

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.537; 551.435.133

РАЗМЫВ БЕРЕГОВ НА РЕКАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.А. Куракова¹, Е.Д. Павлюкевич², Д.В. Большаков³

^{1,2}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева

²Институт водных проблем РАН, лаборатория региональной гидрологии

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория геохимии природных вод

¹Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

²Вед. инженер, мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

³Мл. науч. сотр.; e-mail: bolshakovdv@my.msu.ru

В последние десятилетия изменение климата и деятельность человека оказывают все большее воздействие на реки, что во многом может провоцировать или усиливать проявление опасных русловых процессов (размывов берегов). Доступность спутниковых снимков с глобальным охватом предоставляет широкие возможности для изучения плановых деформаций русла и их количественной оценки. Это все стало основой для активного развития методов дистанционного зондирования, которое можно было бы широко применять при всем разнообразии размеров рек и их типов русла. Статья посвящена обобщающему анализу опасных проявлений русловых процессов (размывов берегов) на равнинных реках Западной Сибири при помощи современных методов их анализа. Для анализа были использованы спутниковые снимки CORONA, Landsat и Sentinel, которые позволяют детализировать изменения береговых линий с высокой точностью с использованием традиционного (ручного) и полуавтоматизированного методов дешифрирования и оцифровки космических снимков при помощи инструментов ГИС. Результаты показали, что скорость размыва берегов варьирует в зависимости от природных условий формирования русла, гидрологических условий и размера реки. На Оби и Иртыше темпы размыва берегов изменяются в первую очередь от местных факторов, таких как рассредоточение стока в рукавах разветвлений, влияние коренных берегов, распространение типов русла и морфологически однородных участков, параметры их форм и т. д. Среди больших и средних рек наиболее высокие скорости (2–3 м/год и более) размыва зафиксированы на реках Томь и Чулым, но в целом для рек Западной Сибири характерны относительно низкие скорости размыва берегов, что связано с природными особенностями региона.

Ключевые слова: русловые процессы, русловые деформации, дистанционные методы, ГИС

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.4.4

ВВЕДЕНИЕ

Реки и приречные территории издавна активно использовались для расселения и хозяйственной деятельности человека. В настоящее время на поймах крупнейших рек проживает почти 3 млрд человек [Best, 2019]. Используя реки и их ресурсы в качестве источника питания, для добычи полезных ископаемых, судоходства, ирригации, выработки электроэнергии и т. п., одновременно происходит их истощение и нарушение естественного режима природных процессов, на которые накладываются современные гидроклиматические изменения. Так, например, извлечение аллювия из русла Меконга, а также строительство плотин на нем привели к мор-

фологическим изменениям русла, изменению объемов поступления наносов в русло и увеличению интенсивности размыва берегов [Brunier et al., 2014; Hang et al., 2023].

Определение размывов берегов и их характеристик – задача, которая активно исследуется как в нашей стране, так и за рубежом. Доступ к современным спутниковым снимкам с глобальным охватом и постоянно появляющиеся и совершенствующиеся методы их обработки с помощью ГИС дают широкие возможности для проведения ретроспективного анализа смещений русел средних, больших и крупнейших рек, получения большого объема данных об их переформированиях за много-

летний период с количественными и качественными характеристиками горизонтальных русловых деформаций. Одним из основных автоматизированных методов определения количественных показателей размыва берегов является метод центральных (осевых) линий русла. Они определяются на каждом изображении и коррелируются во времени с использованием алгоритмов поиска ближайших соседей [Rowland et al., 2016]. Такой подход в основном используется для одорукавных меандрирующих русел [Sylvester et al., 2019], тогда как для разветвленных он показывает неточности и сложен в применении [Dey, Bhattacharya, 2014]. Кроме того, подход, основанный на центральных линиях, не может показывать изменение обоих берегов, которые могут размываться и нарастать с разной скоростью, особенно в течение короткого периода времени (до 10 лет) [Mason, Mohrig, 2019]. Чтобы преодолеть ограничения, возникающие в ходе применения подхода центральных линий, были разработаны новые автоматизированные методы, направленные на отслеживание изменения береговых линий. Одним из таких является измерение пространственной непрерывности эрозии и наращивания речных берегов – Spatially Continuous Riverbank Erosion and Accretion Measurements (SCREAM) [Rowland et al., 2016]. В начале каждое спутниковое изображение преобразуется в двоичную маску, представляющую либо реку, либо сушу. Затем определяются отдельные участки, которые превратились из суши в реку (эрозия) или из реки в сушу (наращивание) между масками. Линейные скорости эрозии/аккумуляции рассчитываются для каждого фронта по расстоянию от ближайшего соседа берега на одном изображении до пикселей берега на последующем изображении в пределах той же области эрозии/аккумуляции [Rowland et al., 2016]. На примере р. Джамуна в Бангладеш авторы определяли зоны размыва и наращивания берегов на основе анализа комбинации каналов спутниковых изображений Landsat MSS и TM за 30 лет (с 1973 по 2003 г.) в краткосрочном (скорость размыва или аккумуляции рассчитывалась между двумя доступными последовательными изображениями) и в долгосрочном (на основе сравнения между самым ранним изображением 1973 г. и последующими изображениями) плане, разделив участок реки протяженностью 205 км на 411 поперечных сечений с интервалом 0,5 км и назначением на них контрольных точек [Baki, Gan, 2012]. Другой, более комплексный подход разработали ученые из США, в котором определяли количественные показатели горизонтальных деформаций в площадном виде для рек разного морфодинамического типа (извилистые или разветвленные русла), а также учитывали переформирования не только в масштабе

