

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.512

ИНТЕНСИВНОСТЬ БАСЕЙНОВОЙ И РУСЛОВОЙ ЭРОЗИИ В ЛЕСОСТЕПНЫХ ЛАНДШАФТАХ БАСЕЙНА ЕНИСЕЯ

© 2026 г. И. А. Голубев^{1,*}, В. А. Иванов^{2,**}, А. С. Чалова^{2,***}, С. Р. Чалов^{2,****}

¹Филиал ПАО «Россети Сибирь» — «Красноярскэнерго», Красноярск, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: igorgol1984@bk.ru

**e-mail: viktoro.1998@yandex.ru

***e-mail: aleksandra-1984@mail.ru

****e-mail: hydroserg@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2024 г.

После доработки 24.11.2025 г.

Принята к публикации 23.12.2025 г.

Исследования бассейновой и русловой составляющих стока наносов, определение величин привноса продуктов смыва от талых и ливневых вод в русловую сеть водосборов — актуальная тема географических исследований. Выполнена количественная оценка величин стока наносов, интенсивности годовой эрозии, суммарных объемов бассейновой и русловой составляющих и их соотношения рр. Кача, Нижняя Подъемная, Кан, Большая Уря, Туба и Абакан Красноярского, Канского и Южно-Минусинского островных лесостепных районов бассейна Енисея. Различия в площади пахотных земель, в степени распашки и интенсивности эрозии между лесостепными районами определяют значительную разницу в среднегодовых объемах бассейновой эрозии — от 0.5 до 43.3 Мт/год по бассейнам исследуемых рек. Коэффициент доставки наносов в русла рек варьирует от 0.12 до 5.19%, максимальная величина установлена для Южно-Минусинской лесостепи. Вклад наносов руслового происхождения увеличивается в южном направлении. Интегральная оценка бассейновой и русловой эрозии показывает, что величина суммарного поступления продуктов смыва со всей лесостепной зоны в эрозионно-русловую сеть Енисея составляет 26.62 Мт/год, что сопоставимо со стоком наносов Енисея в нижнем течении и, таким образом, свидетельствует о важнейшей роли эрозионных и русловых процессов лесостепной зоны в формировании стока наносов крупнейшей реки России.

Ключевые слова: эрозионно-русловая сеть, сток наносов, бассейновая и русловая составляющие стока наносов, коэффициент доставки наносов

DOI: 10.7868/S2658697526020062

ВВЕДЕНИЕ

Почвенная и овражная эрозия, русловые деформации — основные процессы формирования стока речных наносов, роль которых трансформируется под воздействием гидроклиматических изменений и антропогенных воздействий (Дедков, Мозжерин, 1984; Vercruysse et al., 2017). Их изучение является основой для обоснования инженерных мероприятий в руслах рек, определения объемов поступления взвешенного вещества в водохранилища, решения других прикладных задач.

Соотношение бассейновых и русловых источников в формировании стока наносов до настоящего времени рассматривалось преимущественно косвенными методами, что определяет большую неопределенность этих данных (Алексеевский, 1998; Гусаров, 2015). Оценки фактических объемов наносов руслового происхождения выполнены лишь для отдельных, в основном крупных рек, в том числе Енисея (Chalov and Ivanov, 2023) на основе геоинформационных баз данных и спутниковых технологий. При этом в целом в Сибири вопросы эрозии и по-

