

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Куракова Анна Александровна

**Гидролого-морфодинамический анализ русел и опасные
проявления русловых процессов на равнинных реках
Обь-Иртышского бассейна (лесная зона)**

1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2022

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

- Научный руководитель** – *Чалов Роман Сергеевич, доктор географических наук, профессор*
- Официальные оппоненты** – *Гарцман Борис Ильич, доктор географических наук, доцент, главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией гидрологии наводнений Института водных проблем РАН*
Земцов Валерий Алексеевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрологии Национального исследовательского Томского государственного университета
Коронкевич Николай Иванович, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии Института географии РАН

Защита диссертации состоится «22» декабря 2022 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2(МГУ.11.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)9392238, факс +7(495)9328836).

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/504043343/>

Автореферат разослан «8» ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Опасность русловых процессов определяется деформациями русел, которые приводят к разрушению или угрозе разрушения, созданию аварийной ситуации или выводят из эксплуатационного состояния коммуникации, инженерные сооружения, хозяйственные и другие объекты жизнедеятельности, расположенные на берегах и в руслах рек. Одна из наиболее опасных форм проявления русловых деформаций – размывы берегов рек, создающие реальную или потенциальную угрозу разрушения населенных пунктов, инженерных и других объектов, могущие приводить к неблагоприятным ситуациям и причинять ущерб водному хозяйству и инженерным объектам на приречных территориях [Чалов, 2022]. Особенно большое значение оценка размывов берегов рек имеет для Западной Сибири как важнейшего нефтегазового региона страны, поскольку реки формируют русла на всем своем протяжении в свободных условиях развития русловых деформаций, характеризуясь повсеместным распространением размываемых берегов, причем темпы размыва неодинаковы, определяясь различными факторами, разнообразием размеров (водоносностью) рек и их рукавов, морфодинамическим типом русла и, следовательно, спецификой русловых переформирований и их опасных проявлений в разных частях региона и на разных реках.

В настоящее время имеет место существенный пробел в изучении русловых процессов, их опасных проявлений и, соответственно, размывов берегов на реках Обь-Иртышского бассейна, в том числе на больших и средних реках. Детальные исследования русловых процессов выполнялись только на Оби, но они были сосредоточены на юго-востоке региона, в верхнем и частично среднем течении, в пределах Томской, Новосибирской областей и Алтайского края [Попов, 1962; Маккавеев, и др., 1969; Беркович и др., 1981; Русловые..., 2001], и почти не проводились (или выполнялись на отдельных небольших участках в связи с решением конкретных прикладных задач) в ее нижнем течении и на Иртыше, которые в результате образуют «белое пятно» в региональном русловедении. Дефицит исследований, особенно с учетом сложных и разнообразных условий формирования русла, развития русловых деформаций и размывов берегов, приводит к недостаточной проработке научных обоснований проектов использования водных ресурсов, прокладки через реки коммуникаций, снижению качества прогнозов русловых переформирований на реках разных размеров.

Все это определяет актуальность диссертационного исследования, которая подчёркивается тем обстоятельством, что размывы берегов наиболее полно по своим темпам и распространению отражают развитие тех или иных форм русла, являясь важнейшей характеристикой деформаций излучин, разветвлений и их

разновидностей. Однако зависимость их показателей от типа русла, его параметров и т.д. остается сейчас неизменно изученной, ограничивая возможности прогнозирования русловых деформаций.

Цель исследования – гидролого-морфодинамический анализ русел равнинных рек лесной зоны Обь-Иртышского бассейна, выявление закономерностей опасных русловых деформаций (размывов берегов рек) и их связей с природными факторами и типами русла, разработка методологии их оценки и прогнозирования.

Для достижения этой цели решались следующие взаимосвязанные **задачи**:

1. Обобщение существующих методов и подходов к оценке опасности русловых процессов (размывов речных берегов);
2. Выявление закономерностей распространения морфодинамических типов русла в бассейне и условий их развития;
3. Анализ многолетних горизонтальных русловых деформаций на основе сопоставления космических снимков и карт русел (лоцманских карт) за различные временные интервалы, результатов натурных исследований и выявление их связей с водоносностью рек и гидравлическими характеристиками потоков;
4. Разработка гидролого-морфодинамических связей и соотношений, характеризующих условия и закономерности размыва берегов;
5. Оценка опасности размыва берегов на реках бассейна, обоснование их количественных и качественных показателей;
6. Прогнозные оценки возникновения и развития опасных русловых процессов (размывов берегов) для их учета при освоении водных ресурсов и приречных территорий.

Объект исследования – крупнейшие реки Обь (от устья р. Томи до г. Салехарда) и Иртыш (от устья р. Тары до слияния с Обью), большие и средние реки – притоки Оби и Иртыша в пределах лесной зоны – Томь (120–0 км), Чулым (400–0 км), Кеть (556–0 км), Тым (311–0 км), Вах (771–0 км), Тромъеган (389–0 км), Аган (373–0 км), Лямин (277–0 км), Казым (444–0 км), Полуй (397–0 км), Парабель (246–0 км), Васюган (470–0 км), Большой Юган (294–0 км), Северная Сосьва (153–0 км), Демьянка (311–0 км), Тобол (434–0 км), Тура (659–0 км), Тавда (730–0 км), Конда (735–0 км).

Предмет исследования – морфодинамические типы русла и размываемые берега на реках Обь-Иртышского бассейна.

Методы исследования. При выполнении натурных исследований производились измерения расходов воды в рукавах и протоках для определения распределения стока в разветвлениях русла и контрольные измерения в створах на неразветвленных участках, скоростных полей потока на излучинах русла с

помощью доплеровского измерителя течений, отбор проб донных отложений (руслообразующих наносов) с последующим гранулометрическим анализом и воды для определения оптической и реальной мутности. Одновременно производилась визуальная (по морфологическим признакам) оценка интенсивности размыва берегов, позволяющая контролировать результаты определений по космоснимкам. При обработке данных использовался метод гидролого-морфологического анализа, позволяющий устанавливать связи между морфометрическими и морфологическими параметрами форм русла (излучин, разветвлений), которым соответствует определенная структура потока, и динамическими характеристиками русловых деформаций (показателями размыва берегов), показателями устойчивости русла, гидравлических характеристик реки (скорости потока, абсолютные и относительные расходы воды и т.д.) и на этой основе разрабатывать прогнозные оценки переформирований русел. Ретроспективный анализ основывался на сопоставлении космических снимков и карт русел рек за разные временные периоды с середины XX века по 2010–2020 гг.

Научная новизна. Впервые был выполнен региональный анализ русловых деформаций и размывов берегов, закономерностей их распространения в Обь-Иртышском бассейне, которые до этого рассматривались только локально и на средней Оби. В ходе ретроспективного анализа впервые для средней и нижней Оби, нижнего Иртыша и их притоков были получены основные характеристики размыва берегов (протяженность и скорость) и их изменения по длине рек.

Гидролого-морфологический и морфодинамический анализ, ранее не применяемый для размывов берегов, позволил впервые выявить условия и закономерности горизонтальных русловых деформаций. Оценка устойчивости русел и размывов берегов на реках бассейна дала возможность ранжировать по опасности русловых процессов исследуемые участки Оби и Иртыша и выполнить районирование бассейнов средних и больших рек.

Полученные данные о русловых процессах на реках Обь-Иртышского бассейна, размывах берегов в зависимости от размеров рек, типов русел, рассредоточенности потока по пойме во время половодья и рукавам разветвлений – принципиально новое в географии русловых процессов, закрытие «белого пятна» в региональном русловедении и гидрологии рек.

Защищаемые положения:

1. В пределах лесной зоны Обь-Иртышского бассейна развитие и распространение размываемых берегов, скорости и протяженность фронта размыва определяются водоносностью (порядком рек), зональными изменениями водного режима, рассредоточением стока по рукавам разветвлений разного типа, морфодинамическим типом

- русла (как отражения гидравлической структуры потока) при относительной однородности геолого-геоморфологических условий.
2. Изменение скоростей размыва берегов вниз по длине крупнейших, больших и средних рек имеют разные тренды в зависимости от гидрологических характеристик рек, рассредоточения стока по пойме в половодье, рукавам разветвлений и пойменным протокам. На средней и нижней Оби и нижнем Иртыше выделяются участки с различными особенностями горизонтальных русловых деформаций, их притоки объединяются в районы по условиям размыва берегов.
 3. Гидролого-морфологические зависимости носят региональный характер (по участкам Оби и Иртыша и районам, объединяющим остальные реки), имея общую направленность, дифференцируясь в зависимости от гидрологических условий и гидравлических характеристик потоков, морфодинамических типов русла, параметров форм русла, влияния коренных берегов и др.
 4. Размывы берегов являются основным показателем опасности русловых процессов. Устойчивость русел и оценка опасности русловых процессов коррелирует с размывами берегов и их характеристиками. Зависимости между ними могут быть использованы для прогнозных оценок русловых деформаций. Предложен ряд рекомендаций для безопасного и эффективного водохозяйственного и воднотранспортного освоения рек.

Практическая значимость. Проведенный гидролого-морфодинамический анализ русел позволил впервые установить общие закономерности горизонтальных русловых деформаций, распространения фронтов и интенсивности размыва берегов, выявить их зависимости от характеристик водного режима и гидравлики потока, геолого-геоморфологических условий формирования русла, морфодинамических типов русла, морфологических параметров форм русла; полученные региональные зависимости можно применять как при составлении прогнозных оценок, так и использовать для анализа неизученных рек в регионе.

Оценка опасности русловых процессов на реках бассейна, а также сделанные прогнозы переформирования русел и размывов берегов на ключевых участках дали возможность разработать ряд рекомендаций для безопасного и эффективного водохозяйственного и воднотранспортного освоения рек.