русла, но и его перестройку на уровне поймы (например, спрямление излучин и образование старичных озер или превращение основного русла в маловодные пойменные протоки). Их подход основан на сочетании лабораторных исследований, методов численного моделирования и анализа спутниковых снимков [Greenberg et al., 2023]. Альтернативным методом количественной оценки размывов берегов с использованием космических снимков и возможностей ГИС является велосиметрия изображения частиц – Particle Image Velocimetry (PIV), основанная на отслеживании изменений береговой линии по изменению пикселей изображения (а не осевых линий), и которая одинаково применима как к одорукавным, так и разветвленным руслам [Chadwick et al., 2023].

На основе глобальных исследований было выявлено, что по сравнению с крупнейшими реками мира для Оби характерны относительно низкие скорости размыва берегов (не более 6–7 м/год), тогда как для Надыма, Пура и Таза они несколько выше [Langhorst, Pavelsky, 2023]. Русловые исследования рек Западной Сибири, проводившиеся с давних времен, долгое время были сосредоточены преимущественно на юго-востоке Обского бассейна [Чалов и др., 2001], в настоящее время их география расширяется [Куракова, Чалов, 2020; Куракова, 2022, Чалов и др., 2024], том числе с применением дистанционных методов [Вершинин и др., 2018] и стационарных наблюдений [Коркин, Исыпов, 2022].

Задача настоящей статьи – на основе современных подходов обработки и анализа космических снимков провести обобщающий пространственный анализ размывов берегов на реках Западной Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве наиболее ранних спутниковых изображений были подобраны монохромные космические снимки CORONA (разрешение снимков – 1,8 м/пикс) на среднюю и нижнюю Обь. Архив снимков создавался в 1950–1970-х гг. в рамках американских разведывательных миссий CORONA и LANYARD. Эти данные были рассекречены министерством обороны США и в настоящее время предоставляются на коммерческой основе через архив Геологической службы США (USGS) EarthExplorer. Также через портал EarthExplorer USGS и Центр открытого доступа Copernicus на исследуемые участки рек были подобраны мультиспектральные космические снимки, полученные со спутников семейства Landsat (TM 7, 8) и Sentinel, которые были подобраны на Обь, Иртыш и остальные большие и средние реки исследуемой территории. Данные, получаемые с этих сканирующих систем, отличаются различным количеством мультиспектральных

каналов и пространственным разрешением изображений, так как при их создании использовалось различное съемочное оборудование. Разрешение снимков возрастает с 28,5 м/пикс (Landsat TM) до 10 м/пикс (Sentinel). Дальнейшая их обработка основывается на спектральном анализе (отражательной способности) различных элементов земных ландшафтов. Получив несколько изображений в различных участках спектра, можно четче идентифицировать объекты (например, становятся четче дешифрируемые границы между береговыми бровками и водной поверхностью). Самой оптимальной комбинацией является сочетание ближнего, среднего ИК и красного видимого каналов. Это позволяет четко различить границу между водой и сушей и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. С большой точностью будут детектироваться водные объекты внутри суши. В период с 2009 г. по настоящее время используется спутник Landsat-7, на котором установлен улучшенный тематический сканер (ETM+). Одни из последних космических снимков, принадлежащих программе Landsat, были получены со спутника Landsat-8, запущенного в 2013 г. и использующего новую схему Push broom scanner с линейными датчиками. Landsat-8 получает изображения в видимом диапазоне волн, в ближнем и дальнем ИК с разрешением снимков 15, 30 и 100 м (панхроматический канал / мультиспектральный канал / дальний ИК). Космические аппараты Sentinel-2 оснащены мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, что гарантирует отображение различий в состоянии гидрографической сети, в том числе временные изменения, а также сводит к минимуму влияние на качество съемки атмосферы.