ступления наносов в реки изучены значительно слабее, чем на Европейской территории России. Исследования эрозионно-аккумулятивных процессов выполнялись на территории Западной Сибири (Евсеева, 2009; Орлов, 1983; Танасиенко, 2003) и Восточной Сибири (Баженова, 2018; Пространственно-временной ..., 1997). Однако на территории Восточной Сибири и в южных районах лесостепи и степи Средней Сибири значительная часть исследований была посвящена преимущественно процессам денудации на задернованных поверхностях, а также овражной эрозии (Пространственно-временной ..., 1997; Kozhuhovsky et al., 2015). Отдельные работы выполнены для территории Красноярского края с применением опытных экспериментальных данных (Бадмаева, 2018; Голубев, 2009, 2022; Хныкина, 2018). Эти исследования проведены в лесостепной зоне в условиях расчлененного рельефа, резко континентального климата, суровых продолжительных зим и сезонно-мерзлотного режима почв, которые определяют местные особенности эрозионно-аккумулятивных процессов и стока наносов. Ценность сбора подобных данных, осуществляемое в настоящее время в России исключительно локально, а в Сибири — вообще однократно, обуславливает актуальность проведения настоящего исследования.

Наличие описанных выше исследований, данных о количестве смытого материала от талой и дождевой эрозии и соотношений между ними, отдельных локальных оценок среднегодовых значений эрозии, смыва на обрабатываемых землях и задернованных поверхностях (Баженова, 2018; Голубев, 2009, 2021, 2022; Пространственно-временной ..., 1997; Хныкина, 2018), а также данных с постов УГМС о расходе взвешенных наносов, позволяет *впервые для данного региона провести оценку вклада различных источников формирования стока наносов.*

Цель настоящей работы — определение среднегодовой величины привноса продуктов бассейновой (дождевой и талой) и русловой эрозии в реки верхнего и среднего течения р. Енисей с ландшафтов лесостепной зоны Приенисейской Сибири. Задачи работы — оценка условий развития эрозионных процессов в пределах исследуемой территории; определение коэффициентов доставки наносов и объемов поступления наносов в реки от различных источников и их соотношения; оценка территориальных отличий отдельных лесостепных районов в формировании стока наносов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

К объекту исследований относится лесостепная зона Приенисейской Сибири в пределах бассейна р. Енисей, представленная Красноярской, Канской и Южно-Минусинской островными лесостепными районами. На их территории выбраны шесть репрезентативных рек — рр. Кача и Нижняя Подъёмная в Красноярской лесостепи, рр. Кан и Большая Уря в Канской и рр. Туба и Абакан в Южно-Минусинской. Выбор обусловлен наличием гидропостов с измерениями стока взвешенных наносов и расположением значительной части русел в указанных лесостепных районах. Исходя из классификации рек в зависимости от площади водосбора (ГОСТ Р 59054-2020), рр. Кан, Туба и Абакан относятся к средним, рр. Нижняя Подъёмная, Большая Уря и Кача — к малым.

Лесостепь Приенисейской Сибири (Красноярский край) имеет островной характер и представлена отдельными лесостепными районами (рис. 1), которые различаются по природным условиям и располагаются в шести природных районах, три из которых в пределах бассейна р. Енисей, и являются объектами данного исследования: Канский, Красноярский и Южно-Минусинский районы (рис. 2). Остальные районы — Ачинско-Боготольский, Назаровский и Чулымо-Енисейский — относятся к бассейну р. Оби (Природные ..., 1961).

Рельеф всех трех лесостепных районов представляет собой расчлененную холмисто-увалистую и широкоувалистую равнину. Почвенный покров характеризуется преобладанием чернозёмов обыкновенных, также присутствуют серые лесные почвы с преобладанием темно-серых. Гранулометрический состав почвенного покрова в Южно-Минусинской лесостепи преимущественно легко- и среднесуглинистый, в Канской и Красноярской — тяжелосуглинистый и глинистый (Система ..., 2015). Климат резко континентальный. В Канской лесостепи сумма годовых осадков составляет 359–452 мм, среднегодовое количество воды в снеге 46–89 мм; в Красноярской лесостепи — 373–426 мм и 58–104 мм, в Южно-Минусинской — 332–351 мм и 51 мм соответственно (Бураков, 2009; Топтыгин и др., 2002). Отмечается повышение общего увлажнения территории Приенисейской Сибири по направлению с юга на север: например, в Чулымо-Енисейском природном округе годовые осадки составляет в среднем 364 мм, снегозапасы 50%-й обеспеченности — 46 мм (ст. Светлолобово), для Красноярской лесостепи эти значения в среднем составляют 400 и 81 мм соответственно.