Личный вклад автора. Автор диссертации:

1. Участвовала в экспедициях НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева на среднюю и нижнюю Обь

- (г. Колпашево, от г. Нижневартовска до г. Салехарда) в 2018–2021 гг, нижний Иртыш (от г. Омска до слияния Иртыша с Обью) в 2021–2022 гг;
2. Рассчитала характеристики размываемых берегов (средние и максимальные скорости, протяженность фронтов размыва берегов) и составила карту условий развития размыва берегов на реках Обь-Иртышского бассейна;
 3. Провела расчеты устойчивости русел Оби и Иртыша и оценку опасности русловых процессов на их притоках;
 4. Получила региональные зависимости на основе проведенного гидролого-морфологического анализа.

Результаты диссертационного исследования нашли отражение в научных отчетах по проектам РНФ «Разветвления русел равнинных рек (многорукавные русла): гидролого-морфодинамический анализ, гидрологические функции, временная трансформация, методы управления для обеспечения гидроэкологической безопасности» (проекты №№ 18-17-00086 и 18-17-00086 П), РФФИ «Экстремальные, специфические и катастрофические проявления русловых процессов: география, условия возникновения, прогнозирование, методология учета и предотвращения последствий» (проект № 18-05-00487) и «Гидролого-морфодинамический анализ русел и оценка опасных русловых процессов на равнинных реках Обь-Иртышского бассейна (в пределах Российской Федерации) (грант РФФИ-Аспиранты)» (проект № 20-35-90003\20).

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на научном семинаре (Москва, май 2022 г) и ежегодных семинарах «Маккавеевские чтения» (Москва, декабрь 2019, 2021 гг) НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева; научном семинаре кафедры Гидрологии суши (Москва, май 2022 г); XXXV (Курск, октябрь 2020 г.) и XXXVI (Ижевск, октябрь 2021 г) пленарных межвузовских координационных совещаниях по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, X семинаре молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ (Набережные Челны, апрель 2022); международных конференциях IV Виноградовские чтения «Гидрология: от познания к мировоззрению» (Санкт-Петербург, декабрь, 2020 г) и 4th International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers (август, 2021 г); V Всероссийской научной конференции с международным участием «Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях» (сентябрь, 2019 г).

Благодарности. Автор искренне благодарен научному руководителю проф., д.г.н. Р.С. Чалову за профессиональное руководство диссертационной работой, постоянную помощь и всестороннюю поддержку, научным сотрудникам

НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов Н.И. Маккавеева к.г.н., в.н.с. А.С. Завадскому, к.г.н., с.н.с. С.Н. Рулёвой и м.н.с. П.П. Головлеву за поддержку научных исследований, помощь и сотрудничество при выполнении полевых и камеральных работ, сотрудникам кафедры гидрологии суши МГУ за участие в обсуждении работы и рекомендации по ее улучшению. Автор выражает благодарность Администрациям Обского и Обь-Иртышского бассейнов внутренних водных путей и их филиалам за предоставление материалов и помощь в организации полевых работ. Автор признателен своей семье за постоянную поддержку и внимание.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 249 страницы, содержит 27 таблиц, 90 рисунков. Приложения на 43 страницах представлены 5 таблицами и 16 рисунками. Список литературы включает 207 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, охарактеризована ее научная новизна и практическая значимость, описаны используемые фактический материал и методы, приведены сведения об апробации работы.

Глава 1. Современные представления о русловых процессах и их изученность на равнинных реках

В первой главе проведен анализ современных представлений о русловых процессах на реках и оценок их опасных проявлений, показаны особенности развития русловых деформаций в различных природных и природно-антропогенных условиях, приведены сведения о степени изученности равнинных рек Обь-Иртышского бассейна. Показано, что реки бассейна слабо изучены в отношении их руслового режима, в основном все исследования сосредоточены в юго-восточной части бассейна Оби, либо носят локальный характер в ее среднем течении и на ее отдельных притоках.

Глава 2. Условия формирования русел рек бассейна

Вторая глава посвящена условиям формирования русел равнинных рек Обь-Иртышского бассейна в пределах лесной зоны. Они формируются в относительно однородных условиях, протекая по территории, сложенной в основном легкоразмываемыми аллювиальными песками, супесями и легкими суглинками. Это обуславливает формирование преимущественно широкопойменных русел рек

со свободным развитием русловых деформаций. Ввиду малой плотности гидрологических постов на исследуемой территории для проведения гидролого-морфологического анализа использовался косвенный показатель водоносности – порядок реки (N), характеризующий изменение размеров реки и расходов воды вниз по течению. Он рассчитывался по формуле А.Е. Шайдеггера в интерпретации Н.И. Алексеевского [2004]: $N = \log_2 P + 1$ (P – количество водотоков с длиной меньше 10 км). На основе связи между среднегоголетними расходами воды ($Q_{\text{ср}}$, м³/с) и порядками рек (N) Обь-Иртышского бассейна была получена зависимость, соответствующая экспоненциальному уравнению вида $Q_{\text{ср}} = ae^{bN}$ (рисунок 1).

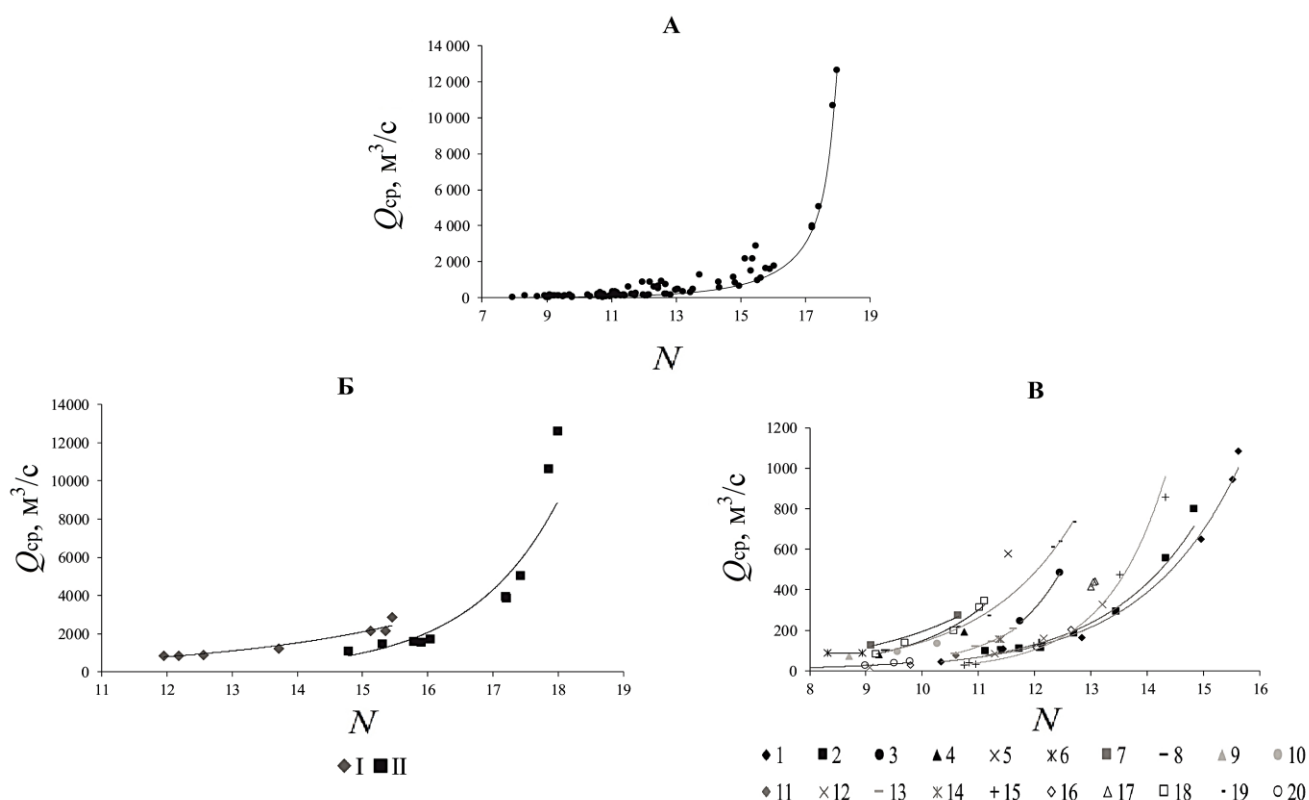


Рисунок 1 – Связь водоносности ($Q_{\text{ср}}$) и порядка (N) рек Обь-Иртышского бассейна. А – все реки бассейна, Б – Иртыш (I) и Обь (II), В – крупные и средние реки бассейна: 1 – Томь, 2 – Чулым, 3 – Кеть, 4 – Тым, 5 – Вах, 6 – Тромъеган, 7 – Аган, 8 – Лямин, 9 – Казым, 10 – Полууй, 11 – Парабель, 12 – Васюган, 13 – Большой Юган, 14 – Демьянка, 15 – Тобол, 16 – Тура, 17 – Тавда, 18 – Конда, 19 – Северная Сосьва, 20 – Тара

Весь бассейн описывается нижней огибающей поля точек – $Q_{\text{ср}} = 0,023e^{0,703N}$ (коэффициент корреляции – 0,9); каждая река характеризуется своей зависимостью общего увеличения водоносности при возрастании порядка.

Близкая связь между водоносностью ($Q_{\text{ср}}$) и порядком (N) отдельных рек бассейна позволила создать карту районирования по сходным условиям формирования стока воды (рисунок 2), проявляющиеся в зависимости $Q=f(N)$ за исключением крупнейших рек – Оби (VIII) и Иртыша (IX), рассматриваемых

отдельно. Всего было выделено семь районов, охватывающих бассейны рек: I – Томи и Чулыма; II – Кети, Тыма и Ваха; III – Тромъегана, Агана и Лямина; IV – Казыма и Полуя; V – Парабеля, Васюгана, Большого Югана, Тары и Демьянки; VI – Тобола, Туры, Тавды; VII – Конды и Северной Сосьвы. Данные районы хорошо согласовываются с гидрогеологическим районированием, проведенным В.А. Земцовым [1979]. Каждый район имеет свои особенности физико-географических условий, оказывающих влияние на формирование и внутригодовое распределение стока вода (количество осадков, заболоченность, заозеренность и залесенность).

