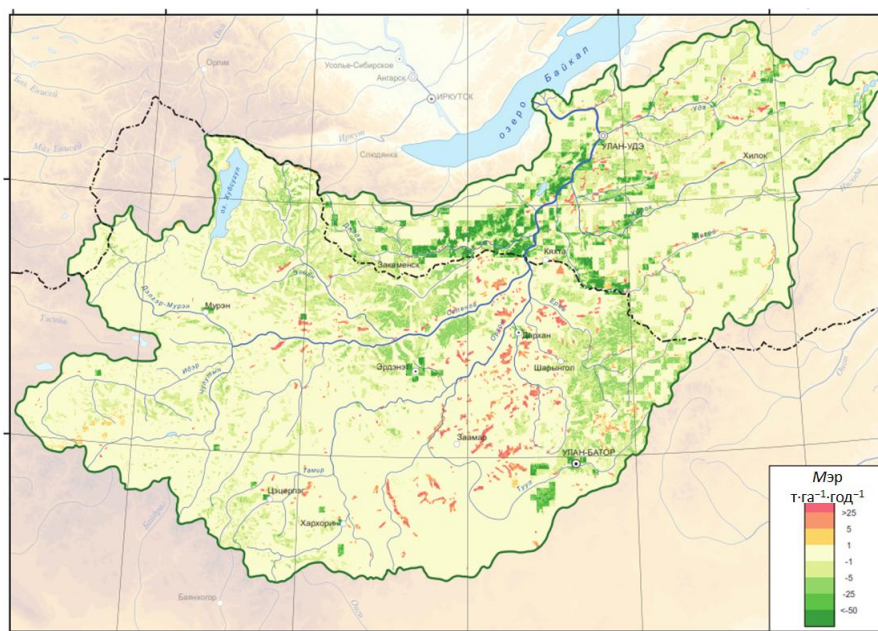


Рисунок 9. Изменение потенциальной эрозии $M_{эр}$ в бассейне Селенги в период до 1978 г. по сравнению с 1978–2016 гг. [Эколого-географический атлас-монография Селенга–Байкал, 2018]

Анализ колонок донных наносов, отобранных в старицах нижнего течения р. Рейн ([Winkels, 1997; Перельман, Касимов, 1999], р. Миссисипи [Metre Van, Horowitz, 2013], поймах малых рек США (оз. Комо, 3 [Metre Van, Mahler, 2004]) и р. Селенга (рис. 10), характеризует предельные значения многолетней изменчивости содержания тяжелых металлов во взвешенных наносах по отношению между измененными C_{x2} и фоновыми C_{x1} концентрациями элемента x :

$$\Delta C_x = C_{x2} / C_{x1} (\%) \quad (16)$$

В условиях высокого техногенного воздействия (р. Рейн, малые реки США) изменчивость концентраций тяжелых металлов во взвеси ΔC_x достигает 10. При слабой антропогенной нагрузке $\Delta C_{x0} = 2-5$. При отсутствии выраженного техногенного воздействия $\Delta C_{x0} \approx 1$. Особое влияние на трансформацию состава наносов оказывает режим русловых деформаций, связанный с аккумуляцией загрязненных наносов в пойменно-русловом комплексе и их последующим размывом и повторным вовлечением в транспорт. Исследования в бассейне р. Наутанен (Швеция) [Fischer, Rosqvist, Chalov S., Jarsjo, 2020], где расположено месторождение меди, разрабатывавшееся в начале XX

века, характеризуют увеличение средних объемных концентраций тяжелых металлов Cu, Zn и Cd в десятки и даже сотни раз ($\Delta V_{c0\text{ Cu}} > 100$, $\Delta V_{c0\text{ Cd}} > 10$, $\Delta V_{c0\text{ Zn}} > 10$).

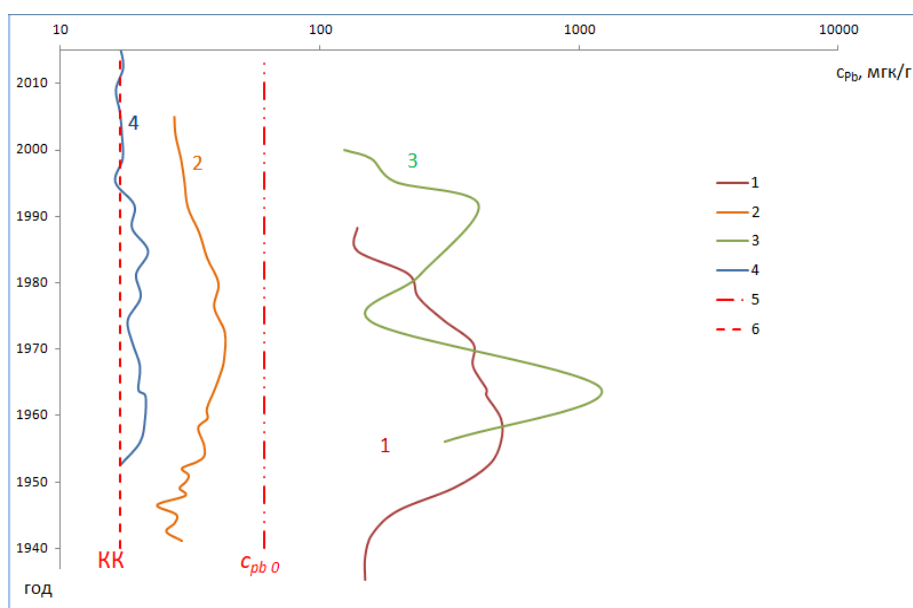


Рисунок 10. Многолетние изменения содержания C_{Pb} в пойменно-озерных отложениях нижнего течения р. Рейн (1, по [Winkels, 1997; Перельман, Касимов, 1999], р. Миссисипи (2, по [Metre Van, Horowitz, 2013], малых рек США (оз. Комо, 3, по [Metre Van, Mahler, 2004]) и р. Селенга (4) (5 – среднемировые концентрации $C_{Pb\ 0}$ во взвешенных наносах мира [Viers, Dupré, Gaillardet, 2009]; 6 – кларки концентраций верхней части континентальной земной коры КК [Григорьев, 2009])

Размер рек и высотное положение ЭРС играют важнейшую роль в сезонных и синоптических колебаниях стока наносов. Они наиболее сильно выражены на горных реках. По мере увеличения размера рек и меньшей суточной цикличности стока величина $\Delta T_{ГС}$, определенная для отдельных гидрологических событий (ГС), выделенных по расчленению гидрографов методом локальных минимумов от базисного стока [Sloto, Crouse, 1996] как разница между максимальным и минимальным значением мутности за гидрологическое событие, снижается (табл. 5). Увеличение максимального диапазона синоптических колебаний $\Delta T_{ГС\ макс}$ характерно для рек с большей средней мутностью $T_{ср}$ ($\text{cor} = 0.9$). Уменьшение $\Delta T_{ГС\ макс}$ с ростом размера (F , км²) и высоты водосбора (H , м абс), а также продолжительности ГС, прослеживается на уровне тенденций ($\text{cor} = 0.3 \div 0.4$). Внутригодовая и синоптическая изменчивость мутности определяет изменение доли растворенных и нерастворенных форм микроэлементов DS . На Селенге доля Zn, Cd и Cu достигает 80–90 % во время паводков, в то время как в те же периоды года на реках, где осадки отсутствуют, $DS < 25$ %. На волне летнего паводка 2011 г. в р. Орхон [Алексеевский и др., 2013] отмечались высокие значения мутности

воды, на долю взвешенных форм миграции Fe, Mn, Pb приходилось 95–99 %, Cu, Zn, Ni, Co – 80–90 %, B, U, As – 30–50 %, Mo – <10 % от их суммарного содержания [Чалов С.Р. и др., 2019; Kasimov et al., 2020].