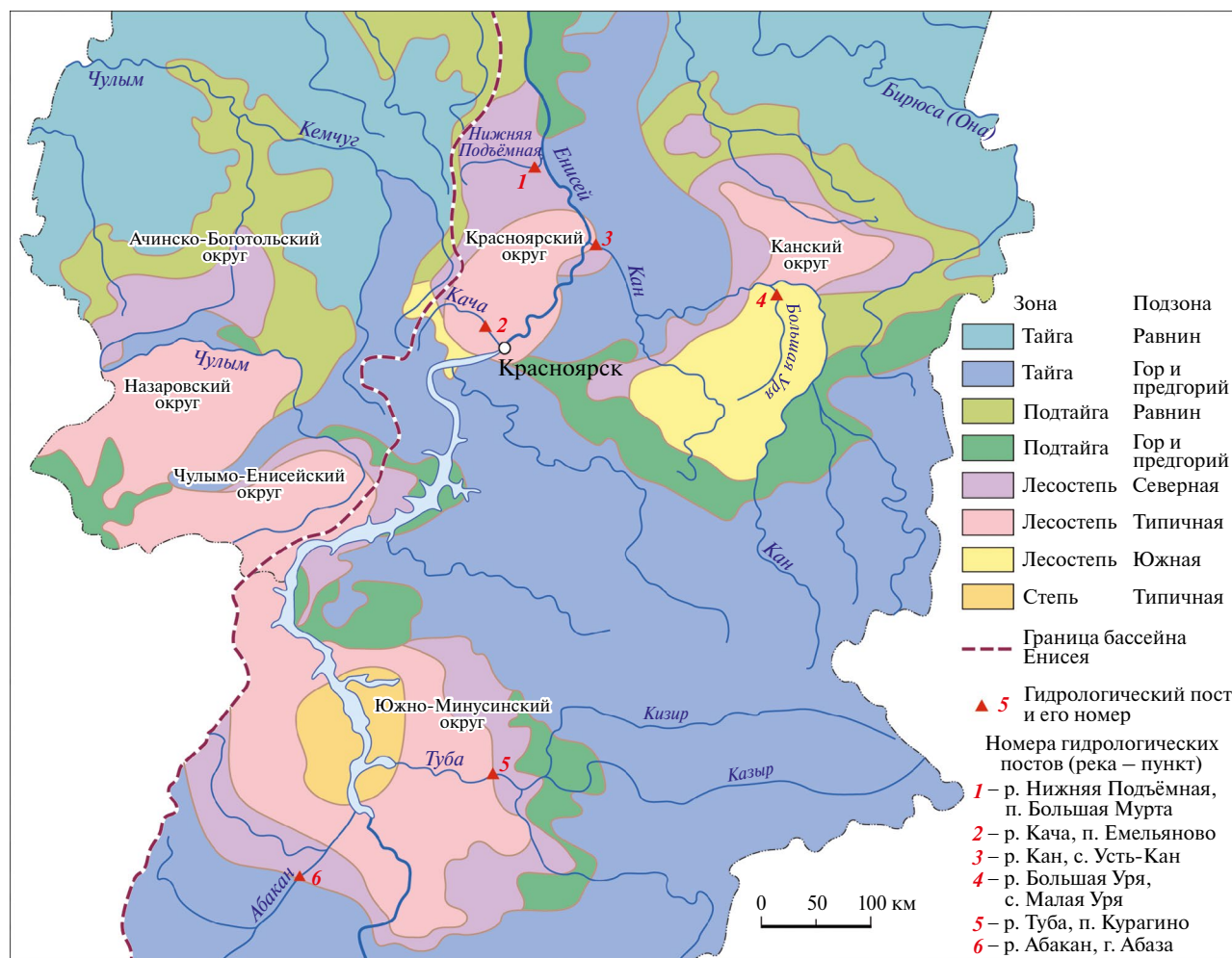


Рис. 1. Природное районирование южных районов Красноярского края.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные Среднесибирского УГМС по расходам воды и мутности рр. Кача, Нижняя Подъёмная, Большая Уря, Кан, Туба, Абакан, Оя и Сыда за период 2001–2018 гг., результаты ранее выполненных натурных наблюдений за процессами смыва и аккумуляции на распаханых склонах водосборов (Бадмаева, 2018; Голубев, 2022, 2023), данные