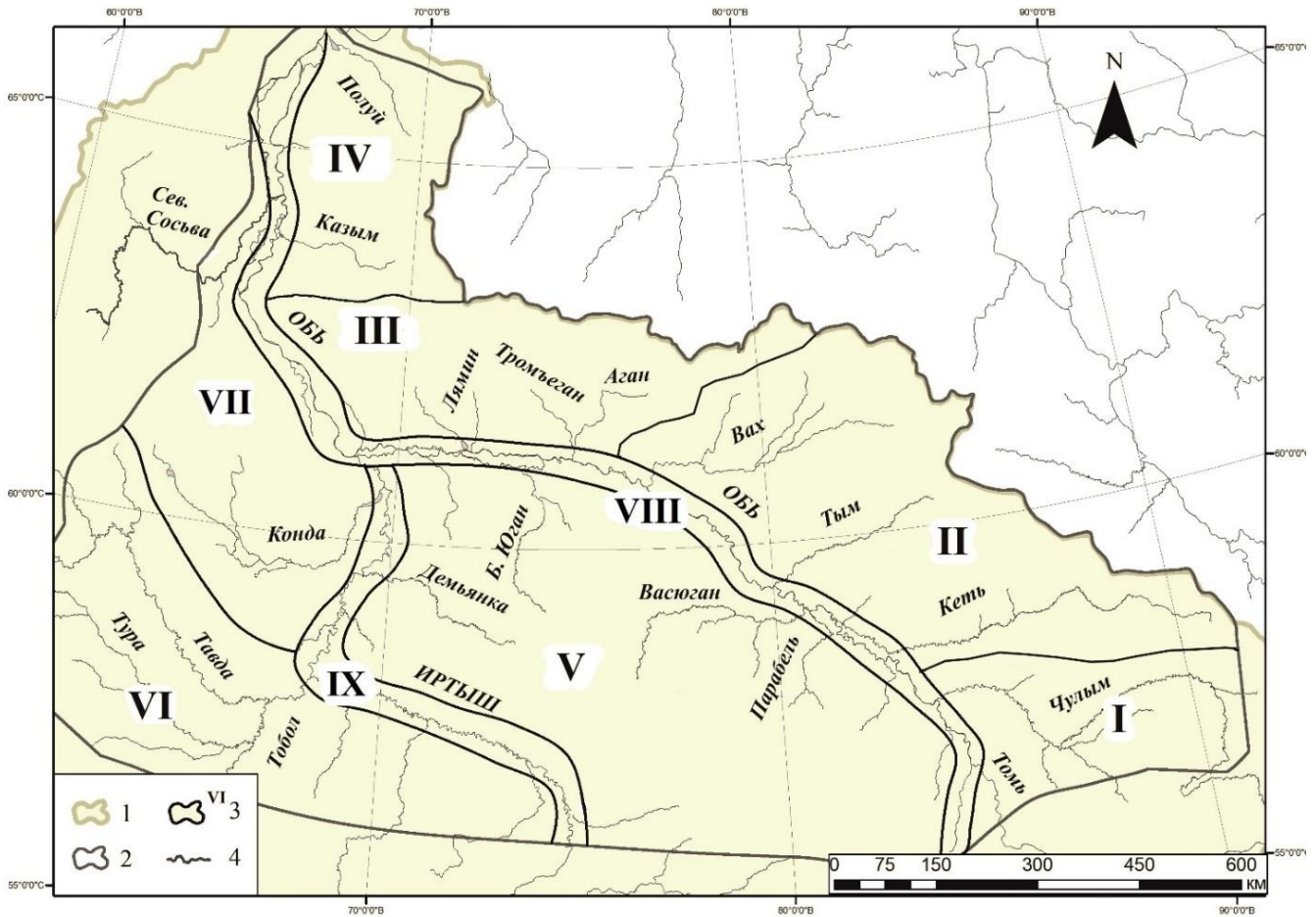


Рисунок 2 – Районирование территории Обь-Иртышского бассейна по зависимости характеристик стока рек от структуры речной сети. I–IX –районы, выделенные по связи $Q=f(N)$. 1 – граница Обь-Иртышского бассейна, 2 – равнинная часть лесной зоны бассейна, 3 – границы и номера районов, 4 – средние, большие и крупнейшие реки бассейна

Коэффициент a в уравнении $Q=ae^{bN}$ (таблица 1) закономерно возрастает по правобережью Оби с юго-востока на северо-запад, захватывая левобережье нижнего Иртыша и нижней Оби, и уменьшается по югу региона с востока на запад. В обратной последовательности изменяется коэффициент b . Отмеченные изменения соответствуют разным условиям формирования стока в Обь-Иртышском бассейне, что связано с изменением количества осадков, степени

заболоченности и заозеренности, появлением на севере многолетнемерзлых пород.

Таблица 1 – Коэффициенты a и b в уравнении $Q=ae^{bN}$

Район (рисунок 2)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
a	0,112	0,425	0,970	2,59	0,064	0,002	0,310	0,016	16,7
b	0,586	0,573	0,526	0,382	0,666	0,929	0,617	0,734	0,322

Глава 3. Исходные материалы и методы исследования

Третья глава посвящена основным материалам и методам исследования. Было использовано более 100 космических снимков, которые обрабатывались двумя методами. Первый, традиционный метод, основан на сопоставлении положения береговой линии, оцифрованной по космическим снимкам разных лет. Он применялся для средней и нижней Оби. Второй метод был использован для Иртыша, других средних и больших рек бассейна, имеющих преимущественно меандрирующие русла. Этот подход, разработанный в НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ, основан на возможностях инструментов ГИС-проекта ArcGIS, позволяющих автоматизировать процесс сопоставления разновременных спутниковых изображений, ускорить, по сравнению с традиционным методом, получение информации о размывах берегов, их темпах и протяженности, пространственном расположении и изменении по длине русла. Было выявлено, что данный автоматизированный метод успешно применим для рек со среднегодовыми расходами воды более 100 м³/с в устье, так как только при такой водоносности реки имеют достаточную ширину на космических снимках, позволяющую дешифровать и выполнять необходимые операции в программе ArcGIS на значительных по протяженности их участках (ширина реки как минимум 2 пикселя на снимке, т.е. 20 м и более в зависимости от разрешения снимка, в верхнем течении рассматриваемого участка, и увеличиваясь к устью). На реках, обрабатываемых автоматизированным методом, были выбраны ключевые участки, на которых расчеты размыва берегов производились традиционным методом. Полученные автоматизированным и традиционным методом данные различаются не более чем, на 10 %. Для обоих методов была определена точность. Для Оби использовались снимки высокого разрешения системы «CORONA» за продолжительный период времени (около 50 лет), что определило минимальный порог скорости отступления берегов от 0,5 м/год. Для остальных рек (Иртыш и притоки Оби и Иртыша) разрешение космических снимков (30 м) и рассматриваемый временной период в среднем около 30 лет определяют пороговое значение выявляемых скоростей размыва

берегов – 1 м/год. По картам русла (бывшие лоцманские) и по наблюдениям в поле проводилось уточнение границ фронтов размыва.

Глава 4. Гидролого-морфодинамическая характеристика русел рек бассейна

В четвертой главе дана подробная гидролого-морфодинамическая характеристика русел равнинных рек Обь-Иртышского бассейна.

Для русел рек Обь-Иртышского бассейна характерно большое разнообразие морфодинамических типов и особенности их распространения на реках.

На Оби встречаются практически все морфодинамические типы русла, тогда как русла нижнего Иртыша, других больших и средних реках бассейна преимущественно меандрируют (от 54 до 100 % длины изучаемых участков рек занимают излучины, на большинстве – более 80 %).

По длине средней и нижней Оби происходит постоянная смена морфодинамических типов русла – относительно прямолинейного, неразветвленного; извилистого (меандрирующего); разветвлённого, в том числе раздвоенные русла, рукава которых обладают своим набором типов русла. Средняя Обь между устьями рек Томи и Ваха характеризуется преобладанием свободных излучин (35,2 %) и пойменно-русловых разветвлений (20,6 %), рукава которых образуют по несколько излучин. Ниже до слияния с р. Иртышом основной правый рукав раздвоенного русла в основном меандрирует (44,1 %), но значимую долю составляют разветвления – сопряженные и сложные трехрукавные пойменно-русловые (11,0 и 11,9 %, соответственно). Русло нижней Оби, располагаясь сначала вдоль правого коренного берега, является морфологически однородным участком, представленным одиночными разветвлениями, разделенными прямолинейными отрезками русла (93,7 %). Для обоих рукавов раздвоенного русла нижней Оби снижается доля излучин и увеличивается протяженность прямолинейных участков. Русло каждого типа отличается своими особенностями расположения размываемых берегов, причем в русловых разветвлениях рукава, огибающие острова, образуют, как правило, пологие или развитые излучины.

Различные типы разветвлений – от элементарных до раздвоенных русел – приводят к рассредоточению и перераспределению стока по рукавам. В раздвоенном русле средней и нижней Оби рассредоточение стока по рукавам может быть либо почти равноценным, либо доля стока второстепенных рукавов изменяется от 19 (в истоке) до 40 % (в устье) в период весеннего половодья. Расходы воды в рукавах раздвоенного русла Оби также изменяются за счет впадения притоков (Северная Сосьва, Большой Юган, Казым и др.) и гидравлической связи по многочисленным рукавам вторичных раздвоений,

пойменным протокам, расчленяющим пойму и забирающим до 20 % стока в половодье. Кроме этого, при глубоком затоплении поймы аккумулирует до 20 % стока. Также рассредоточение стока приводит к тому, что в русле основного рукава – Малой Оби доля ее составляет выше устья Северной Сосьвы всего 5 %.