Таблица 5. Максимальный диапазон колебаний мутности воды $\Delta T_{\text{ГС макс}}$ для разных рек при прохождении паводков (гидрологических событий, ГС)

Река	Пост	Кол-во ГС	Средняя продолжительность ГС (часов) $\pm SD$	Средняя мутность воды за период наблюдений $T_{\text{ср}}$, НТУ	$\Delta T_{\text{ГС макс}}$, НТУ
Хаара	Бурен Толгой	74	37.4 ± 59.5	172	1128
Селенга	Улан-Удэ	2	2.3 ± 0.4	221	622
Сухая Елизовская	гст № 5	1	53.7	494	1061
Сухая Елизовская	ВГ1	3	16.1 ± 7.9	86	324
Тарфала	гст №2	4	24.2 ± 9.2	316	815
Цанык	Ц1	5	12.4 ± 5.2	221	1141
Лангери	«Себа»	32	35 ± 21.3	99	1124
Джанкуат	гст Джанкуат	39	20.9 ± 8.9	1184	3141
Сухой Ильчинец	«Мост»	9	23.2 ± 28.2	2123	3091
Велеса	Сосвятское	16	255 ± 171	8	85
Тарфала	гст № 1	8	25 ± 7.5	138	832
Тарфала	гст № 3	4	20.4 ± 2.9	12	194
Сетунь	Аминьево	23	78 ± 39.2	53.2	211

* Описание постов приведено в работе [Чалов С.Р., Цыпленков, 2020].

В изменчивости стока наносов широкопойменных рек важнейшую роль играет режим русловых деформаций, трансформирующийся при изменениях водности за счет увеличения или снижения задержки переносимого материала на затопливаемых пойменных массивах. За счет изменений продолжительности и величины выхода воды на пойму меняются среднемноголетние значения аккумуляции наносов $A_{\text{русл}}$. В результате для взвешенных наносов условие $W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}} > 0$ (преобладание русловой эрозии над аккумуляцией) характерно для маловодных периодов стока, $W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}} < 0$ (преобладание аккумуляции) – для многоводных. На 80-километровом участке р. Терек от г. п. Каргалинский гидроузел до г. п. Аликазган (104–21 км от устья) колебания годовых величин $W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}}$ за период с 1990 по 2019 г. хорошо аппроксимируются ходом водности р. Терек ($R^2 = 0.75$):

$$W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}} = 2.3Q_0 + 461 \quad (17)$$

В пределах 300 км нижней Селенги при смене периодов повышенной (1982–1995) и пониженной (1996–2017) водности произошло снижение среднегодовой аккумуляции и

формирование системы продольного увеличения годового стока взвешенных наносов. В период повышенной водности (до 1995 г.) в отдельные годы до 70 % переносимого материала (**рис. 11**) задерживалось на пойме, что определяло отмечавшиеся в это время продольные снижения расходов взвешенных наносов. При годовом объеме стока взвешенных наносов в 1991 г. выше дельты (г. п. Мостовой) $W_{R0} = 1.01 \cdot 10^6$ т/год величина на вышерасположенном участке достигала $-2.9 \cdot 10^6$ т/год, т. е. за счет аккумуляции сток наносов уменьшался к вершине дельты почти в 4 раза. Это объясняется затоплениями пойменных территорий, происходящими при прохождении основной части стока наносов (до 95 %) в короткие периоды максимального стока [Чалов С.Р., Романченко, Касимов, 2018].

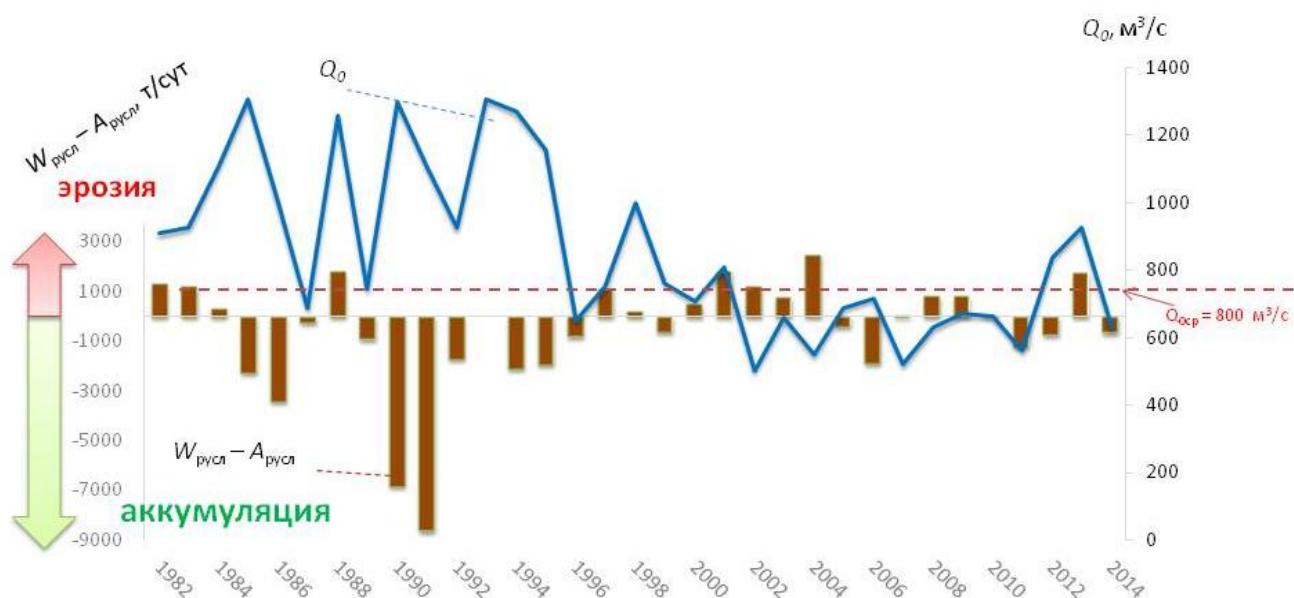


Рисунок 11. Многолетняя изменчивость баланса взвешенных наносов по длине нижнего течения русла р. Селенга (участок от г. п. Наушки до г. п. Мостовой)