Для рек Западной Сибири были использованы два метода получения представлений о современных темпах размыва берегов, которые подробно описаны и показаны в работе [Куракова, 2022]. Первый, традиционный метод, основанный на сопоставлении положения береговой линии по оцифрованным космическим снимкам разных лет, применялся для Оби и северных рек (Надым, Пур и Таз).

Второй метод был использован для определения размывов берегов Иртыша, других средних и больших рек, имеющих преимущественно неразветвленные меандрирующие русла. Этот подход, разработанный на основе опыта зарубежных коллег [Rowland et al., 2016; Chadwick et al., 2023; Greenberg et al., 2023] и сотрудников НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавее-

ва МГУ [Завадский и др., 2019; Школьный, 2020; Чалов и др., 2021], используя возможности инструментов ГИС-проекта ArcGIS, позволяет полуавтоматизировать процесс сопоставления разновременных спутниковых изображений с использованием центральной осевой линии русла и ускорить, по сравнению с традиционным методом, получение информации о размывах берегов, их темпах и протяженности, а также пространственном расположении и изменении по длине русла [Завадский и др., 2019; Куракова, 2022].

При обработке космических снимков, их дешифрировании, оцифровке русел рек и получении характеристик размыва берегов были разработаны авторские алгоритмы, позволяющие получить размывы берегов в линейном и площадном виде отдельно для рек с разветвленным и меандрирующим руслом и разного размера. Весь процесс разделяется на два этапа. Первый этап заключается в получении линий или полигонов русла одним из описанных выше методов – ручным или автоматизированным – в зависимости от размера реки и типа ее русла. Второй этап – это обработка и непосредственное получение количественных характеристик размывов берегов в линейном или площадном виде. Второй этап также автоматизирован при помощи различных ГИС-инструментов, которые позволяют намного быстрее по сравнению с ручной обработкой получить большой объем данных о скоростях (C , м/год) и протяженности фронтов (L , м) размыва берегов на реках в целом и изменении по их длине.

В ходе исследования было выявлено, что данный полуавтоматизированный метод успешно применим для рек Западной Сибири со среднегодовыми расходами воды более 100 м³/с, так как только при такой водоносности русла рек имеют достаточную ширину на космических снимках, позволяющую дешифрировать и выполнять необходимые операции в программе ArcGIS на значительных по протяженности участках (ширина реки как минимум два или три пикселя на снимке, т. е. 20 или 30 м и более в зависимости от разрешения снимка). Что было подтверждено на примере Тобола выше г. Ялуторовска, где из-за недостаточной ширины русла на снимках стало невозможным провести его дешифрирование с последующим расчетом размывов берегов.

Помимо этого, на реках, обрабатываемых полуавтоматизированным методом, были выбраны ключевые участки, где расчеты размыва берегов производились традиционным методом. Полученные данные автоматизированным и традиционным методом оказались близки друг другу, различаясь не более чем на 10%.

Для обоих методов была определена точность. Для Оби, при исследовании которой использовались

снимки высокого разрешения системы CORONA за продолжительный период времени (около 50 лет), минимальный порог скорости отступления берегов был определен от 0,5 м/год. Для остальных рек (Надым, Пур, Таз, Иртыш и их притоки, притоки Оби) разрешение космических снимков (30 м) и рассматриваемый временной период в среднем около 30 лет определяют пороговое значение выявляемых скоростей размыва берегов – 1 м/год. В эти же пороги закладывались и погрешности, которые могут возникнуть в результате привязки снимков, ручной оцифровки береговой линии и применения автоматизированного метода. Ввиду того что значения определялись за большой период времени, влияние колебаний уровней воды, смен фаз водного режима и периодов водности сводится к минимуму. Это также было подтверждено дополнительными исследованиями, которые показали, что погрешность в определении скоростей размыва берегов при подборе снимков близкой водности или просто относящихся к одному периоду с одной и той же фазой водного режима составляет до 7,4% для среднегодовых и до 6,7% для максимальных значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании были рассмотрены средние, большие и крупнейшие равнинные реки Западной Сибири: Обь (от слияния Бии и Катунь до г. Салехарда), Иртыш (от государственной границы до слияния с Обью), Надым (208–0 км), Пур (395–0 км), Таз (405–0 км), и их притоки – Томь (379–0 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), Назым (91–0 км), Казым (444–0 км), Куноват (49–0 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), Ишим (224–0 км), Тобол (434–0 км), Тура (659–0 км), Тавда (730–0 км), Конда (735–0 км), Хейгияха (89–0 км), Левая Хетта (88–0 км), Евояха (96–0 км), Русская (104–0 км). Для всех них характерно широкое распространение размываемых берегов, что определяется свободными условиями развития русловых деформаций практически на всей рассматриваемой территории и абсолютным преобладанием рыхлых, легкоразмываемых отложений, слагающих берега рек (рис.).