Гидролого-морфологический анализ русел показал, что наибольшее распространение на средней и нижней Оби получили пологие излучины русла и рукавов. Вниз по течению происходит сокращение доли пологих ($l/L=1,1\div 1,4$) форм русла (с 65 % в среднем течении до 55 % в нижнем), тогда как форм русла с $l/L=1,7\div 2,0$ становится больше (с 8,8 % на средней Оби против 9,8 % в ее нижнем течении). Это обусловлено тем, что излучины в нижнем течении встречаются исключительно в рукавах раздвоенного русла (преимущественно Малая Обь). Излучины $l/L>2,0$ приурочены в основном к среднему течению Оби. Они образованы как самим руслом, так и рукавами пойменно-руслых, в т.ч. сложных трехрукавных, разветвлений.

Нижний Иртыш, меандрирующий на большей части своего протяжения, также характеризуются преобладанием пологих свободных излучин, доля которых растет к устью (с 41 % на участке от устья Тары до устья Тобола до 46 % ниже Тобола), тогда как доля крутых ($l/L=1,7\div 2,0$), наоборот, снижается.

На средних и крупных меандрирующих реках Обь-Иртышского бассейна среди исследованных свободных излучин почти половину (47 %) от всех излучин составляют пологие ($l/L=1,1\div 1,4$) и развитые ($l/L=1,4\div 1,7$), почти четверть (24 %) – излучины с l/L от 2,0 до 3,0.

В целом для рек Обь-Иртышского бассейна сверху вниз по течению отмечается увеличение размеров излучин (их радиусов кривизны r и шагов L). Но связанное с этим изменение гидравлической структуры потока приводит к снижению l/L .

Глава 5. Размывы берегов на реках бассейна

Пятая глава посвящена размывам берегов на реках бассейна. Для Обь-Иртышского бассейна характерно широкое распространение размываемых берегов на всех реках (рисунок 3).

Для средних и больших рек характерны относительно невысокие скорости размыва берегов (до 3 м/год); на крупнейших (Обь и Иртыш) и в низовьях некоторых больших рек (Томь, Чулым, Тобол) темпы отступления берегов возрастают до 10 м/год и более.

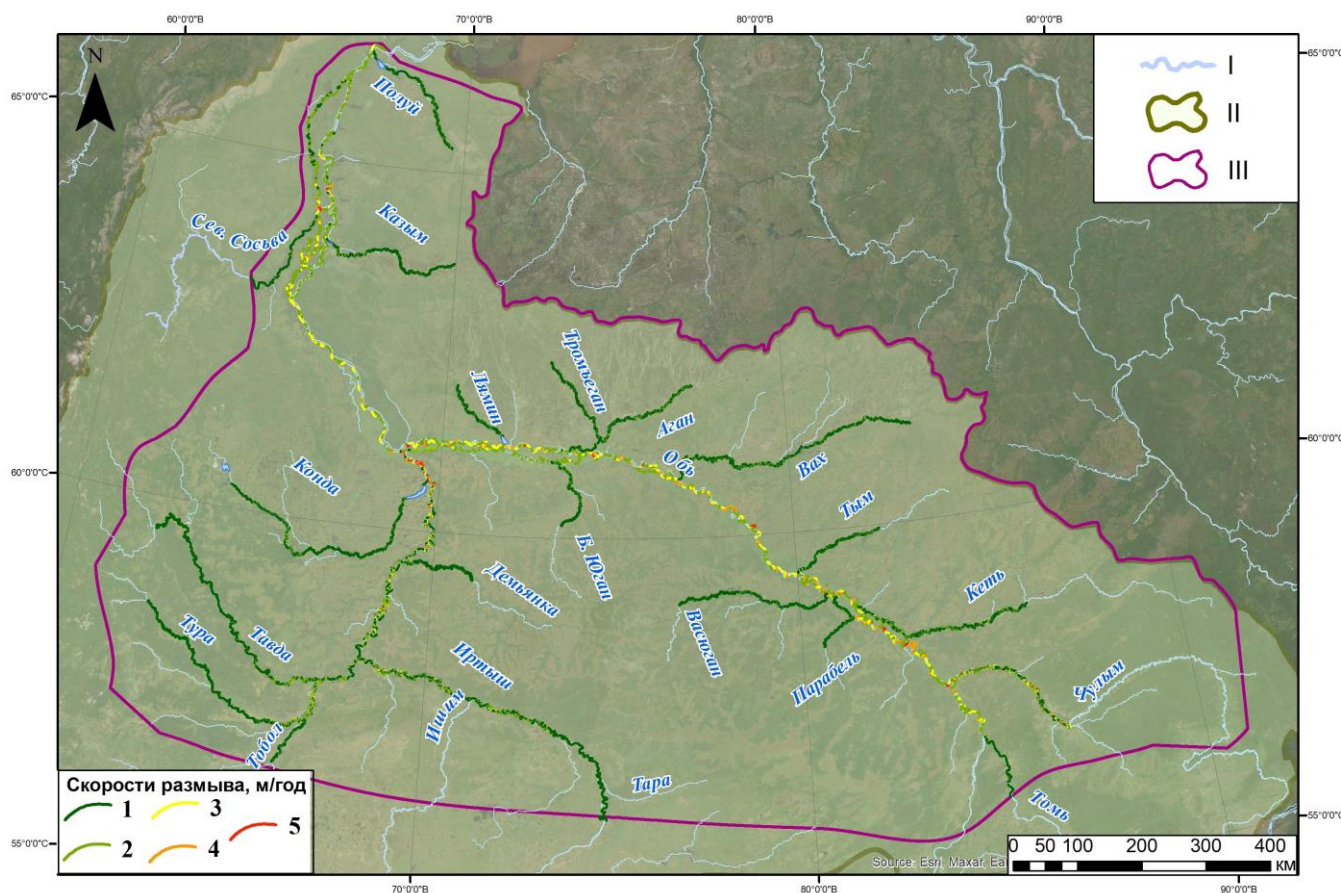


Рисунок 3 – Распространение размываемых берегов и скоростей их размыва на реках Обь-Иртышского бассейна: 1 – <1 м/год, 2 – $1-3$ м/год, 3 – $3-5$ м/год, 4 – $5-7$ м/год, 5 – >7 м/год. I – средние, большие и крупнейшие реки бассейна; II – граница Обь-Иртышского бассейна; III – равнинная часть лесной зоны бассейна

Наиболее активные горизонтальные русловые деформации и, соответственно, размывы берегов характерны для р. Оби. В среднем и нижнем течении (от слияния с р. Томью до г. Салехарда) скорости размыва берегов изменяются в диапазоне: средние – от 0,5 до 13,3 м/год, среднемаксимальные – 0,6–26,6 м/год. При постепенном увеличении вниз по течению водоносности реки, явно направленного тренда изменений по длине интенсивности отступления берегов не прослеживается. Это связано с рассредоточением стока воды по рукавам сначала пойменно-русловых разветвлений (от г. Колпашево до устья р. Ваха), а затем раздвоенного русла, пойменным протокам (ответвлениям) и по широкой пойме при ее глубоком и длительном затоплении в половодье, с постоянным изменением морфодинамических типов и локальным влиянием коренных берегов на средней Оби и постоянным, в основном для правого рукава раздвоенного русла, на нижней.

В различных типах русла Оби характеристики размыва берегов несколько выше для средней Оби по сравнению с ее нижним течением. Различия в

интенсивности горизонтальных русловых деформаций на средней и нижней Оби связаны с возрастанием вниз по течению степени расщепленности стока в связи с появлением раздвоенного русла и большого количества пойменных протоков (ответвлений), значительным расширением поймы в нижнем течении (максимум до 60 км) и ее глубокого затопления. Одновременно ниже течения р. Кети снижается удельная величина руслоформирующего расхода воды, когда он проходит уже при затопленной пойме.

На нижнем Иртыше средние скорости размыва берегов на излучинах изменяются от 1,2 до 11,3 м/год, среднемаксимальные – 1,6–17,2 м/год, в целом возрастая вниз по течению.

Для всех остальных рек бассейна средние скорости размыва берегов на их излучинах колеблются в пределах 1–6,9 м/год, максимальные – 1,1–12,7 м/год.

Изменение интенсивности горизонтальных русловых деформаций по длине рек имеют разные тренды, что обусловлено многими факторами. В одном случае, скорости размыва берегов возрастают к устью, что происходит на фоне увеличения расходов воды в том же направлении – Тым, Аган, Казым, Васюган, Демьянка, Тура и Конда. На многих реках – Томи, Тромъегане, Полуе, Большом Югане, Тоболе, Тавде и Северной Сосьве – интенсивность отступления берегов растет по длине русла, но в низовьях снижаются. Это обусловлено расширением дна долины, которая становится общей с Обью или Иртышом, и растеканием по ней потока в половодье, а иногда, и образованием озеровидных расширений русла и соров в результате периодического подпора со стороны главных рек (например, на реке Конде). Только Чулым, Кеть, Вах и Лямин не имеют какого-либо направленного тренда по длине русла. Это объясняется в первую очередь изменением параметров излучин (степени развитости l/L , радиусов кривизны r и шагов L) в зависимости от ширины днища долины B_d , степени разветвленности русла и др.

В целом бóльшие расходы воды в рукавах определяют бóльшую интенсивность размыва берегов и их протяженность. Например, в прорванных излучинах в спрямляющем рукаве, в котором проходит до 80 % стока, скорости размыва берегов – до 8 м/год, тогда как в старом русле не превышают 3 м/год. Основные размывы берегов в односторонних разветвлениях концентрируются в главном русле (до 90 % стока), их скорости выше в 2 раза и более по сравнению с второстепенными протоками, имеющими долю стока до 30 % и темпы отступления пойменных берегов в пределах 1–1,5 м/год. Для одиночных разветвлений с сосредоточением до 70–80 % стока в одном из рукавов характерно проявление в основном русле наибольшей интенсивности смещения русла (до 6 м/год и более), тогда как в рукаве с меньшими расходами воды скорости размыва снижены в 2–3 раза. В сопряженных разветвлениях, где один из рукавов звена

последовательно концентрирует до 80 % стока, размывы берегов в этих рукавах получают наиболее активное развитие. Особенности распределения стока по рукавам пойменно-русловых разветвлений, зависящих от их морфологии и водности года, приводит к тому, что темпы отступления берегов либо сопоставимы, либо отличаются в 1,5–2 раза.