Сезонные и синоптические масштабы изменений стока наносов широкопойменных рек также определяются режимом русловых деформаций. Выделяются 3 типовые системы сезонных изменений руслового регулирования взвешенных наносов на бесприточных участках крупных рек: продольного уменьшения в период повышенной водности (1), продольного увеличения в период пониженной водности (2) и поперечной неоднородности (3), связанной с концентрированием взвешенных наносов под одним из берегов при поступлении паводков с притоками [Чалов С.Р., Тарасов, Чалова, 2021]. Снижение мутности воды по длине 200-километрового участка р. Лена в районе г. Якутска (**рис. 12**), определенное по

ретроспективному анализу 90 снимков LandSAT за период с 1992 по 2018 г., наблюдается при разных расходах воды, однако всегда происходит при максимальной водности ($Q > 20\,000\text{ м}^3/\text{с}$). Это связано с аккумуляцией наносов на поверхности затопляемых пойменных сегментов за счет снижения уклонов русла и возникновения дополнительных сопротивлений. Среднее значение для периодов повышенного стока соответствует уменьшению мутности в среднем на 4 %. Значительную роль в продольном снижении мутности воды играют боковые пойменные протоки, аккумулирующие часть поступающей взвеси и оказывающие разбавляющее воздействие на поток наносов ниже соединения с основным руслом. В межень достоверно прослеживается увеличение мутности воды на перекатных участках, что связано с их размывом.

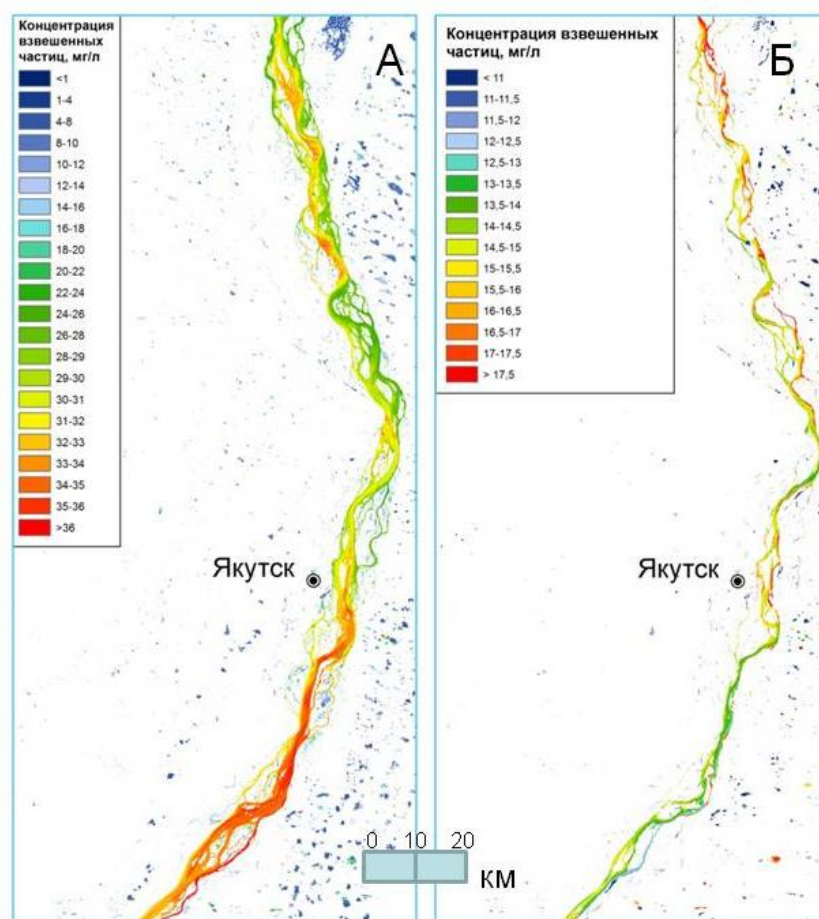


Рисунок 12. Изменение мутности воды по длине разветвленного русла р. Лена 15-06-2007 при расходе воды по г. п. Табага $36\,300\text{ м}^3/\text{с}$ (А) и 19-09-2013 при расходе воды $8\,680\text{ м}^3/\text{с}$.

Еще более четко сезонные закономерности баланса наносов проявляются в дельтах. В дельтах Селенги и Верхней Ангары значения отрицательны (аккумуляция) только при максимальных расходах воды, при низких расходах воды отмечаются случаи как эрозии, так и аккумуляции. При увеличении уровня воды происходит затопление

пойм и осередков, что способствует отложению наносов на их поверхности из-за изменения шероховатости (поймы и осередки чаще всего покрыты травянистой растительностью, которая удерживает взвешенные наносы). С другой стороны, больше воды в это время поступает в озерные и болотные массивы [Chalov S. et al., 2017; Pietroni, Nittrouer, Chalov S., 2018]. Возможной причиной сезонных изменений баланса взвешенных наносов в дельте является вегетационная активность растительности [Чалов С.Р. и др., 2019]. Зависимость изменения мутности воды по длине 7 основных протоков ΔSSC_0 от расхода воды в вершины дельты Селенги Q (выше дельты) имеет вид:

$$\Delta SSC_0 = 10^{-6}Q^2 - 0.09Q + 4.6 \quad (18)$$

Роль водности в сезонных изменениях баланса наносов дельт меняется в условиях распространения вечной мерзлоты. В дельте р. Лена с возрастанием среднесуточных температур воздуха от 5 до 14 °С наблюдается усиление продольного увеличения мутности воды по длине основных рукавов дельты Лены, что объясняется активизацией процессов термоэрозии и термоденудации [Чалов С.Р., Прокопьева, 2021]. Увеличение мутности наиболее четко прослеживается у берегов южной экспозиции протоков, имеющих субширотное направление стока (Быковская протока). В дельте Колымы отрицательный баланс взвешенных наносов, т. е. продольное уменьшение расхода наносов, отмечается только при пониженной водности, когда расходы воды составляют менее 15 000 м³/с (**рис. 13**). В отличие от дельт южных рек, подъем уровней сопровождается активизацией размывов берегов, в том числе за счет термоэрозии, в результате чего и в дельте Лены, и в дельте Колымы в периоды высокой водности аккумулятивная составляющая не является доминирующей.