по площади пахотных земель, состоянию агрофона и степени распаханности земель природных округов Красноярского края (Система ..., 2015; Халицкий, Коханьска, 2015; Чупрова, 2018).

Анализ и расчеты производились в четыре основных этапа.

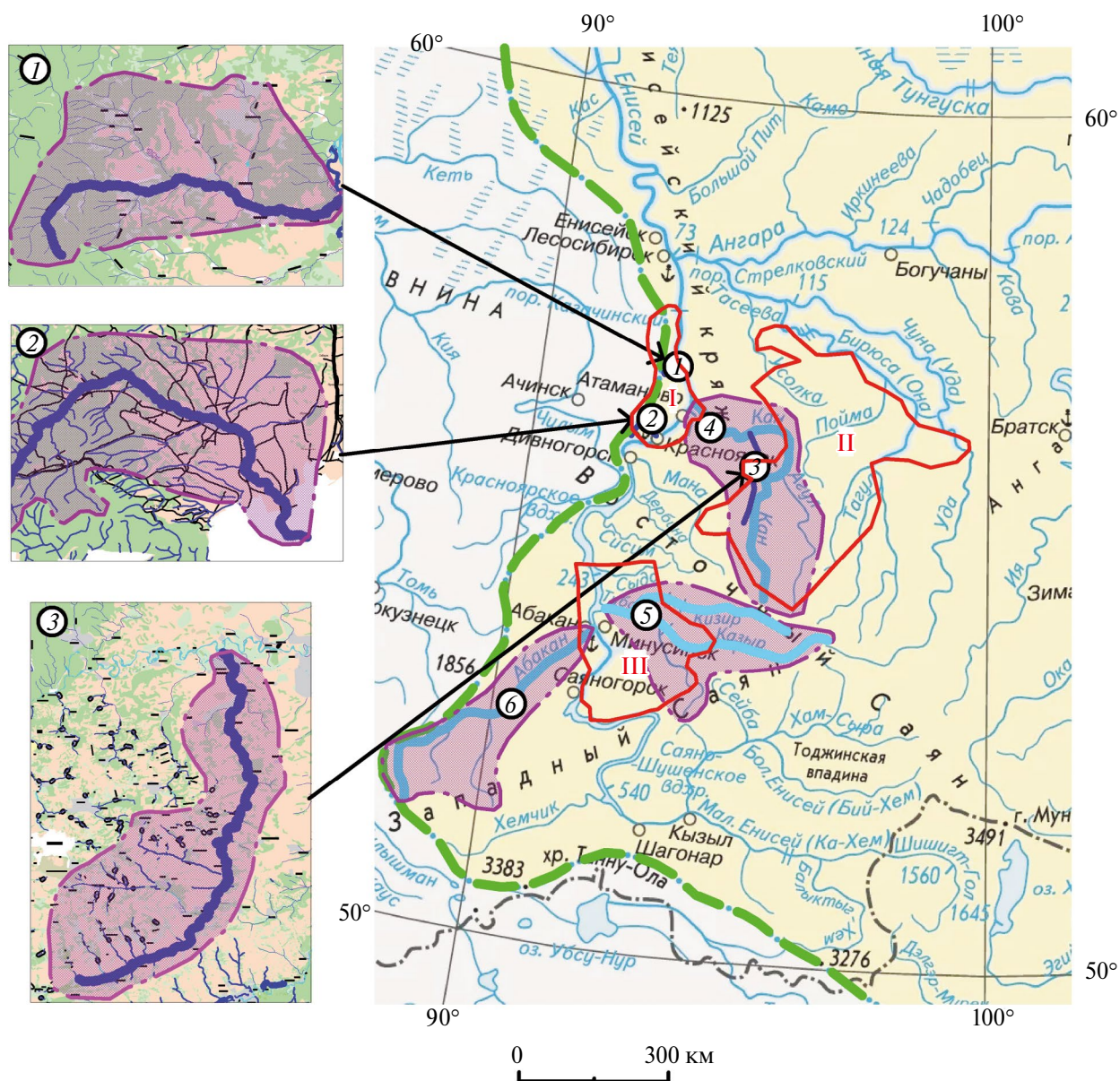
На первом этапе определялись количественные характеристики бассейновой эрозии на пашне водосборов выбранных репрезентативных рек. Первым шагом стал расчет средней интенсивности годовой эрозии:

$$\mathcal{E}_n = \mathcal{E}_t + \mathcal{E}_d, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_n$ – средняя интенсивность годовой эрозии на пашне т/га в год; $\mathcal{E}_t$ – средняя интенсивность

смыва от талых вод, т/га за период снеготаяния; $\mathcal{E}_d$ – средняя интенсивность смыва от ливневых дождей, т/га за летне-осенний период.

Для расчета годовой бассейновой эрозии использованы результаты экспериментальных исследований талой эрозии с использованием методов обмера водороев (метод С.С. Соболева) и конусов выноса в Красноярской лесостепи (Голубев, 2021, 2022) и исследований талого и дождевого смыва методом микролотков в Чулымо-Енисейской лесостепи (Бадмаева, 2018; Голубев, 2009) в период с 2009 по 2017 г. В Красноярской лесостепи для определения усредненной величины интенсивности дождевого смыва и далее годовой бассейновой эрозии использованы результаты измерений массы смываемых почвенных частиц в весенний и летний периоды с помощью метода микролотков 2008 г. (Голубев, 2009). Данный год характеризовался величинами годовых осадков, максимально близкими к среднемноголетним – 378 мм (обеспеченность 49.3%). Результаты этих измерений показали, что в структуре годовой эрозии количественные характеристики талого



Площади водосборов



Малые реки



Граница бассейна р. Енисей

Номера рек
и их водосборов

Средние реки



Границы лесостепных районов

Репрезентативные реки и их водосборы

1 – р. Нижняя Подъёмная 2 – р. Кача 3 – р. Большая Уря 4 – р. Кан 5 – р. Туба 6 – р. Абакан

Лесостепные районы

I – Красноярская лесостепь II – Канская лесостепь III – Южно-Минусинская лесостепь

Рис. 2. Местоположение водосборов исследуемых рек.

и ливневого смыва в целом сопоставимы между собой, — доля эрозии от талых вод составляет 47.1%, от ливневых — 52.9%. Данное соотношение в целом подтверждается сравнением максимальных снегозапасов (первая декада марта) и суммой осадков за летний период (май–август) по данным ближайшей метеостанции Сухобузимское — 110 и 137 мм соответственно. С учетом средней величины интенсивности талого смыва и полученного процентного соотношения талой и дождевой эрозии, с помощью пропорции определено усредненное значение дождевого смыва, затем по формуле (1) — средней интенсивности годовой эрозии. Верификация полученных данных проведена путем сравнения с результатами исследований поверхностного стока и годовой эрозии почв, выполненных в окрестностях г. Красноярск в 2018 г. (Хныкина, 2018).