Скорость потока определяет интенсивность размыва берегов при его воздействии на них. Построенные на основе измерений скоростные поля потока позволяют получить наиболее полную информации о структуре потока на участках русла. Эти данные необходимы для понимания происходящих русловых переформирований, в т.ч. размывов берегов, прогноза русловых деформаций и обоснования мероприятий по управлению русловыми процессами. В разных типах русла динамика потока и распределение зон размыва берегов и аккумуляции имеют свои особенности.

Глава 6. Деформации русел как форма проявления опасности русловых процессов на реках бассейна

В шестой главе дан анализ деформаций русла как формы проявления опасности русловых процессов на реках бассейна. Для средней и нижней Оби одной из главных форм проявления переформирований русла является развитие излучин русла, рукавов пойменно-русловых разветвлений и рукавов раздвоенных русел, а также изгибов рукавов русловых (островных) разветвлений, направленное изменение их параметров в результате размывов одних и «намывах» других берегов, которые могут представлять, как потенциальную угрозу в связи с изменением условий судоходства, так и реальная, когда утрачивается часть территории с объектами жилой и хозяйственной инфраструктуры. В целом цикл развития форм русла и их переформирований составляет от 20 до 80 лет для рукавов русловых (островных) разветвлений и сотни лет для спрямления излучин. Иногда при критических значениях ($l/L \approx 1,6$) образуются прорванные излучины путем формирования во время половодья в пониженной тыловой части пойменной шпоре спрямляющей протоки, забирающей значительную часть общего стока воды; старое русло, превратившееся в рукав, мелеет или со временем отмирает.

Нижний Иртыш характеризуется активными русловыми переформированиями, заключающиеся, как и на Оби, в развитии и смещении излучин в продольном, продольно-поперечном и поперечном направлениях, изменениях их параметров в результате размывов берегов. Важным фактором их морфологических изменений являются ширина дна долины и влияние коренных берегов: первая – обуславливает свободное их развитие, второе – ограничивающее. Коренной берег обуславливает формирование вынужденных и

адаптированных излучин, в которых русловые деформации невелики (не более 1 м/год), но на склонах развиваются оползни, которые могут перекрывать часть русла, отклонять поток и способствуют размыву противоположного пойменного берега. Для всех средних и крупных рек, как и для Оби и Иртыша, главной формой переформирования русла является развитие и смещение излучин русла в ходе размывов берегов, а их темпы зависят от степени их развитости. Сегментные излучины (пологие, развитые или крутые) характеризуются направленным смещением русла, и по мере их развития и искривления (увеличения l/L и уменьшения r) происходит активизация циркуляционных течений, по форме они становятся со временем петлеобразными.

Для интегральной оценки опасных проявлений русловых процессов на реках Обь-Иртышского бассейна были использованы разные подходы. На крупнейших реках бассейна (Оби и Иртыше) применялся показатель устойчивости русла – число Лохтина L и его изменение по длине реки.

Согласно проведенным исследованиям русло средней и нижней Оби относительно устойчивое ($L=6,6-9,7$), характеризующееся умеренной опасностью по классификации Р.С Чалова [2008], а при подходе к коренному берегу – устойчивым ($L=10-38,6$) со слабой степенью опасности [Чалов, 2008]. Другая крупнейшая река бассейна – Иртыш имеет также относительно устойчивое и устойчивое русло со слабой и умеренной опасностью русловых процессов, соответственно. По данным [Русловой...,1994], на Иртыше от устья р. Тары до устья р. Тобола $L=11-12$ (русло устойчивое). Проведенные расчеты числа Лохтина на основе отбора проб донных отложений для нижнего течения Иртыша показали, что оно изменяется от 8,6 до 10,1, возрастая к устью, а среднее значение составляет 9,7.

Для средних и больших рек Обь-Иртышского бассейна имеются только общие данные об устойчивости русла: L изменяется в диапазоне от 5 до 7,5, т.е. русла притоков Оби и Иртыша являются относительно устойчивыми, возрастая к устью [Русловой..., 1994]. Поэтому средние и большие реки бассейна оценивались при помощи баллов опасности русловых процессов по трем критериям, характеризующим размыва берегов: средняя скорость ($C_{ср}$, м/год), максимальная скорость ($C_{макс}$, м/год) и относительная протяженность фронта размыва ($L_{фр}$, %). Каждый из критериев имеет свою градацию в зависимости от степени опасности, которую он характеризует. Каждой градации присваивается свой балл – от 0 (отсутствие опасности) до 5 (наибольшая опасность). Полученные по каждому критерию баллы складываются, и в зависимости от их итоговой суммы присваивается балл суммарной опасности: до 4 – 1 балл опасности, от 4 до 8 – 2 балл опасности, от 8 до 12 – 3 балл опасности, от 12 до 16 – 4 балл опасности, от 16 – 5 балл опасности.

Для всех рек либо выдерживается один уровень опасности, либо наблюдается некоторое ее увеличение вниз по течению. Наибольшая опасность (2–3 балла) характерна для самых крупных правобережных притоков Оби – Томи и Чулыма. При продвижении на север и запад она снижается с 2 до 1 балла. Балл опасности также повышен на западе, где он приурочен к рекам бассейна р. Тобола, для рек Конды и Северной Сосьвы.

В целом для средних и больших рек Обь-Иртышского бассейна опасность русловых процессов слабая (1–2 балла), тогда как для крупнейших – Оби и Иртыше – она повышается и, согласно классификации МГУ, становится умеренной (относительно устойчивые русла – 2 балла опасности – умеренная степень). При этом как на Оби и Иртыше, так и на их притоках наблюдаются проявления экстремальных размывов, обусловленные местными условиями (легко размываемые породы, слагающие берегов или террасу, направляющее воздействие выступов (мысов) коренного берега, слив осветленных вод выклинивающейся поймы и т.д.), и, наоборот, участки русла, где при подходе к коренному берегу устойчивость русла возрастает, а темпы горизонтальных русловых деформаций резко снижаются.

На основе данных о горизонтальных русловых деформациях было выполнено районирование территории бассейна, а для основных рек Оби и Иртыша – выделение ряда участков, различающихся по причинам, особенностям и темпам размыва берегов (рисунок 4). Обь и Иртыш разделены на 5 участков каждая (А–Д – Обь и а–д – Иртыш), на территории бассейна выделено семь районов (I–VII). Полученное районирование хорошо согласуется с изменением водности по длине рек Оби и Иртыша и районированием территории Обь-Иртышского бассейна по зависимости стока рек от структуры речной сети (рисунок 2).

Средняя и нижняя Обь и нижний Иртыш имеют русла относительно устойчивые ($L=5,6-9,7$), местами устойчивые ($L=10-38,6$). Полученные в ходе исследования скорости размыва берегов и их протяженность хорошо укладываются в диапазоны характеристик горизонтальных деформаций [Чалов, 2019]: скорости размыва в основном в пределах от 2 до 5 м/год, максимальные – более 10 м/год, не исключая экстремальных проявлений размыва берегов вследствие местных условий; периодичность развития рукавов в диапазоне 20–80 лет, развития и спрямление излучин – около 100 и более лет; протяженность размыва берегов – от 30 до 60%.

Остальные реки Обь-Иртышского бассейна объединяются в семь районов: I – Юго-восточный – реки Томь и Чулым; II – Восточный – реки Кеть, Тым и Вах; III – Центральный – реки Тромъеган, Аган и Лямин; IV – Северо-восточный – реки Казым и Полуй; V – Южный – реки Парабель, Васюган, Большой Юган и

Демьянка; VI – Западный – реки Тобол, Тура, Тавда и Конда; VII – Северо-западный – река Северная Сосьва (рисунок 4). Выделенные районы также хорошо согласуются с проведенной оценкой опасности по характеристикам размыва берегов.

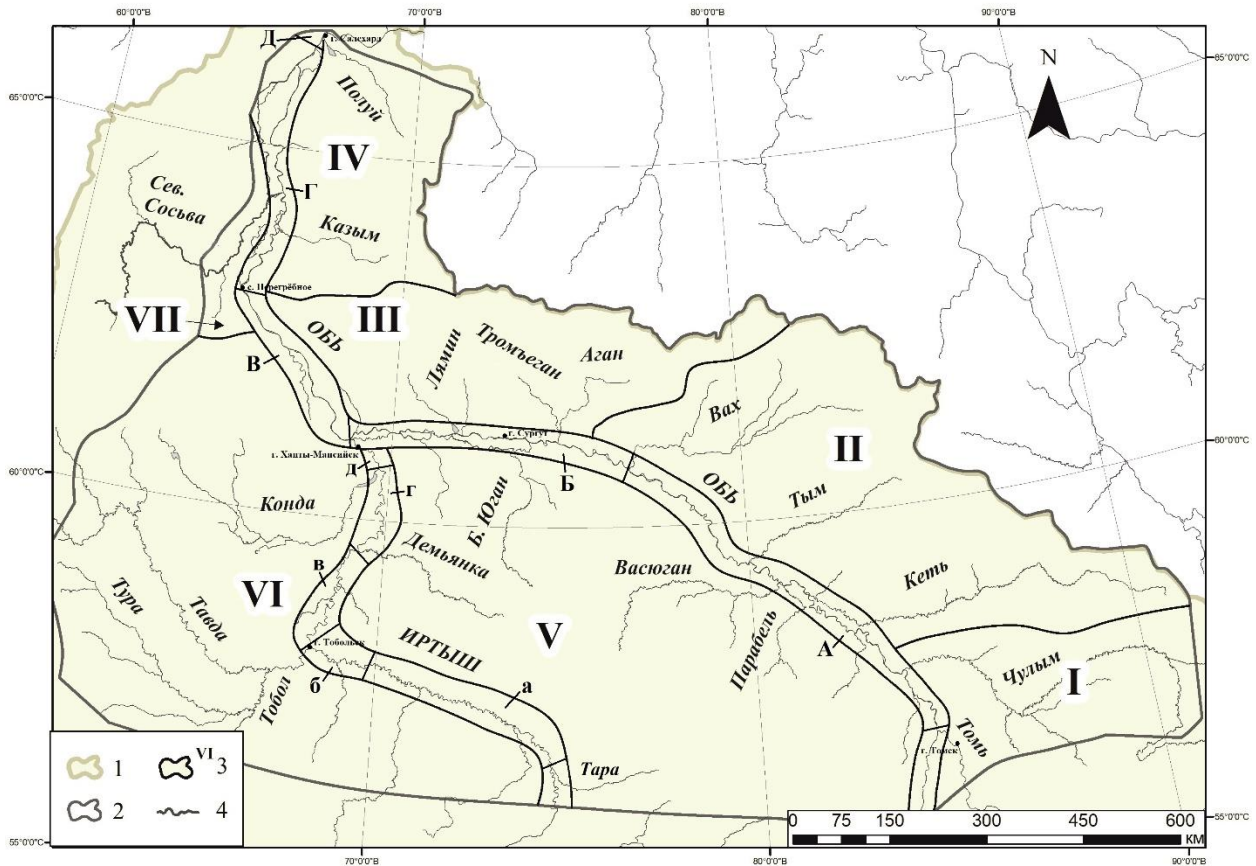


Рисунок 4 – Районирование Обь-Иртышского бассейна по условиям размыва берегов (условные обозначения – рисунок 2)