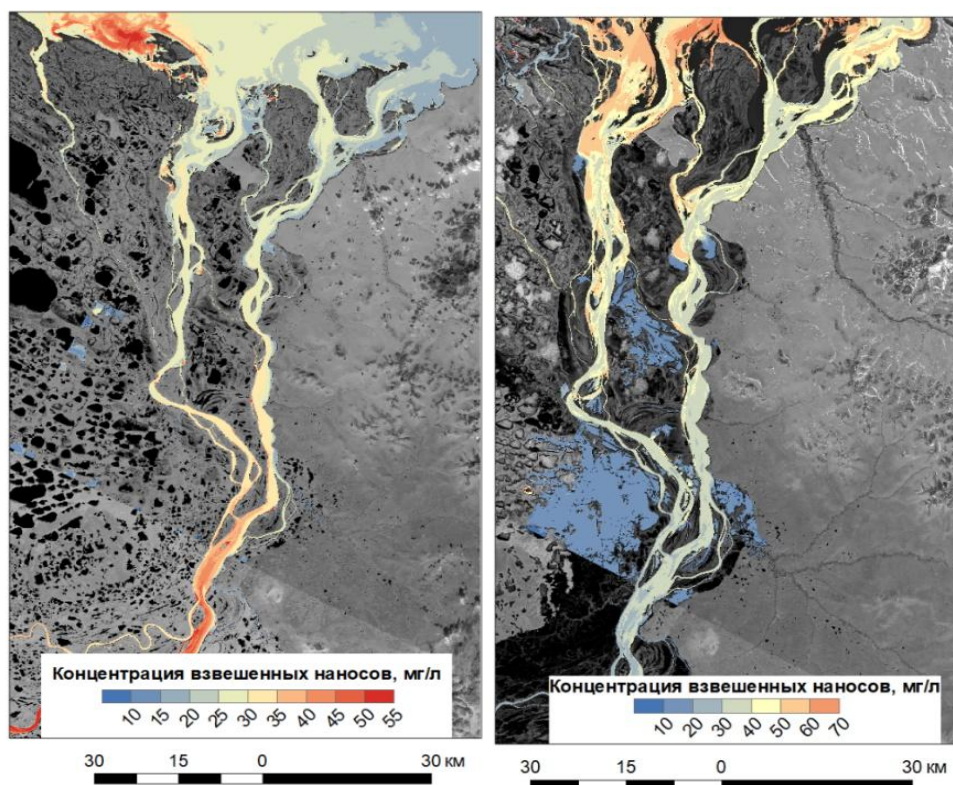


Рисунок 13. Изменение мутности воды по длине дельты р. Колыма (продольное увеличение при $Q = 31\,390\text{ м}^3/\text{с}$ и продольное уменьшение при $Q = 6300\text{ м}^3/\text{с}$)

Указанные закономерности нарушаются в связи с существованием турбулентных пульсаций стока наносов [Чалов С.Р., Цыпленков, 2020]. Для оценки изменчивости мутности воды, вызванной турбулентностью, для 22 высокочастотных (частота записи менее 1 минуты) и 15 низкочастотных (частота записи от 2 до 30 минут) рядов рассчитывался критерий $TI_{ГС}$ (от англ. *Turbidity Index*), равный отношению между максимальным и минимальным значением мутности в пределах скользящего окна с шириной один час ΔT_i и общим изменением оптической мутности в пределах выбранного гидрологического события $\Delta T_{ГС}$.

$$TI_{ГС} = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{ГС}} \quad (19)$$

Определялся средний вклад макротурбулентных изменений мутности для всего ряда наблюдений $TI_{ср}$ для данного створа как среднее для всех гидрологических событий. Для этого используемые ряды низкочастотных записей приведены к частоте 20 минут. Максимальная амплитуда макротурбулентных изменений мутности свойственна малым водотокам, характеризующимся большими уклонами русла, относительно высокой транспортирующей способностью и малыми расстояниями от источников поступления наносов. С увеличением площадей бассейнов амплитуды пульсаций уменьшаются. Роль

20-минутных изменений мутности в общей изменчивости мутности максимальна на реках малого размера. TI_{cp} снижается при росте площади водосбора (F , км²) ($r = -0,56$):

$$TI_{cp} = -0.01 \ln(F) + 0.2356. \quad (20)$$

Для ручьев ($F < 100$ км²) зависимость более достоверна ($r = -0,7$):

$$TI_{cp} = -0.024 \ln(F) + 0.2516. \quad (21)$$

Указанные закономерности нарушаются в связи с существованием турбулентных пульсаций стока наносов. Для оценки изменчивости колебаний мутности воды, вызванных турбулентностью, для 37 рядов высокочастотной (частота записи менее 1 минуты) и низкочастотной (частота записи от 2 до 30 минут) мутности рассчитывался критерий $TI_{ГС}$, равный отношению между максимальным и минимальным значением в пределах скользящего окна с шириной один час ΔT_i и общим изменением в пределах выбранного гидрологического события $\Delta T_{ГС}$. Высокая скоррелированность (более 0.75) участков общей последовательности рядов мутности воды наблюдается в пределах 100 минут. Подобные закономерности проявляются и в условиях естественного режима (реки ледниковых и вулканических районов), и при преобладании в стоке наносов частиц антропогенного происхождения (р. Сетунь).

Глава 6. Экологические функции речных наносов и подходы к их нормированию

Перенос твердых частиц речными потоками является важнейшим фактором среды, оказывающим влияние на формирование фауны рек и в значительной мере проявляющимся в пространственной неоднородности сообществ. Мутность воды, гранулометрический и химический состав частиц, величина (и направленность) массообмена в придонном слое (**рис. 14**) определяют типовые эффекты для ихтиоценов: поведенческие, механические (повреждение покровов), токсические, изменения местообитаний и изменения в кормовой базе. В наибольшей степени на пресноводные экосистемы влияет изменение состава донных отложений и мутности воды, поэтому именно эти параметры определяют экологические функции речных наносов.



Рисунок 14. Схема воздействий речных наносов на сообщества речных организмов

Речные наносы, отлагающиеся на дне, играют ведущую роль в формировании видовой структуры, численности и биомассы зообентоса. Для литореофильных биоценозов, представленных гидробионтами, населяющими каменистый грунт на участках с быстрым течением, отмечается снижение разнообразия при тонкодисперсном составе грунта [Hartwig и др., 2016; Jones и др., 2012]. На реках бассейна Вывенки в условиях роста земель, нарушенных горнодобывающей деятельностью, происходил закономерный рост среднегодовой мутности воды [Чалов С.Р., Леман, 2014], что привело к деградации сообществ бентоса на контрольных участках р. Левтыринываям (плес):

$$B = 26.9SSC^{-1.19}, \quad (22)$$

где B – биомасса бентоса (г/м^2). Влияние донных отложений на ихтиоцены в первую очередь связано с развитием икры литофильных рыб, нерестящихся в грунте. Наиболее подверженной к действию твердых частиц группой рыб являются лососи (*Лососевые, Salmonidae*). На основе сопоставления опубликованных результатов исследований выживаемости икры атлантической семги [Greig, Sear, Carling, 2005; Heywood, Walling, 2007; Julien, Bergeron, 2006] и данных, полученных на реках Камчатки для кеты и нерки [Леман, 1990], выявлены независимость выживаемости на уровне $M > 60$ % от содержания мелких фракций в грунте; при $PM_{1000} < 3$ % выживаемость всегда выше среднего ($M > 60$ %). При $PM_{1000} > 3$ % существуют условия снижения выживаемости ниже 50 %, а критический уровень выживаемости ($M < 10$ %) возможен при $PM_{1000} >$

5%. Негативное воздействие от заиления грунта (поступления мелких частиц в состав русловых отложений) для лососевых рыб определяется величиной выживаемости икры ниже естественного уровня – в диапазоне $M = 5\text{--}10\%$.