Для средних и большинства больших рек характерны относительно невысокие скорости размыва берегов (не более 3 м/год), на крупнейших (Обь и Иртыш) и в низовьях некоторых больших рек (Томь, Чулым, Тобол) темпы отступления берегов возрастают, достигая иногда 7 м/год и более (см. рис., табл. 1, 2).

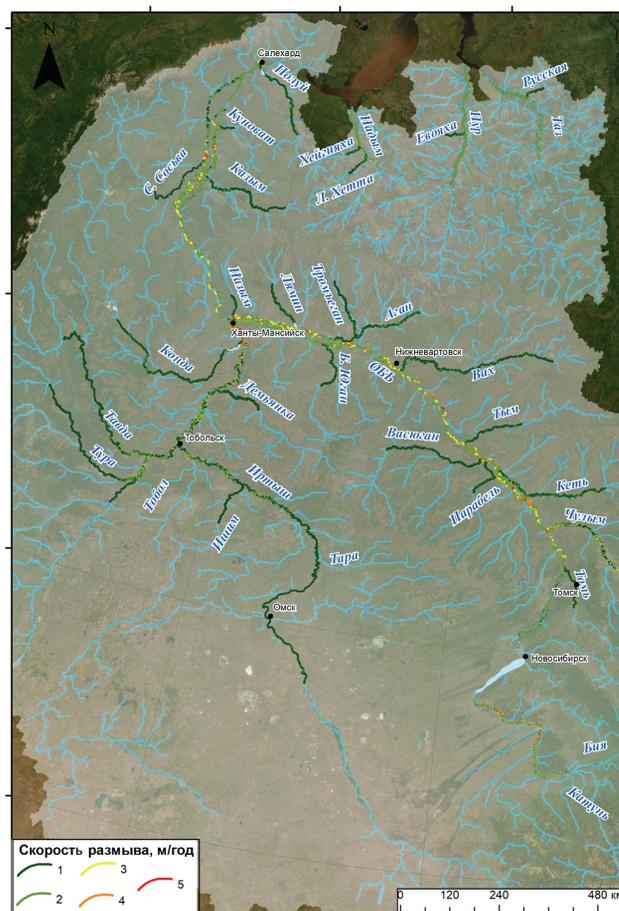


Рис. Распространение размываемых берегов и скоростей их размыва на реках Западной Сибири: 1 – <1 м/год, 2 – 1–3 м/год, 3 – 3–5 м/год, 4 – 5–7 м/год, 5 – >7 м/год

Fig. Location of eroded banks and their erosion rates on the rivers of Western Siberia: 1 – <1 m/year; 2 – 1–3 m/year; 3 – 3–5 m/year; 4 – 5–7 m/year; 5 – >7 m/year

На Оби от устья р. Томи до г. Салехарда при росте вниз по течению водоносности реки направленного тренда на увеличение интенсивности отступления берегов в этом же направлении не прослеживается; наоборот, можно говорить о снижении максимальных значений, особенно на нижней Оби. Это связано с рассредоточением стока воды по рукавам сначала пойменно-русловых разветвлений и пойменным протокам (от г. Колпашево до устья Ваха), а затем раздвоенного русла, пойменным протокам (ответвлениям) и по расширяющейся пойме при ее глубоком и длительном затоплении в половодье, на фоне постоянных изменений морфодинамического типа русла. Влияние коренных берегов почти не сказывается на средней Оби из-за локальности их подходов к реке и практически постоянно проявляется на всем протяжении нижней Оби, в т. ч. для правого рукава раздвоенного русла (Горной и Большой Оби) [Куракова, 2022]. На участке Оби от слияния Бии и Катунь до

устья р. Томи, наблюдается следующая картина. До Новосибирского гидроузла средние скорости размыва берегов Оби одни из самых высоких (табл. 1) ввиду того, что русло на данном участке является неустойчивым ($L = 1,5-2,0$), сопровождаясь активными перестройками русла. Ниже водохранилища скорости размыва падают практически в два раза

для средних значений и более чем в три раза для максимальных. Это объясняется тем, что после строительства и заполнения водохранилища горизонтальные русловые деформации со временем начали затухать, а наличие скальных выступов, которые широко распространены на данном участке, препятствуют активным размывам берегов.