Гидролого-морфологические зависимости позволяют выявить связи между характеристиками размыва берегов, показателями водоносности рек и рукавов, морфологическими параметрами русла – степенью развитости l/L , радиусами кривизны r , шагами излучин русла и рукавов разветвлений $L_{\text{изл(раз)}}$. Полученные связи характеризуют не только отдельную реку или ее участки, но и реки близких порядков в районах с одинаковыми условиями формирования русел и развития русловых деформаций. Эти зависимости применяются при прогнозе русловых деформаций и исследовании малоизученных рек на основе региональных уравнений связи.

Увеличение порядка рек (N), т.е. их размера и водоносности, а, следовательно, мощности потока сопровождается возрастанием скоростей размыва берегов для всех рек бассейна. Эта зависимость описывается на графике связи $C_{\text{ср}}=f(N)$ верхней огибающей a (рисунок 5). Особенно резкий рост $C_{\text{ср}}$ наблюдается при переходе от средних рек к большим ($N > 13-14$). Это объясняется

тем, что зависимость между порядком реки и водоносностью также отличается для малых, средних, больших и крупнейших рек, трансформируясь при переходе от одной категории в другую [Пахомова, 2001]. Исключение составляет р. Обь. До участка среднего течения с раздвоенным руслом интенсивность горизонтальных русловых деформаций также растет, но ниже по течению – наблюдается обратный тренд \bar{b} из-за рассредоточения стока по ее длине и по широкой пойме (до 60 км), развития раздвоенного русла, русловых разветвлений русла и наличия множества пойменных проток.

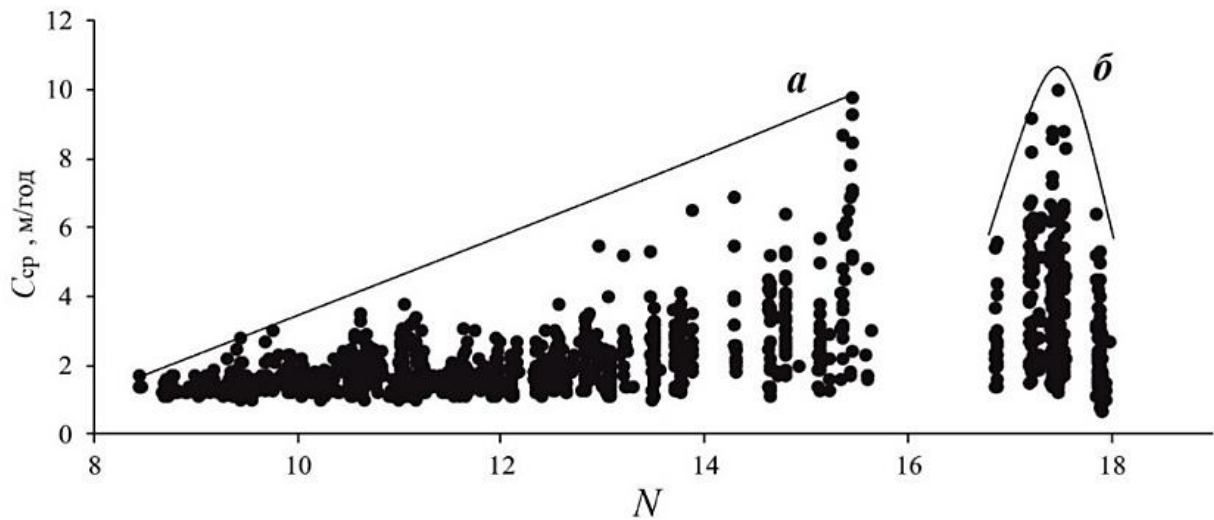


Рисунок 5 – Зависимость средней скорости размыва берегов ($C_{ср}$, м/год) от порядка рек (N) Обь-Иртышского бассейна: a – зависимость для рек Обь-Иртышского бассейна, b – зависимость для средней и нижней Оби

Исследования, проведенные на нижней Оби в период весеннего половодья, когда измеренные расходы были близки к руслоформирующим верхнего интервала (проходят при затопленной пойме – 25000 и 33000 м³/с по г.п. Белогорье и г.п. Салехард, соответственно [Русловой..., 1994]), подтверждают связь между водоносностью Оби и рукавов ее раздвоенного русла и интенсивностью горизонтальных русловых деформаций: чем больше расход воды в половодье, тем выше скорости размыва берегов и больше протяженность размываемых берегов.

Степень развитости свободных излучин русла, рукавов раздвоенного русла и рукавов пойменно-русловых разветвлений, излучин рукавов, огибающих острова в одиночных, односторонних или сопряженных разветвлениях определяет скоростное поле потока, расположение и протяженность фронта и интенсивность размыва берегов в их пределах [Маккавеев, 1955; Проектирование..., 1964; Чалов, 2011]. На Оби точки на графике связи скорости размыва берегов от степени развитости свободных излучин русла $C=f(l/L)$, излучин рукавов раздвоенных

русел, пойменно-русловых и русловых (островных) разветвлений можно разделить на группы в соответствии со степенью их развитости (рисунок 6А): I – пологие ($l/L=1,1\div 1,4$), II – развитые ($l/L=1,4\div 1,7$) и III – крутые ($l/L>1,7$) (по классификации [Чалов и др., 2004]); они все описываются верхними огибающими как для Оби в целом, так и отдельно для ее участков: 1 – средняя Обь до устья р. Ваха, 2 – широтный участок Оби, 4 – раздвоенное русло Оби (рисунок 6А), показывая, что скорости размыва берегов растут на излучинах до значения $l/L=1,7$, после чего интенсивность горизонтальных деформаций снижается.

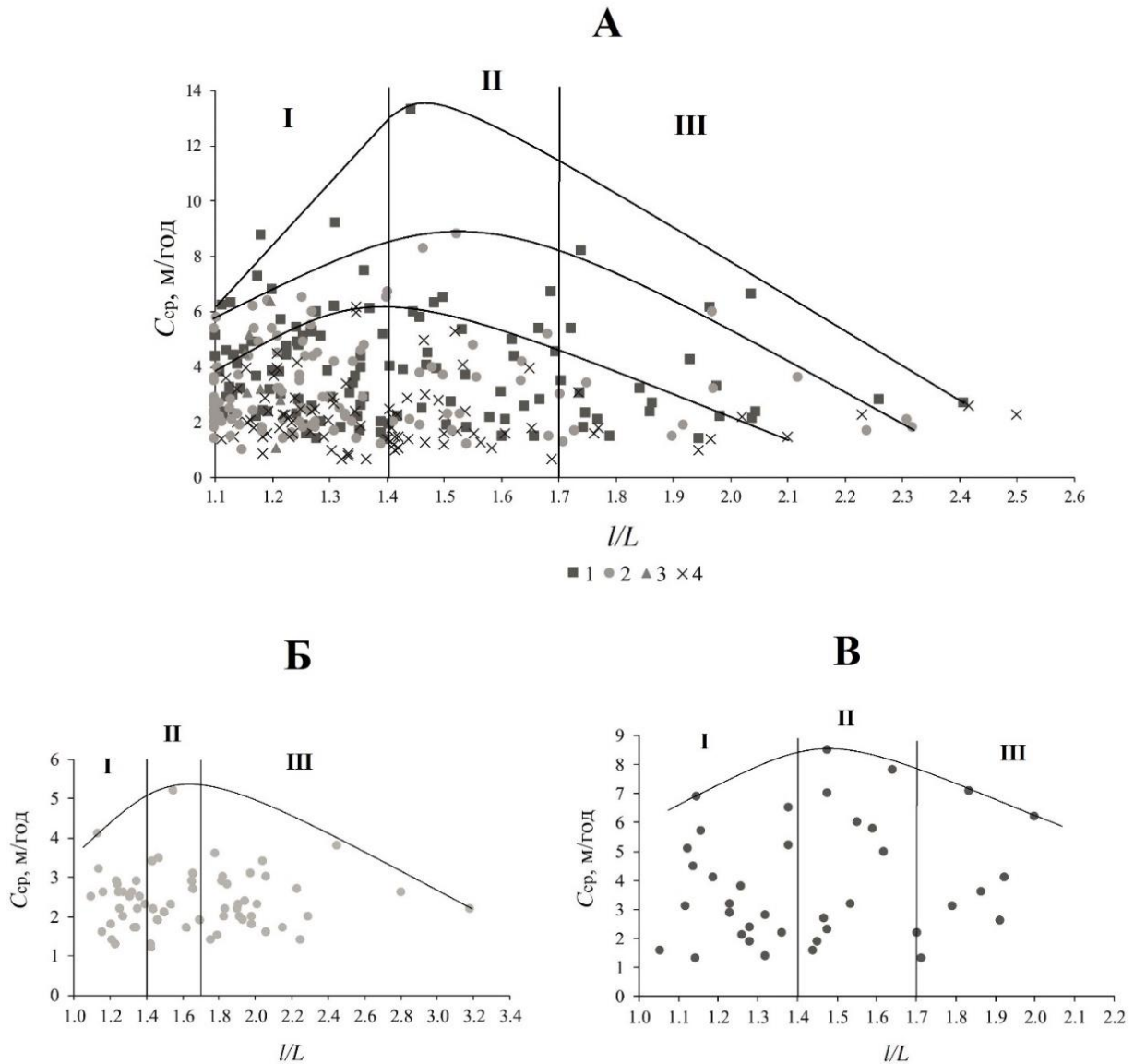


Рисунок 6 – Зависимость средней скорости размыва берегов ($C_{ср}$, м/год) от степени развитости форм русла (l/L). А – Обь: 1 – средняя Обь (слияние с р. Тобью – устье р. Ваха), 2 – средняя Обь (устье р. Ваха – слияние с р. Иртышом), 3 – единое русло нижней Оби (устье р. Иртыша – с. Перегрёбное), 4 – раздвоенное русло нижней Оби; Б – Иртыш выше устья р. Тобола; В – Иртыш ниже устья р. Тобола. I – пологие, II – развитые, III – крутые излучины