Для наиболее распространенных семейств рыб ихтиофауны России (лососевых Salmonidae, хариусовых Thymallidae, сиговых Coregonidae, карповых Cyprinidae, окуневых Percidae, осетровых Acipenseridae и сомовых Siluridae) проведено обобщение сведений о чувствительности к величине SSC [Чалов С.Р., Есин, Леман, 2019]. По убыванию толерантности к мутности воды они ранжируются от осетровых и сомовых (не более 1000 мг/л и не менее 50 мг/л) до карповых (не более 250 мг/л), окуневых (не более 100 мг/л) и лососевых (не более 10 мг/л, выраженные изменения при 25–35 мг/л). Комплекс адаптаций лососевых Salmonidae предопределяет минимальную толерантность к мутности воды (табл. 6). Изменение поведения и первые сигналы стресса выявляются у них при постоянной мутности более 10 мг/л [European Inland Fisheries Advisory Commission (EIFAC), 1964; Newcombe, Jensen, 1996]. Благоприятные условия обитания осетровых связаны со значениями мутности до 500 мг/л. Приспособленность к высокой мутности дополняется негативными эффектами, отмечаемыми для выживаемости молоди осетровых при низкой мутности (<50 мг/л) в связи с выеданием хищниками.

Таблица 6. Дифференцированная параметрическая шкала продолжительного воздействия (месяцы-годы) мутности на разные группы рыб, характерные для рек Российской Федерации

Мутность	Отряды					
	Salmonoidei (подотряд отряда Salmoniformes)	Perciformes	Cypriniformes	Siluriformes	Acipenseriformes	
	Семейства					
	лососевые Salmonidae	сиговые Coregonidae	окуневые Percidae	карповые Cyprinidae	сомовые Siluridae	осетровые Acipenseridae
< 10 мг/л						
10–25 мг/л						
25–100 мг/л						
100–250 мг/л						
250–500 мг/л						
500–1000 мг/л						
1000–5000 мг/л						
5000–10 000 мг/л						
10 000–25 000 мг/л						
25 000–100 000 мг/л						
>100 000 мг/л						

Зеленый – нормальное состояние; желтый – поведенческие последствия; красный – летальные эффекты.

Полученные наработки использованы для развития методологии нормирования допустимых воздействий на речные системы [Чалов С.Р. и др., 2019; Чалов С.Р., Леман, 2019]. Для трех крупных территорий Российской Федерации (бассейны рек Лена и Селенга и полуострова Камчатка) проведена апробация системы определения нормативов взвешенных веществ. Для рек Камчатки обосновано критическое значение SSC, устойчивое превышение которого приводит к негативным последствиям для лососевых рыб, в диапазоне от 25 до 35 мг/л; действие норматива не распространяется на реки территорий современного вулканизма. Для бассейна р. Селенга рекомендуется дифференцированный норматив: 25 мг/л для рек, являющихся местообитанием семейства лососевых (таймень, ленок) и хариусовых, и 50 мг/л для рек, где преобладают сиговые (омуль). Норматив для бассейна р. Лена устанавливает диапазон допустимой мутности от 25 до 35 мг/л для всей речной сети, за исключением участков нижнего течения, отличающихся более высокими значениями мутности (50–100 мг/л). Рассмотрены возможности управления хозяйственной деятельностью в долинах рек, где основным аспектом воздействия на речные экосистемы становится поступление твердого материала в реки. Зависимость объемов поступления взвеси от площади разработок может использоваться для нормирования горнодобывающей деятельности в речных долинах малых рек. На примере рек Камчатки обоснован региональный норматив, который предполагает отторжение земель под горные работы не более 10 % водосбора малых рек (**рис. 15**) и не более 5 % водосборов водотоков меньшего размера (ручьи), определяющих экологически допустимые объемы загрязнения рек речными наносами [Чалов С.Р., Леман, 2014].

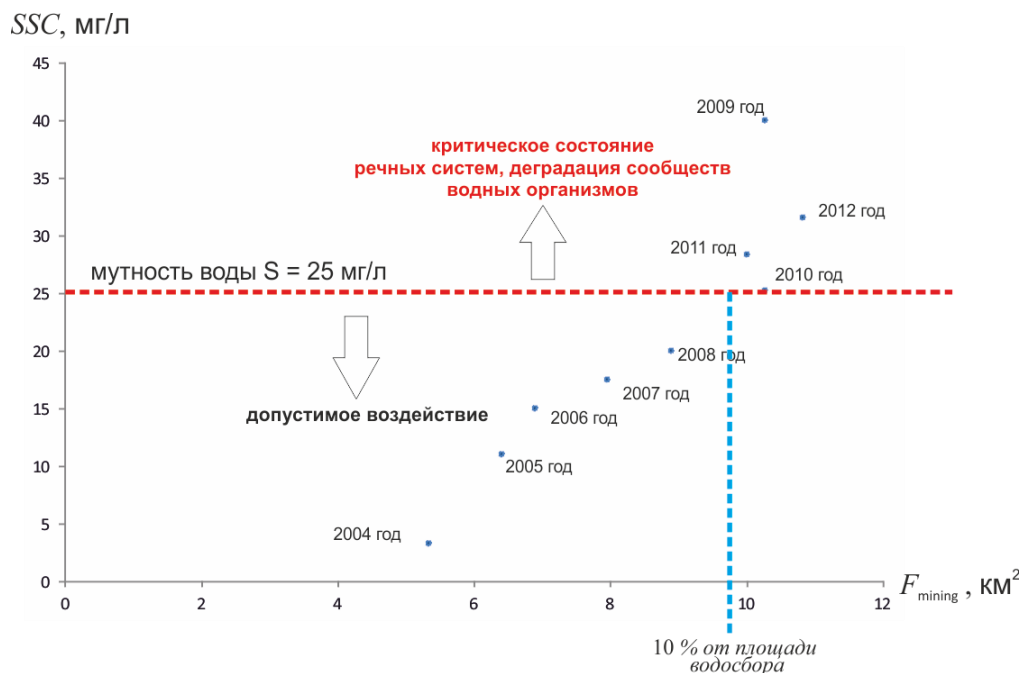


Рисунок 15. Обоснование определения критической площади нарушенных разработками россыпной платины земель F_{mining} в пределах бассейна р. Левтыриновьям (приток р. Вывенки, Корякское нагорье) по средней мутности воды летней межени SSC

Заключение

1. Перемещение наносов и формирование их состава осуществляется в пределах каскадных эрозионно-русловых систем. Наносы являются продуктами разрушения горных пород, почв, органических соединений и подразделяются на грубодисперсные (нерастворенные) частицы, осаждаемые на мембранном фильтре с диаметром 0.45 мкм, и коллоидно-дисперсные (условно растворенные) частицы (с диаметром от 0.005 до 0.45 мкм). Состав наносов является гетерогенным, меняется под влиянием физико-химических и биологических процессов и характеризуется индексами, описывающими распределение концентраций соединений и элементов между взвешенными и влекомыми наносами (индекс SB) и условно растворенной (менее 0.45 мкм) и нерастворенной формой транспорта (индекс DS).
2. Ограниченность и неопределенность мониторинговых данных определяют необходимость развития интегрального гидролого-геохимического подхода к исследованию речных наносов. Он основан на использовании сетевых (мониторинговых), полевых (экспедиционных), дистанционных и численных методов, позволяющих получить набор сопоставляемых и взаимодополняемых оценок. Важнейшую роль играют косвенные (оптические, акустические,

лазерной дифракции) и дистанционные методы определения мутности, требующие региональной калибровки для каждого водного объекта.