Таблица 1

Характеристики размыва берегов на Оби (1960–2020-е) и Иртыше (1980–2020-е)

Участок	C_{cp} , м/год	$C_{макс}$, м/год
<i>Обь</i>		
Слияние Бии и Катунь – Новосибирский гидроузел	3,3	26,1
Новосибирский гидроузел – устье р. Томи	1,8	7,1
Устье р. Томи – устье р. Ваха	3,1	26,6
Устье р. Ваха – устье р. Иртыша	2,1	17,6
Устье р. Иртыша – разделение на Малую и Горную Обь (с. Перегребное)	2,3	16,6
Раздвоенное русло нижней Оби	2,0	10,7
Слияние Малой и Большой Оби – г. Салехард	1,8	7,4
<i>Иртыш</i>		
Государственная граница – г. Омск	1,7	5,1
Г. Омск – устье р. Тары	2,2	8,0
Устье р. Тары – 850 км	2,0	9,2
850 км – устье р. Тобола	2,3	8,4
Устье р. Тобола – устье р. Демьянки	1,3	11,9
Устье р. Демьянки – устье р. Конды	1,9	13,0
Устье р. Конды – слияние Иртыша и Оби	5,5	17,2

Для Иртыша (от устья Тары до слияния Иртыша с Обью) наблюдается постепенное увеличение темпов отступления берегов вниз к устью, что коррелирует с увеличением водоносности реки, а также постепенным расширением дна долины и уменьшением влияния коренных берегов в том же направлении [Куракова, 2022]. Выше устья р. Тары скорости размыва берегов несколько снижены: от государственной границы до г. Омска – в пределах лесостепи – средняя скорость отступления берегов Иртыша составляет 1,7 м/год, что объясняется, с одной стороны, влиянием коренных берегов на условия развития русла, вблизи или вдоль которых оно располагается, с другой стороны, до Омска р. Иртыш не принимает ни одного крупного притока, обуславливая слабое нарастание водоносности вниз по течению, а также на данном участке прослеживается влияние каскада ГЭС, сооруженных на реке в пределах Казахстана, которое проявляется в снижении уровней воды. Ниже г. Омска интенсивность горизонтальных русловых деформаций несколько возрастает

и проявляется на том же уровне, что и ниже по течению до устья Тобола. Это объясняется таким же разнообразием условий формирования русла, что и на всем субширотном участке среднего Иртыша: колебанием ширины поймы (от 4 до более чем 20 км), периодическим подходом русла реки на некоторых участках к коренным берегам, ограничивающим проявления размывов берегов, а также постепенным нарастанием водоносности за счет впадения притоков и в целом сменой лесостепной зоны на лесную.

Обь и Иртыш, являющиеся полизональными, характеризуются широкими диапазонами скоростей размыва берегов ввиду того, что наравне с изменяющимися физико-географическими условиями формирования стока по длине рек большее значение имеет возрастающая роль местных факторов, таких как рассредоточение стока в рукавах разветвлений, влияние коренных берегов, распространение типов русла и морфологически однородных участков, параметры их форм и т. д.

Таблица 2

Характеристики размыва берегов на реках Западной Сибири (1980–2020-е)

Река	Границы рассматриваемого участка, км	С, м/год	
		Средняя	Максимальная
Томь	120–0	2,4	6,5
Чулым	400–0	3,3	12,7
Кеть	556–0	1,9	6,2
Тым	311–0	2,3	5,3
Вах	771–0	1,6	3,8
Тромъеган	389–0	1,6	5,9
Аган	373–0	1,7	8,9
Лямин	277–0	1,3	2,4
Назым	91–0	1,3	3,7
Казым	444–0	1,7	4,9
Куноват	49–0	1,6	3,9
Полуй	397–0	1,4	3,1
Конда	735–0	1,7	5,2
Северная Сосьва	153–0	2,3	6,8
Надым	208–0	1,5	4,1
Хейгияха	89–0	1,5	4,6
Левая Хетга	88–0	1,6	5,0
Пур	395–0	1,7	7,3
Евояха	96–0	1,6	6,3
Таз	405–0	1,5	4,6
Русская	104–0	1,7	4,3
Парабель	246–0	1,2	2,1
Васюган	470–0	2,1	4,4
Большой Юган	294–0	1,5	3,4
Демьянка	311–0	1,4	3,3
Ишим	224–0	1,0	1,1
Тобол	434–0	1,9	6,8
Тура	659–0	2,0	6
Тавда	730–0	2,2	7,1

Для средних и больших рек Западной Сибири скорости размыва берегов изменяются преимущественно в диапазоне от 1 до 3 м/год (см. рис., табл. 2). Наиболее активные горизонтальные русловые деформации наблюдаются на Томи и Чулыме: их берега в среднем размываются со скоростями 2,4 и 3,3 м/год (максимальные – до 6,5 и 12,7 м/год соответственно). По правобережью Оби с юго-восточного в северо-западном направлении, включающем бассейны рек Кеть, Тым, Вах, Тромъеган и Аган, Лямин, Назым и Казым, скорость размыва берегов снижается. На них средняя скорость размыва берегов колеблется от 1,5 до 1,9 м/год (исключение – Тым, где средняя скорость несколько