Пологие излучины русла и рукавов в русловых (островных) разветвлениях на Оби, для которых слабо выражены дифференциация поля скорости потока и циркуляционные течения [Чалов, 2011], представлены полем точек I (рисунок 6А), на положение которых оказывают большее влияние местные условия (тип русла и сопряжение с соседними формами русла, наличие побочной или осередков, взаимодействие пойменного и руслового потоков и т.д.), локально воздействующие на структуру потока.

При переходе к развитым излучинам ($l/L=1,4\div 1,7$) на средней и нижней Оби интенсивность размыва берегов достигает максимума (рисунок 6А), после чего снижается. Это обусловлено утратой извилистой формой русла гидравлической выгоды, ростом потерь напора [Маккавеев, 1955], и, как следствие, снижением интенсивности русловых деформаций [Попов, 1965; Чалов и др., 2004]. На этом этапе возрастает также вероятность (максимум при $l/L=1,6$) спрямления излучины за счет сосредоточения значительной части вод, затопивших пойму в половодье, в тыловой части пойменной шпоры и установления вдоль нее наибольшего продольного уклона [Попов, 1965]. Отсутствие на Оби явной границы перехода ($l/L\approx 1,4-1,5$) к снижению скоростей размыва берегов, вероятно, обусловлено большим количеством факторов, влияющих на формирование и развитие излучин (распределение стока по рукавам разветвлений и раздвоенного русла, взаимодействие руслового и пойменного потоков при длительном и глубоком затоплении поймы, сопряжение с соседними типами русла и т.д.). При дальнейшем увеличении l/L , когда излучины на Оби становятся крутыми или даже гипертрофированными ($r < 3b_p$) по форме, вследствие чего происходит нарушение правила Миловича, скорости размыва берегов еще больше уменьшаются (рисунок 6А). Такая закономерность распределения скоростей размыва берегов на Оби соответствует переходу от пологих излучин к развитым, а затем к крутым, что также находит отражение в последовательной смене продольного их смещения продольно-поперечным и поперечным [Чалов и др., 2004].

На нижнем Иртыше зависимость скорости размыва берегов от степени развитости свободных излучин русла также, как и на Оби, описывается верхней огибающей, и точки разделяются на группы по степени их развитости (рисунок 6Б,В): I – пологие ($l/L=1,1\div 1,4$), представленные полем точек, II – развитые ($l/L=1,4\div 1,7$) с максимальными размывами берегов и III – крутые ($l/L > 1,7$) с постепенным снижением темпов смещения русла. На нижнем Иртыше уменьшение скорости размыва берегов фиксируется на излучинах с $l/L\approx 1,55$. В отличие от Оби на Иртыше этот переход выражен более четко, что, очевидно, связано тем, что на последнем значительно меньше факторов, способных оказать влияние на структуру потока и развитие свободных излучин. На большей своей

длины русло нижнего Иртыша неразветвленное с шириной до 1 км и отсутствием пойменных проток, по которым может происходить рассредоточение стока, за исключением самых низовьев реки.

Выделенные районы Обь-Иртышского бассейна отличаются по зависимостям, связывающим характеристики размыва берегов с параметрами форм русла (излучин русла, излучин рукавов пойменно-русловых и одиночных разветвлений, раздвоенных русел). Для развитых ($l/L=1,4\div 1,7$) излучин русел рек и рукавов разветвлений характерна зависимость $C=f(l/L)$, которая описывается верхними огибающими полей точек (рисунок 7).

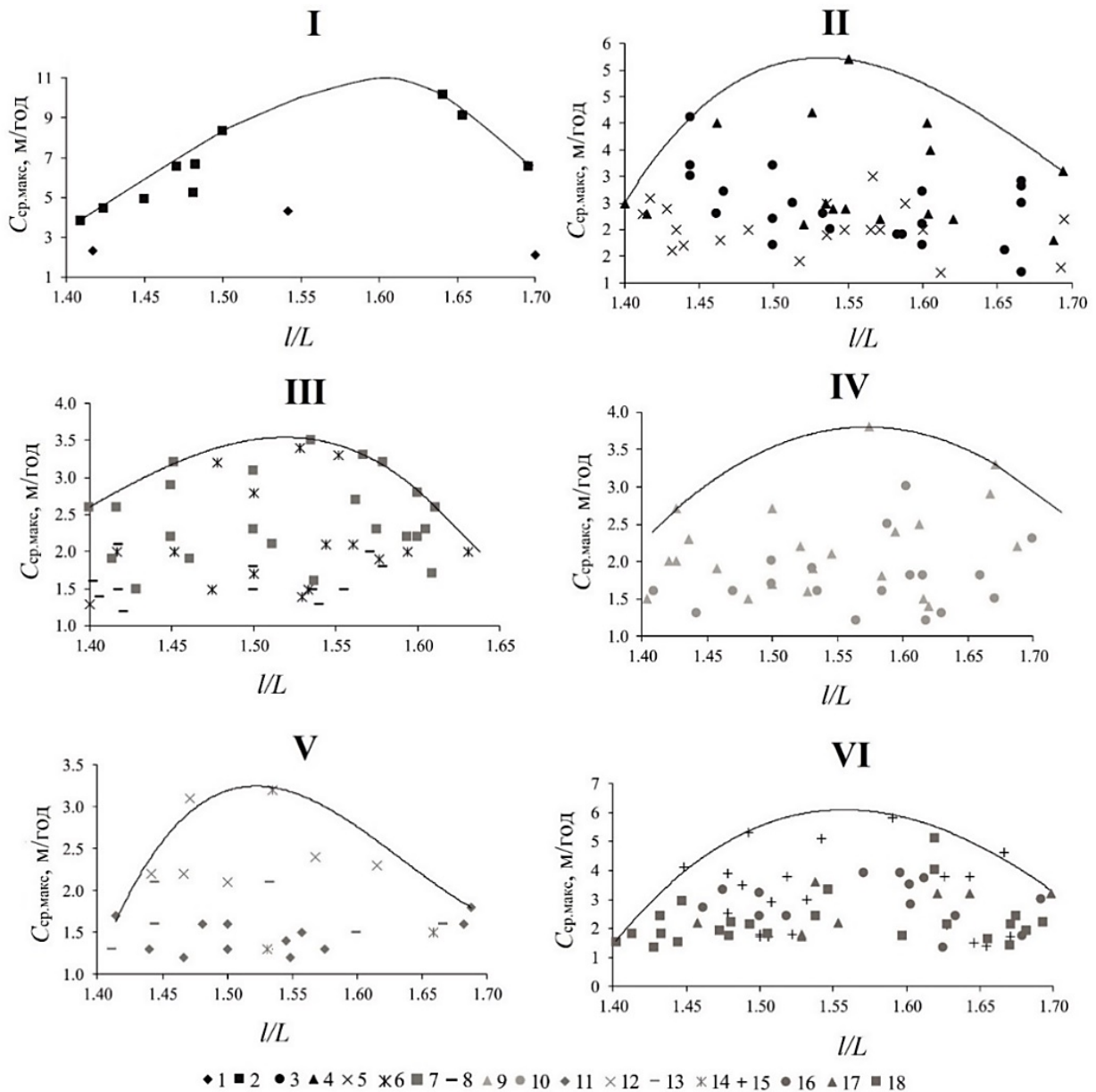


Рисунок 7 – Связь между степенью развитости (l/L) и среднемаксимальной скоростью размыва берегов ($C_{ср.макс}$, м/год) на излучинах русла рек Обь-Иртышского бассейна. I–VI – см. рисунок 4. 1 – Томь, 2 – Чулым, 3 – Кеть, 4 – Тым, 5 – Вах, 6 – Тромъеган, 7 – Аган, 8 – Лямин, 9 – Казым, 10 – Полуй, 11 – Парабель, 12 – Васюган, 13 – Большой Юган, 14 – Демьянка, 15 – Тобол, 16 – Тура, 17 – Тавда, 18 – Конда

Скорости размыва берегов возрастают до значений $l/L=1,5-1,6$, после чего снижаются. Каждый район отличается по положению вершины перегиба верхней огибающей по диапазону l/L от 1,5 до 1,6 и по величине $C_{\text{ср.макс}}$ – от 3,1 до 10,1 м/год, что связано с природными особенностями каждого района, прежде всего, внутригодовое распределение стока на реках, изменяющееся с севера на юг и с запада на восток.

То же наблюдается в зависимостях от других параметров – радиуса кривизны r и шагов излучин или разветвлений $L_{\text{изл(разв)}}$.