3. Крупность наносов является интегральным фактором дифференциации форм транспорта (распределения частиц в толще потока) и химического состава. Гранулометрический состав взвешенных наносов имеет преимущественно двумодальное распределение, закономерно изменяющееся по длине бассейновых ЭРС: для горных ледниковых рек характерно наличие максимальных концентраций фракций 5–10 мкм и 50–100 мкм, для полугорных и равнинных рек – 1–5 мкм и 10–30 мкм.
4. Гидравлические критерии, основанные на балансе сил, действующих на частицу наносов (число Рауза), и включающие в себя крупность наносов, позволяют параметризовать формы транспорта и химический состав наносов. В зависимости от характерной формы транспорта выделяются соединения и элементы грубых и тонких фракций, а также переходные, распределяемые между условно растворенными и нерастворенными формами. Шкала гидролого-геохимической дифференциации состава речных наносов характеризует типовые распределения химических соединений и элементов между условно растворенными формами, взвешенными, влекомыми наносами и донными отложениями. Состав разных форм транспорта меняется в зависимости от гидродинамической обстановки.
5. Суммарный сток наносов (взвешенных и влекомых) рек мира в Мировой океан оценивается величиной $27.2 \cdot 10^9$ т/год. Основная часть наносов рек мира (не менее 60 %) формируется за счет русловых деформаций. В пределах крупных ЭРС составляющие баланса наносов и масштабные коэффициенты редукции стока наносов подчиняются широтной зональности. Транзитные ЭРС горных территорий сменяются вниз по течению по мере роста бассейна на транзитно-аккумулирующие и аккумулярующие системы. По мере усложнения структуры ЭРС при увеличении размера водосбора, усиливается масштабная редукция стока наносов. Крупные ЭРС России, а очевидно, и любые крупные речные бассейны, в современных гидроклиматических условиях представляют собой области аккумуляции, темпы которой значительно превышают объемы выноса за пределы речного бассейна.

6. В масштабах отдельных речных бассейнов и локальных ЭРС большую роль в формировании стока и состава наносов играют технические средства и биологические процессы. Генетическая модель формирования стока взвешенных наносов на реках, протекающих в пределах долин, преобразованных активной горнодобывающей деятельностью, характеризует вклад различных процессов в баланс наносов; ее применение для бассейнов, где ведется разработка россыпных месторождений, свидетельствует о важнейшей роли эрозии в руслоотводах. В условиях нереста лососевых рыб объем транспортируемых влекомых наносов составляет 25–40 % от общего годового стока наносов, а расход влекомых наносов может возрастать в 10–20, взвешенных – в 2–3 раза.
7. Эволюционно-хронологический ряд изменчивости стока наносов охватывает масштабы времени от геологических и исторических до коротких отрезков (сезоны, сутки, часы, секунды). На реках России севернее 60⁰ с. ш. преобладают тенденции на многолетнее увеличение стока взвешенных наносов. На юге, на фоне снижения водного стока и большой естественной зарегулированности стока, в начале XXI века на многих реках отмечается снижение стока наносов. Эти закономерности трансформируются под влиянием русловых деформаций. За счет изменений продолжительности и величины выхода воды на пойму меняются среднемноголетние значения аккумуляции наносов на поймах рек. Продольное увеличение стока наносов характерно циклам маловодных периодов водности, преобладание аккумуляции – многоводным. В отдельные многоводные годы за счет аккумуляции годовой сток взвешенных наносов снижается в 4 раза (р. Селенга, Терек).
8. Режим русловых деформаций играет важнейшую роль в сезонных и синоптических изменениях стока наносов широкопойменных равнинных рек. Сезонный характер стока наносов связан с существованием внутригодового механизма накопления–выноса материала: наносы преимущественно переотлагаются на поверхности затапливаемых пойм в периоды повышенного стока, что приводит к продольному снижению стока наносов на бесприточных участках рек. В дельтах южных рек аккумуляция в периоды повышенного

стока усиливается за счет влияния водной растительности и поступления воды в озерные и болотные массивы. Иные закономерности характерны для дельт рек зоны вечной мерзлоты (Лена, Колыма), где подъем уровней сопровождается активизацией размывов берегов, в том числе за счет термоэрозии.

9. Макротурбулентные колебания мутности проявляются на фоне синоптических колебаний мутности и имеют случайную структуру. На небольших горных реках они могут достигать 60 % от общего размаха колебаний за гидрологическое событие; в определенных условиях вклад быстрых изменений падает до 5–10 %. Максимальная амплитуда макротурбулентных изменений мутности свойственна малым водотокам, характеризующимся большими уклонами русла, относительно высокой транспортирующей способностью и малыми расстояниями от источников поступления наносов.
10. Сток и состав речных наносов - важнейший фактор среды, оказывающий влияние на формирование фауны рек. Воздействие взвешенных частиц на ихтиоцены проявляется через поведенческие эффекты – снижение ориентирования и пищевой активности, и лимитируется мутностью воды. По убыванию толерантности к мутности воды основные семейства ихтиофауны рек России ранжируются по порогу чувствительности – от осетровых и сомовых (1000 мг/л) до карповых (250 мг/л), окуневых (100 мг/л) и лососевых (10 мг/л, выраженные изменения при 25–35 мг/л). Эта шкала лежит в основе рыбохозяйственного нормирования мутности воды, учитывающего состав ихтиофауны, региональные (локальные) и внутригодовые изменения характеристик речных наносов.

РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты исследований изложены в 83 научных изданиях, определенных в п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, в том числе:

1. Есин Е.В., Чебанова В.В., Сорокин Ю.В., **Чалов С.Р.**, Коваль О.О. Сравнение биоты термального и холодного ручьев, впадающих в Семлячикский лиман (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Известия ТИНРО. 2011. Т. 167. С. 135-145 (IF = 0)
2. Куksина Л.В., **Чалов С.Р.** Сток взвешенных наносов рек территорий современного вулканизма Камчатки // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 103-110 (WoS, IF = 0.7)

3. Есин Е.В., Леман В.Н., Сорокин Ю.В., **Чалов С.Р.** Популяционные последствия высокочисленного подхода горбуши *Oncorhynchus gorbusha* к северо-восточному побережью Камчатки в 2009 году // Вопросы ихтиологии. Т. 52. № 4. 2012. С. 446-455 (WoS, IF = 0.8)
4. Белозерова Е.В., **Чалов С.Р.** Определение содержания взвешенных частиц в речных водах оптическими методами // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2013. № 6. С. 39-45 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)
5. Алексеевский Н.И., Белозерова Е.В., Касимов Н.С., **Чалов С.Р.** Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2013. № 3. С. 60-65 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)
6. **Чалов С.Р.**, Есин Е.В., Айзель Г.В. Гидрологические факторы формирования ихтиофауны рек вулканических территорий (на примере рек Семлячинского района, Камчатка) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 3. С. 247-257 (WoS, IF = 0.556)
7. **Чалов С.Р.**, Есин Е.В. Принципы экологической классификации рек районов современного вулканизма (на примере Камчатки) // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 80-87 (WoS, IF = 0.7)
8. **Чалов С.Р.**, Леман В.Н. Нормирование допустимого воздействия открытых разработок полезных ископаемых на речные системы Камчатки // Водное хозяйство России. 2014. № 2. С. 69-86 (IF = 0)
9. **Чалов С.Р.**, Школьный Д.И., Промахова 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 (WoS, IF = 0.7)
10. **Чалов С.Р.**, Цыпленков А.С. Сток наносов малых рек районов современного вулканизма (р. Сухая Елизовская, Камчатка) // Геоморфология 2017. № 1. С.104-116 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)
11. **Чалов С.Р.**, Гречушникова М.Г., Варенцов М.И., Касимов Н.С. Современная и прогнозная оценка стока воды и наносов рек бассейна Селенги // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 39-48 (WoS, IF = 0.7)
12. Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., **Чалов С.Р.**, Шинкарева Г.Л., Пашкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В. Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга–Байкал // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2016. № 3. С. 67-81 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)
13. **Чалов С.Р.**, Базилова В.О., Тарасов М.К. Баланс взвешенных наносов в дельте Селенги в конце XX – начале XXI века: моделирование по данным снимков Landsat // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 332-339. (WoS, IF = 0.556)
14. **Чалов С.Р.**, Есин Е.В., Леман В.Н. Влияние взвешенных наносов на речные ихтиоцены // Известия ТИНРО. 2019. Т. 199. С 179-192 (IF = 0)
15. **Чалов С.Р.** Современные тенденции многолетних изменений стока взвешенных наносов рек России // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2019. № 1. С. 20-23 (IF = 0)
16. **Чалов С.Р.**, Потемкина Т.Г., Пашкина М.П., Касимов Н.С. Многолетние изменения баланса взвешенных наносов в дельтах притоков Байкала // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 50-59 (WoS, IF = 0.556)
17. **Чалов С.Р.**, Леман В.Н. Региональный подход к рыбохозяйственному нормированию содержания взвешенных веществ // Водное хозяйство. 2019. № 6. С. 66-83 (IF = 0)
18. Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., **Чалов С.Р.**, Шинкарева Г.Л. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2019. № 6. С. 20-28 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)

19. **Чалов С.Р.**, Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 34-46 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)
20. **Чалов С.Р.**, Ефимов В.А. Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2021. № 4. С. 91-103 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)
21. **Чалов С.Р.**, Тарасов М.К., Чалова А.С. Закономерности сезонных изменений стока наносов в пределах разветвленного русла р. Лены // География и природные ресурсы. 2021. № 4. (WoS, IF = 0.7)
22. **Чалов С.Р.**, Прокопьева К.Н. Оценка баланса взвешенных наносов в дельте р. Лены по данным дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2021. № 3. С. 1-12 DOI: 10.31857/S0205961421030027 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.1)
23. Иванов В.А., **Чалов С.Р.** Оценка баланса наносов рек Обь и Енисей // Геоморфология. 2021. № 3. с. 79–89 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)
24. **Чалов С.Р.**, Чалова А.С., Школьный Д.И. Количественная оценка плановых переформирований реки Камчатка // Известия РАН. Серия географическая. 2021. № 2. С. 218-230 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.5)
25. Thorslund J., Jarsjö J., Belozerova E., **Chalov S.** Gold mining impact on riverine heavy metal transport in a sparsely monitored region: The upper Lake Baikal Basin case // J. of Environmental Monitoring. 2012. V. 14. P. 2780-2792 (WoS, IF = 2.2)
26. Mouri G., Golosov V., **Chalov S.** Assessment of potential suspended sediment yield in Japan in the 21st century with reference to the general circulation model climate change scenarios // Global and Planetary Change. 2013. V. 102. P. 1-9. (WoS, IF = 4.4)
27. **Chalov S.** Effects of placer mining on suspended sediment budget: case study of north of Russia's Kamchatka Peninsula // Hydrological Sciences J. 2014. V. 59. № 5. P. 1081-1094 (WoS, IF = 2.18)
28. **Chalov S.**, Jarsjö J., Kasimov N. et al. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // Environmental Earth Sciences. 2015. V. 73. № 2. P. 663-680 (WoS, IF = 2.18)
29. Mouri G., Ros F., **Chalov S.** Characteristics of suspended sediment and river discharge during the beginning of snowmelt in volcanically active mountainous environments // Geomorphology. 2014. V. 213. P. 266-276 (WoS, IF = 3.819)
30. Karthe D., **Chalov S.**, Borchardt D. Water resources and their management in Central Asia in the early 21st century: status, challenges and future prospects // Environmental Earth Sciences. 2015. V. 73. № 2. P. 487-499 (WoS, IF = 2.18)
31. Pietron J., Jarsjö J., Romanchenko A., **Chalov S.** Model analyses of the contribution of in-channel processes to sediment concentration hysteresis loops // J. of Hydrology. 2015. V. 522. P. 576-589 (WoS, IF = 4.50)
32. **Chalov S.**, Alexeevsky N. Braided rivers: structure, types and hydrological effects // Hydrology Research. 2015. V. 46. № 2. P. 258-275 (WoS, IF = 2.012)
33. Jarsjö J., **Chalov S.**, Pietron J. et al. Patterns of soil contamination, erosion, and river loading of metals in a gold mining region of Northern Mongolia // Regional Environmental Change. 2017. V. 17. № 7. P. 1991-2005 (WoS, IF = 3.481)
34. Thorslund J., Jarsjö J., Wällstedt T., Mörtz C., Lychagin M., **Chalov S.** Speciation and hydrological transport of metals in non-acidic river systems of the Lake Baikal basin: field data and model predictions // Regional Environmental Change. 2017. V. 17. № 7. P. 2007-2021 (WoS, IF = 3.481)