выше – 2,3 м/год). Максимальные размывы берегов изменяются в широком диапазоне – 2,4–8,9 м/год. На северных реках, таких как Надым, Пур, Таз и их притоки, Северная Сосьва, Полуй и Куноват, а также Конда, интенсивность отступления берегов составляет не более 2 м/год, кроме Северной Сосьвы, у которой средняя скорость размыва берегов 2,3 м/год. Максимальная скорость размыва берегов данных рек в основном не превышает 5 м/год; только на Пуре и его притоке Евояха, а также на Северной Сосьве скорость размыва выше и составляет 6–7 м/год. На западе региона, где расположены бассейны Туры и Тавды, зафиксированы скорости размыва берегов около 2 м/год

(среднее значение) и 6–7 м/год (максимальное). Интенсивность горизонтальных русловых деформаций в Обь-Иртышском междуречье (рр. Парабель, Васюган, Большой Юган и Демьянка) и на юго-западной части региона (рр. Тобол и Ишим) характеризуется скоростью до 1,5 м/год, только на Тоболе и Васюгане она несколько выше – около 2 м/год.

В целом для средних и больших рек Западной Сибири отмечается снижение скорости размыва берегов с запада и юго-востока рассматриваемой территории к северу и Обь-Иртышскому междуречью. Это связано с общим увеличением в этих направлениях естественной зарегулированности стока болотами и озерами, появлением вечной мерзлоты в северных районах, а также изменением внутригодового распределения стока (источника и сезона) ввиду смены режима температуры, осадков и изменения гидрогеологического строения территории.

ВЫВОДЫ

Реки и приречные территории играют ключевую роль в жизни и хозяйственной деятельности человека. Однако их активное использование может приводить к нарушению природных процес-

сов и возникновению опасных явлений. Современные методы обработки космических снимков и использования ГИС-технологий позволяют детально анализировать и количественно оценивать процессы размыва берегов рек, а также получать большие объемы данных и проводить статистически значимый анализ. Проведенное исследование показывает, что размывы берегов на реках Западной Сибири варьируют в зависимости от размера реки, ее географического расположения и условий формирования стока воды и русла. Для русел крупнейших рек, таких как Обь и Иртыш, характерны сложные динамические процессы, зависящие от множества факторов, включая водоносность, влияние коренных берегов, распределение стока по рукавам и тип русла. Для остальных равнинных рек Западной Сибири наблюдаются значительные изменения скоростей размыва в зависимости от их географических и гидрологических особенностей. Важно учитывать все эти различия при планировании и управлении водными ресурсами, чтобы минимизировать негативные последствия опасных русловых процессов и сохранить природные экосистемы рек и их пойм.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 23-17-00065 – обобщение данных по размывам берегов на реках Обь-Иртышского бассейна в пределах лесной зоны, № 23-77-01006 – новые данные и общий анализ размывов берегов на равнинных реках Западной Сибири).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вершинин Д.А., Земцов В.А., Инешева Н.Г. и др. Проблемы русловых процессов рек Западной Сибири и результаты исследования в этой области // Тридцать третье пленар. межвуз. совещ. по пробл. эрозионных, русловых и устьевых процессов. 2018. С. 30–38.
- Завадский А.С., Чалов С.Р., Чернов А.В. и др. Морфодинамика русел и баланс наносов рек бассейна Селенги (Монголия – Россия) // Эрозия почв и русловые процессы. 2019. Т. 21. С. 149–170.
- Коркин С.Е., Исыпов В.А. Анализ горизонтальных русловых деформаций средней Оби на основе стационарных наблюдений // Геоморфология и палеогеография. 2022. Т. 53. № 4. С. 85–97. DOI: 10.31857/S043542812204006X.
- Куракова А.А. Гидролого-морфодинамический анализ русел и опасные проявления русловых процессов на равнинных реках Обь-Иртышского бассейна (лесная зона): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2022. 95 с.
- Куракова А.А., Чалов С.Р. Морфология русла и размывы берегов нижней Оби (в пределах ХМАО – Югры) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 6. С. 41–50.
- Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Завадский А.С., Куракова А.А. Условия формирования и особенности морфодинамики разветвленного русла среднего Иртыша // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 4. С. 119–132. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.10.
- Чалов Р.С., Плескевич Е.М., Баула В.А. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
- Чалов С.Р., Чалова А.С., Школьный Д.И. Количественная оценка плановых реформирований реки Камчатки // Известия РАН. Серия геогр. 2021. Т. 85. № 2. С. 218–230. DOI: 10.31857/S2587556621020035.
- Школьный Д.И. Оценка характерных скоростей отступления берегов рек России по данным спутникового мониторинга // Маккавеевские чтения – 2020. М., 2020. С. 71–83.
- Baki A.B.M., Gan T.Y. Riverbank migration and island dynamics of the braided Jamuna River of the Ganges – Brahmaputra basin using multi-temporal Landsat images, *Quaternary International*, 2012, vol. 263, p. 148–161, DOI: 10.1016/j.quaint.2012.03.016.
- Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers, *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, no. 1, p. 7–21, DOI: 10.1038/s41561-018-0262-x.
- Brunier G., Anthony E.J., Goichot M. et al. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation, *Geomorpho-*