Проверка полученных результатов была осуществлена путем расчета диапазонов теоретически возможных длин фронтов размыва по уравнениям верхних и нижних огибающих $L_{\text{фр}}=ar+b$ и $L_{\text{фр}}=aL+b$ для притоков Оби и Иртыша. Были выбраны неизученные реки Пим и Тара, относящиеся к III и V районам, соответственно. Определенные по космическим снимкам и используемые в расчетах параметры излучин (r и L) дали широкий спектр протяженности размываемых берегов (от 100 м до 1 км) для различных излучин. Для тех же излучин на основе сравнения разновременных космических снимков были определены $L_{\text{фр}}$, которые попали в полученные диапазоны.

Участки русла средней и нижней Оби и нижнего Иртыша, и районы, объединяющие их притоки, характеризующиеся как своими особенностями гидролого-морфологических зависимостей, так и значениями коэффициентов в уравнениях, связывающих показатели размыва берегов с определяющими факторами.

На *средней и нижней Оби* изменение коэффициентов уравнений сверху вниз по течению обусловлено большим количеством факторов, каждый из которых оказывает влияние на развитие русла, и в размывах берегов проявляется уже их интегральный эффект. Прежде всего, это – рассредоточение стока по рукавам раздвоенного русла, пойменно-русловым (в т.ч. сложным) и русловым (островным) разветвлениям и пойменным протокам (ответвлениям), происходящее на фоне постоянных изменений ширины поймы Оби, по которой в половодье происходит растекание потока (руслоформирующий расход на большей части реки проходит при затопленной пойме), аккумуляция наносов на ее поверхности, а затем – слив осветленных вод с поймы и из пойменных протоков, способствующий активизации размывов берегов. Одновременно происходит постоянная смена типов русла, сопряженное развитие смежных форм русла и изменение их параметров. Местами в среднем и постоянно в нижнем течении Оби (в т.ч. в правых рукавах раздвоенного русла) большое влияние на формирование русла оказывает правый коренной берег, оказывающий направляющее воздействие на поток и ограничивающий горизонтальные русловые деформации.

На *нижнем Иртыше*, несмотря на постепенное увеличение вниз по течению расхода воды, изменение ширины дна долины и периодическое влияние коренного берега при абсолютном преобладании меандрирующего русла, уравнения связи и коэффициенты в них отличаются для излучин в зависимости от степени их развитости. В то же время параметры форм русла сами зависят от условий формирования русла.

Для *притоков Оби и Иртыша*, объединяющихся в районы, гидролого-морфологические зависимости и уравнения, описывающие их, зависят во многом от природных условий, их характеризующих, увлажненности территории, заболоченности, заозеренности и залесенности и гидрогеологии бассейнов, проявляющиеся через внутригодовое распределение стока рек, и их русловой режим, в т.ч. активность горизонтальных русловых деформаций.

Для ключевых участков Оби и Иртыша были даны прогнозные оценки перестроений их русел, размывов берегов, и учитывая особенности формирования русел рек и проявления на них опасных русловых процессов были разработаны следующие рекомендации:

- Создать для рек Обь-Иртышского бассейна систему мониторинга за размывами берегов, особенно на участках со сниженной устойчивостью русел Оби и Иртыша и повышенной опасностью русловых деформаций на их притоках, и там, где расположены объекты жилищной и хозяйственной инфраструктуры, переходы нефте- и газопроводов, мостовые переходы и другие важные объекты; помимо систематических съемок и промеров русла, мониторинг должен сопровождаться проведением руслового анализа и составлением прогнозов перестроений русла;
- Проводить в местах, где размывы берегов влекут за собой утрату территорий населенных пунктов, разрушение инженерных объектов и сопутствующей им инфраструктуры, берегозащитные мероприятия и выправительные сооружения (дамбы) на основе проектов регулирования русла, базирующихся на управлении русловыми процессами;
- Учитывать при планировании мероприятий по освоению рек и приречных территорий и их экономическому развитию результаты исследований русловых процессов и их опасных проявлений – размывов берегов.

В заключении сформулированы основные *выводы*:

1. Реки Обь-Иртышского бассейна характеризуются формированием русел в свободных, относительно однородных условиях, в которых размывы

берегов являются повсеместно распространенным явлением, характеризуясь достаточно большими темпами; протяженность и положение фронтов размыва отражают характер смещения форм русла (излучин, рукавов), скорости размывов – интенсивность горизонтальных русловых деформаций. Размывы берегов не только создают опасность для освоения приречных территорий и водных ресурсов, но и выступают источником поступления наносов в русло, которые аккумулируясь ниже по течению, затрудняют судоходство, вызывая обмеление перекатов.

2. Территория Обь-Иртышского бассейна в пределах лесной зоны на основе связи $Q_{cp}=f(N)$ разделяется на районы по природным условиям формирования русел рек (гидрологическим, климатическим, гидрогеологическим и другим). С ростом порядка рек (их размера и водоносности) интенсивность горизонтальных русловых деформаций увеличивается вниз по течению на средних и больших реках бассейна – притоках Оби и Иртыша. Изменения ширины днища долины (пойма+русло) и, следовательно, растекание потоков половодья по пойме, влияние коренных берегов, постоянное изменение параметров форм русла в ходе их развития и условий взаимодействия руслового и пойменного потоков оказывают влияние на изменение скорости размыва берегов по длине рек при относительно однородной литологии отложений, с которыми взаимодействует речной поток.

3. На средней и нижней Оби направленный тренд в изменении темпов размыва берегов вниз по течению отсутствует, несмотря на увеличение водоносности рек в 2–3 раза. Основную роль в этом играет рассредоточение стока по рукавам раздвоенного русла и пойменным протокам (ответвлениям), длительное и глубокое затопление поймы, что приводит к общему снижению мощности потока и расходов воды в основном русле, и, следовательно, интенсивности размывов берегов. На нижнем Иртыше, наоборот, наблюдается последовательный рост скоростей размыва берегов вниз по течению в соответствии с увеличением его водоносности и по мере снижения влияния коренных берегов на развитие излучин, что связано с отсутствием рассредоточения потока по рукавам и пойменным протокам.

4. Для средней и нижней Оби характерно бóльшее разнообразие типов русла, чем на нижнем Иртыше и остальных реках бассейна, имеющих преимущественно меандрирующее (извилистое) русло. Интенсивность размыва берегов в различных типах русла больше на средней Оби, чем в ее нижнем течении, что обусловлено меньшей рассредоточенностью стока и влиянием коренных берегов. Наиболее активные горизонтальные русловые деформации на средней и нижней Оби приурочены к пойменно-русловым разветвлениям с меандрирующими рукавами и вписанным излучинам.

5. Районирование территории по условиям размыва берегов показывает снижение темпов размыва берегов на средних и больших реках к северу и к Обь-Иртышскому междуречью. В этом же направлении снижается степень опасности горизонтальных русловых деформаций. Каждый из районов характеризуется своими гидролого-морфологическими зависимостями, коэффициенты которых изменяются с юга на север и с востока на запад, а также вглубь рассматриваемой территории. Это районирование совпадает с гидрогеологическим районированием бассейна (по В.А. Земцову) и районированием территории по $Q_{cp}=f(N)$.

6. Средняя и нижняя Обь и нижний Иртыш имеют преимущественно относительно устойчивые русла и, соответственно, умеренную опасность. На остальных реках бассейна опасность русловых процессов относительно невысокая (1–2 балла), увеличиваясь вниз по течению, но в низовьях крупных рек (Томь и Чулым) может повышаться до 3 баллов.

7. Гидролого-морфологический анализ показал, что характеристики размывов берегов (C_{cp} , м/год, $L_{фр}$, км) на реках бассейна зависят от параметров форм русла, которые определяют структуру скоростного поля потока и циркуляционные течения, оказывая влияние на темпы и длину фронта размыва. С ростом степени развитости форм русла скорости размыва берегов на реках возрастают, достигая максимальных значений в диапазоне $l/L=1,4\div 1,7$, после чего они снижаются. Наибольшая протяженность фронта размыва берегов наблюдается у более пологих излучин с большим шагом и радиусом кривизны.

8. Разработаны основные рекомендации по безопасному и эффективному водохозяйственному и водотранспортному освоению территории Обь-Иртышского бассейна.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.6.16:

1. **Куракова А.А.**, Чалов Р.С. Морфология русла и размывы берегов нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 6. С. 41–50. (Scopus, IF (CiteScore) = 0.8)

2. Чалов Р.С., Камышев А.А., **Куракова А.А.**, Завадский А.С. Особенности рассредоточения стока воды и взвешенных наносов в половодье в раздвоенном русле нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 1. С. 22–33. (Scopus, IF (CiteScore) = 1.5)

3. Чалов Р.С., Камышев А.А., Завадский А.С., **Куракова А.А.** Морфодинамика и гидролого-морфологическая характеристика русла средней

Оби на широтном участке // География и природные ресурсы. 2021. № 2. С. 92–102. (Scopus, IF (CiteScore) = 1.0)

4. Чалов Р.С., Завадский А.С., Камышев А.А., **Куракова А.А.**, Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Гидролого-морфологическая характеристика и переформирования разветвленного русла нижней Оби (в пределах Ямало-Ненецкого АО) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 4. С. 539–553. (Scopus, IF (CiteScore) = 0.5)

5. Чалов Р.С., **Куракова А.А.**, Камышев А.А., Михайлова Н.М. Раздвоенные русла больших и крупнейших рек: условия формирования, рассредоточение стока и геоморфодинамика рукавов // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 2. С. 72–88. (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)

6. **Куракова А.А.**, Чалов Р.С. Морфодинамика русла нижнего Иртыша // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 99–109. (Scopus, IF (CiteScore) = 0.7)

7. Чалов Р.С., Камышев А.А., **Куракова А.А.**, Завадский А.С., Рулева С.Н. Гидролого-морфодинамическая характеристика разветвленного русла нижней Оби (в пределах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры) // География и природные ресурсы. 2022. №.2. С. 102–113. (Scopus, IF (CiteScore) = 1.0)

Иные публикации:

9 работ в других рецензируемых журналах, сборниках тезисов и материалов российских и международных конференций. Их полный список доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»:

<http://istina.msu.ru/profile/a.a.kurakova/>