35. **Chalov S.**, Thorslund J., Kasimov N. et al. The Selenga River delta: a geochemical barrier protecting Lake Baikal waters // *Regional Environmental Change*. 2017. V. 17. № 7. P. 2039-2053 (WoS, IF = 3.481)
36. Pietron J., **Chalov S.**, Chalova A. et al. Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin // *Catena*. 2017. V. 152. P. 82-93 (WoS, IF = 4.333)
37. **Chalov S.**, Tsyplenkov A., Pietron J. et al. Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment – Kamchatka Peninsula case study // *Frontiers of Earth Science*. 2017. V. 11. № 3. P. 565-578 (WoS, IF = 1.62)
38. Lychagin M., **Chalov S.**, Kasimov N. et al. Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the Selenga River system // *Environmental Earth Sciences*. 2017. V. 76. № 1. DOI: 10.1007/s12665-016-6304-z (WoS, IF = 2.18)
39. **Chalov S.**, Bazilova V., Tarasov M. Modeling suspended sediment distribution in the Selenga River Delta using LandSat data // *Proc. IAHS*. 2017. V. 375. P. 19-22 (WoS, IF = 0.556)
40. Karthe D., **Chalov S.**, Moreido V. et al. Assessment of Runoff, Water and Sediment Quality in the Selenga River Basin Aided by a Web-Based Geoservice // *Water Resources*. 2017. V. 44. № 3. P. 399-416 (WoS, IF = 0.556)
41. **Chalov S.**, Golosov V., Tsyplenkov A. et al. A toolbox for sediment budget research in small catchments // *Geography, Environment, Sustainability*. 2017. V. 10. № 4. P. 43-68 (Scopus, IF (CiteScore) = 1.1)
42. Dong T., Nittrouer J., Czapiga M., Ma H., McElroy B., Ilicheva E., Pavlov M., **Chalov S.**, Parker G. Roles of bank material in setting bankfull hydraulic geometry as informed by the Selenga River delta, Russia // *Water Resources Research*. 2018. V. 55. № 1. P. 827-846 (WoS, IF = 4.31)
43. Karthe D., Abdullaev A., Boldgiv B., Borchardt D., **Chalov S.** et al. Water in Central Asia: an integrated assessment for science-based management // *Environmental Earth Sciences*. 2017. V. 76. № 690. DOI: 10.1007/s12665-017-6994-x (WoS, IF = 2.18)
44. Pietron J., Nittrouer J., **Chalov S.** et al. Sedimentation patterns in the Selenga River delta under changing hydroclimatic conditions // *Hydrological Processes*. 2018. V. 32. № 2. P. 278-292 (WoS, IF = 3.256)
45. **Chalov S.**, Liu S., Chalov R. et al. Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China // *Environmental Earth Sciences*. 2018. V. 77. № 7. DOI: 10.1007/s12665-018-7448-9 (WoS, IF = 2.18)
46. **Chalov S.**, Millionshchikova T., Moreido V. Multi-model approach to quantify future sediment and pollutant loads and ecosystem change in Selenga River system // *Water Resources*. 2018. V. 45. № 6. P. S22-S34 (WoS, IF = 0.556)
47. Moreydo V., Millionshchikova T., **Chalov S.** Modelling the hydroclimatic effects on the *Coregonus migratorius* seasonal spawning migration in the Selenga-Baikal hydrological system // *Proc. IAHS*. 2019. V. 381. P.113-119 (WoS, , IF = 0)
48. Goncharov A., Baturina N., Maryinsky V., Kaus A., **Chalov S.** Ecological assessment of Lake Baikal main tributary Selenga River system using aquatic macroinvertebrate communities as bioindicators // *J. of Great Lakes Research*. 2020. V. 46. № 1. P. 53-61 (WoS, IF = 1.933)
49. Shinkareva G., Lychagin M., Tarasov M., Pietron J., Chichaeva M., **Chalov S.** Biogeochemical specialization of macrophytes and their role as a biofilter in the Selenga delta // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. № 3. P. 240-263 (Scopus, IF (CiteScore) = 1.1)
50. Efimov V.A., **Chalov S.**, Efimova L.E. et al. Impact of mining activities on the surface water quality (case study of Khibiny mountains, Russia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019, 012008 (WoS, IF = 0)

51. Fischer S., Rosqvist N., **Chalov S.**, Jarsjo J. Disproportionate water quality impacts from the century-old Nautanen copper mines, Northern Sweden // Sustainability. 2020. V. 12. № 14, 1394 DOI: 10.3390/su12041394 (WoS, IF=2.576)
52. Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V., **Chalov S.** Suspended sediment budget and intra-event sediment dynamics of a small glaciated mountainous catchment in the Northern Caucasus. J. of Soils and Sediments. 2020. V. 20. P. 3266-3281 (WoS, IF = 2.763)
53. **Chalov S.**, Moreido V., Sharapova E. et al. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga River – main tributary of the Lake Baikal // Water. 2020. V. 12. № 5, 1345 DOI: 10.3390/w12051345 (WoS, IF = 2.544)
54. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Kosheleva N., **Chalov S.** et al. River water quality of the Selenga–Baikal basin: Part I –Spatio-temporal patterns of dissolved and suspended metals // Water. 2020. V. 12. № 8, 2137 DOI: 10.3390/w12082137 (WoS, IF = 2.544)
55. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., **Chalov S.** et al. River water quality of the Selenga–Baikal basin: Part II – Metal partitioning under different hydroclimatic conditions // Water. 2020. V. 12. № 9, 2392 DOI: 10.3390/w12092392 (WoS, IF = 2.544)

Рецензируемые научные монографии и разделы в коллективных научных монографиях

1. Алексеевский Н.И., **Чалов С.Р.** Гидрологические функции разветвленного русла. М.: Географический ф-т МГУ, 2009. 240 с.
2. Chalov R.S., **Chalov S.R.**, Chalova A.S. Fluvial classifications: contribution from Russia / In: River Channels: Types, Dynamics and Changes. Nova Scientific Publ., 2012. P. 111-136.
3. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины / Под ред. Р.С. Чалова. М.: ООО «Журнал «РТ», 2012. 492 с.
4. Опасные русловые процессы и среда обитания лососевых рыб: Камчатка / Под ред. **С.Р. Чалова**, В.Н. Лемана, А.С. Чаловой. М.: Изд-во ВНИРО, 2014. 240 с.
5. Есин Е.В., Горин С.Л., **Чалов С.Р.** Атлас-определитель рыб Камчатки и сопредельных территорий / Под ред. Е.В. Есина. М.: Изд-во ВНИРО, 2015. 144 с.
6. Эколого-географический атлас-монография Селенга–Байкал / Под ред. Н.С. Касимова, Н.Е. Кошелевой, М.Ю. Лычагина, **С.Р. Чалова**. М.: Географический ф-т МГУ, 2018. 288 с.

Учебное пособие

1. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., **Чалов С.Р.** Водохозяйственные расчеты. М.: Географический ф-т МГУ, 2012. 140 с.

С полным списком и текстами публикаций можно ознакомиться на странице автора в системе научно-технической информации ИСТИНА:

<http://istina.msu.ru>