- logy, 2014, vol. 224, p. 177–191, DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.009.
- Chadwick A.J., Greenberg E., Ganti V. Remote Sensing of Riverbank Migration Using Particle Image Velocimetry, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, vol. 128, no. 7, DOI: 10.1029/2023JF007177.
- Dey A., Bhattacharya R.K. Monitoring of River Center Line and Width – A Study on River Brahmaputra, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014, vol. 42, no. 2, p. 475–482, DOI: 10.1007/s12524–013–0277–0.
- Greenberg E., Chadwick A.J., Ganti V. A Generalized Area-Based Framework to Quantify River Mobility From Remotely Sensed Imagery, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, vol. 128, no. 9, DOI: 10.1029/2023JF007189.
- Hang N.T.T., Nga T.N.Q., Thi K.T. et al. Spatial and temporal morphological changes in the lower Mekong River under the influence of sediment load reduction in the upstream, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, vol. 1170, no. 1, p. 012028, DOI: 10.1088/1755-1315/1170/1/012028.
- Langhorst T., Pavelsky T. Global Observations of Riverbank Erosion and Accretion From Landsat Imagery, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, vol. 128, no. 2, DOI: 10.1029/2022JF006774.
- Mason J., Mohrig D. Differential bank migration and the maintenance of channel width in meandering river bends, *Geology*, 2019, vol. 47, no. 12, p. 1136–1140, DOI: 10.1130/G46651.1.
- Rowland J.C., Shelef E., Pope P.A. et al. A morphology independent methodology for quantifying planview river change and characteristics from remotely sensed imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 184, p. 212–228, DOI: 10.1016/J.RSE.2016.07.005.
- Sylvester Z., Durkin P., Covault J.A. High curvatures drive river meandering, *Geology*, 2019, vol. 47, no. 3, p. 263–266, DOI: 10.1130/G45608.1.

Поступила в редакцию 21.01.2025

После доработки 13.03.2025

Принята к публикации 20.05.2025

STREAM-BANK EROSION ON THE RIVERS OF WESTERN SIBERIA

A.A. Kurakova¹, E.D. Pavlyukevich², D.V. Bolshakov³

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes

² Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Regional Hydrology

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Geochemistry of Natural Waters

¹ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

² Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

³ Junior Scientific Researcher; e-mail: bolshakovdv@my.msu.ru

In recent decades, climate change and human activities increasingly impact rivers, which could provoke or enhance the dangerous riverbed processes, e.g. riverbank erosion. The availability of satellite images with global coverage provides ample opportunities for the study of horizontal channel deformations and their quantitative assessment. This became the basis for an active development of remote sensing methods that could be widely used for all the variety of river sizes and their channel types. The article deals with the general analysis of dangerous fluvial processes (riverbank erosion) on the lowland rivers of Western Siberia using modern methods of their investigation. Satellite images of CORONA, Landsat and Sentinel were used for the analysis, which make it possible to detail changes in banks with high accuracy by applying both traditional (manual) and semi-automated GIS tools-based methods of image interpretation and digitizing. The results showed that the rate of stream-bank erosion varies depending on the natural conditions of riverbed formation, the hydrological conditions and the river size. The rate of stream-bank erosion on the Ob and Irtysh rivers varies primarily due to the local factors, such as the dispersion of runoff in the branches, the influence of indigenous banks, the spread of channel types and morphologically homogeneous areas, the parameters of their shapes, etc. The highest erosion rates (2–3 m/year or more) among the large and medium-size rivers were recorded for the Tom and Chulym rivers. But in general, the rivers of Western Siberia are characterized by relatively low stream-bank erosion rates, which is due to the natural features of the region.

Keywords: fluvial processes, river channel migration, stream-bank erosion, remote sensing methods, GIS, Western Siberia

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (no. 23-17-00065 for the data of riverbank erosion on rivers in the forest zone of the Ob-Irtysh basin, no. 23-77-01006 for the new data and a general analysis of riverbank erosion for the lowland rivers of Western Siberia).

REFERENCES

- Baki A.B.M., Gan T.Y. Riverbank migration and island dynamics of the braided Jamuna River of the Ganges – Brahmaputra basin using multi-temporal Landsat images, *Quaternary International*, 2012, vol. 263, p. 148–161, DOI: 10.1016/j.quaint.2012.03.016.
- Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers, *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, no. 1, p. 7–21, DOI: 10.1038/s41561-018-0262-x.
- Brunier G., Anthony E.J., Goichot M. et al. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation, *Geomorphology*, 2014, vol. 224, p. 177–191, DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.009.
- Chadwick A.J., Greenberg E., Ganti V. Remote Sensing of Riverbank Migration Using Particle Image Velocimetry, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, vol. 128, no. 7, DOI: 10.1029/2023JF007177.
- Chalov R.S., Pleskevich E.M., Baula V.A. *Ruslovye processy i vodnye puti na rekah Obskogo bassejna* [Fluvial processes and waterways on the rivers of the Ob basin], Novosibirsk, RIPEL plyus Publ., 2001, 300 p. (In Russian)
- Chalov S.R., Chalova A.S. Shkol'nyi D.I. Kolichestvennaya ocenka planovykh pereformirovanij reki Kamchatki [Quantitative assessment of planform changes of the Kamchatka river], *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2021, vol. 85(2), p. 218–230. (In Russian)
- Dey A., Bhattacharya R.K. Monitoring of River Center Line and Width – A Study on River Brahmaputra, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014, vol. 42, no. 2, p. 475–482, DOI: 10.1007/s12524-013-0277-0.
- Greenberg E., Chadwick A.J., Ganti V. A Generalized Area-Based Framework to Quantify River Mobility From Remotely Sensed Imagery, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, vol. 128(9), DOI: 10.1029/2023JF007189.
- Hang N.T.T., Nga T.N.Q., Thi K.T. et al. Spatial and temporal morphological changes in the lower Mekong River under the influence of sediment load reduction in the upstream, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, vol. 1170(1), p. 012028, DOI: 10.1088/1755-1315/1170/1/012028.
- Korkin S.E., Isypov V.A. Analiz gorizonta'nyh ruslovyh deformatsij srednej Obi na osnove stacionarnyh nablyudenij [Analysis of horizontal channel deformations of the middle Ob on the basis of stationary observations], *Geomorfologiya i paleogeografiya*, 2022, vol. 53(4), p. 85–97, DOI: 10.31857/S043542812204006X. (In Russian)
- Kurakova A.A. *Gidrologo-morfodinamicheskii analiz rusel i opasnye proyavleniya ruslovykh protsessov na ravninnykh rekakh Ob'-Irtyskogo basseina (lesnaya zona)* [Hydrological and morphodynamic analysis of riverbeds and dangerous fluvial processes on lowland rivers of the Ob-Irtys basin (forest zone)], Ph.D. thesis in Geography, Moscow, 2022, 249 p. (In Russian)
- Langhorst T., Pavelsky T. Global Observations of Riverbank Erosion and Accretion From Landsat Imagery, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, vol. 128(2), DOI: 10.1029/2022JF006774.
- Mason J., Mohrig D. Differential bank migration and the maintenance of channel width in meandering river bends, *Geology*, 2019, vol. 47(12), p. 1136–1140, DOI: 10.1130/G46651.1.
- Rowland J.C., Shelef E., Pope P.A. et al. A morphology independent methodology for quantifying planview river change and characteristics from remotely sensed imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 184, p. 212–228, DOI: 10.1016/J.RSE.2016.07.005.
- Shkol'nyi D.I. [Assessment of the erosion rates of Russian river banks according to satellite monitoring data], *Makkaveevskie chteniya – 2020* [Readings from Makkaveev – 2020], 2020, p. 71–83. (In Russian)
- Sylvester Z., Durkin P., Covault J.A. High curvatures drive river meandering, *Geology*, 2019, vol. 47(3), p. 263–266, DOI: 10.1130/G45608.1.
- Vershinin D.A., Zemtsov V.A., Inesheva N.G. et al. [Problems of riverbed processes in Western Siberia and the results of research in this area], *Tridcat' tret'e plenar. mezhvuz. soveshch. po probl. erozionnyh, ruslovyh i ust'evykh processov* [33rd meeting on erosion, channel and river mouth processes], 2018, p. 30–38. (In Russian)
- Zavadskii A.S., Chalov S., Chernov A.V. et al. Morfodinamika rusel i balans nanosov rek bassejna Selengi (Mongoliya – Rossiya) [Morphodynamics of riverbeds and sediment balance of rivers of the Selenga basin (Mongolia – Russia)], *Eroziya pochv i ruslovye processy*, 2019, vol. 21, p. 149–170. (In Russian)

Received 21.01.2025

Revised 13.03.2025

Accepted 20.05.2025