Следующим шагом стал расчет величин средней интенсивности годовой эрозии для территории неизученных лесостепей. Для Чулымо-Енисейского и Красноярского лесостепных районов [по данным (Бадмаева, 2018; Хныкина, 2018)] установлена связь между фактическим смывом и годовыми значениями осадков ($\text{cor} = 0.85$, $R^2 = 0.72$):

$$y = 0.1264 \cdot x - 36.666, \quad (2)$$

где y — интенсивность эрозии, т/га в год, x — годовые осадки, мм. Расчет производился с помощью данной зависимости.

Далее определяли суммарное количество (масса) смытых почвенных частиц с территории

пахотных земель водосборов рассматриваемых рек. Формула имеет следующий вид:

$$W_{\text{п.общ}} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_{\text{п}_i} \cdot S_{\text{п}_i}, \quad (3)$$

где $W_{\text{п.общ}}$ — суммарная масса смытых с пашни водосбора частиц, т; $\mathcal{E}_{\text{п}_i}$ — средняя интенсивность годовой эрозии почв на пахотных угодьях i -го вида агрофона, т/га в год; $S_{\text{п}_i}$ — площадь пашни i -го вида агрофона на водосборе, га. Учитывались два основных вида агрофона на пашне речных водосборов — пар/зябь и стерня/сельхоз. культуры ($n = 2$).

На втором этапе расчетов производилось определение количественных характеристик русловой эрозии и стока наносов. Для рассматриваемых рек лесостепной зоны, где есть данные гидропостов по расходам воды за близкий к среднемноголетним значениям стока 2011 г. (обеспеченность 47–52%) и средних за 10–12 лет величин мутности (рис. 3), выполнен расчет величины суммарного годового стока наносов ($W_{\text{р.общ}}$). Расчеты производились за весенний и летне-осенний периоды, с усредненной их продолжительностью 15.04–31.05 и 01.06–15.10 соответственно.

Следующим шагом была оценка объема наносов, поступающих в русло в процессе размыва берегов. Для этого применялся ретроспективный подход, основанный на сравнении космических снимков, полученных в различные периоды времени. Расчет объемов русловых деформаций определяется как сумма всех объемов тел размыва на исследуемых участках речного русла:

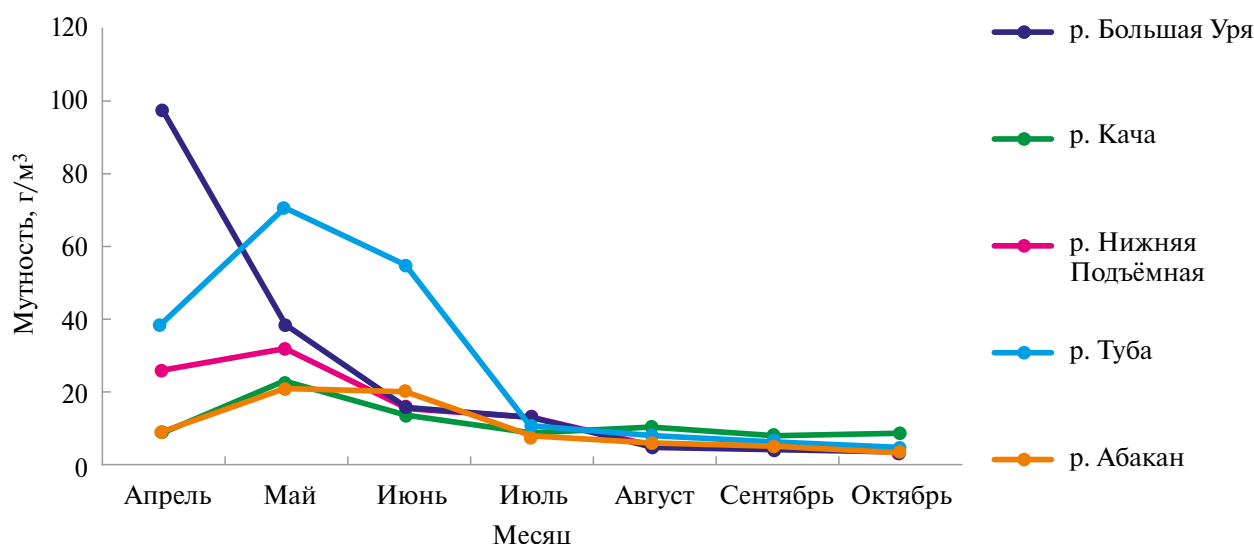


Рис. 3. Динамика внутригодовой мутности рр. Кача, Нижняя Подъёмная, Кан, Большая Уря, Туба и Абакан (усредненные данные за 2006–2018 гг.).

$$W_{\text{русл}} = \sum_{i=1}^n \frac{S_{\text{разм}_i} \cdot (h_{\text{б}_i} + h_{\text{р}_i}) \cdot \rho_{\text{отл}_i} \cdot a_i}{\Delta t}, \quad (4)$$

где $W_{\text{русл}}$ — объем русловых деформаций (русловая эрозия), т; $S_{\text{разм}_i}$ — площадь i -го размыва, м²; $\rho_{\text{отл}_i}$ — плотность отложений, кг/м³; $h_{\text{б}_i}$ — высота берега, м; $h_{\text{р}_i}$ — средняя глубина реки, м; a_i — льдистость отложений; Δt — временной интервал, год.

$$h_p = \left(\frac{Q \cdot n}{B \cdot \sqrt{I}} \right)^{\frac{3}{5}}, \quad (5)$$

где Q — среднегодовой расход воды, м³/с; n — коэффициент шероховатости; B — ширина реки, м; I — уклон реки.

Данная методика была применена для участков размывов, детектированных по GSWE на протяжении русел рр. Абакан (309 км), Кан (329 км), Туба (408 км). Площади размыва были установлены по базе данных GSWE (Chalov et al., 2017; Pekel et al., 2016) путем анализа разновременных снимков Landsat 5, 7, 8 (в этом исследовании 1993–2021 гг.). Оценка высоты берега для перехода от площадей размывов к объемам выполнена по цифровой модели рельефа ArcticDEM (Morin et al., 2016). Расчет средней глубины реки проводился по формуле Шези (5). Данные по ширине, уклону и расходам воды получены из баз данных GRWL (Allen and Pavelsky, 2018) и HydroATLAS (Linke et al., 2019). Оценка средней глубины реки выполнена с осреднением 500 м для всех исследуемых участков. Плотность русловых отложений принята константой для всех участков в 1500 кг/м³ (Караушев, 1977). Коэффициент шероховатости — 0.016 (Golovlyov et al., 2019).

На третьем этапе выполнен расчет значений коэффициентов доставки наносов в эрозионно-русловую сеть для водосборов исследуемых рек по классической схеме с учетом только бассейновой эрозии, а также при учете суммарного объема наносов бассейнового и руслового происхождения (Безухов и др., 2019; Иванов и др., 2017; Vigiak et al., 2012).

Общая формула для расчета коэффициента доставки наносов с площади всего водосбора реки имеет вид:

$$SDR = W_{\text{р.общ}} / W_{\text{п.общ}}, \quad (6)$$

где SDR — величина общего коэффициента доставки наносов для речного водосбора (в дальнейшем указываем в процентном выражении); $W_{\text{р.общ}}$ — суммарная годовая величина стока на-

носов, т; $W_{\text{п.общ}}$ — суммарная годовая масса смытых с пашни водосбора частиц, т.

С учетом русловой эрозии для расчета коэффициента доставки наносов формула будет иметь следующий вид:

$$SDR_0 = W_{\text{р.общ}} / (W_{\text{п.общ}} + W_{\text{русл}}), \quad (7)$$

где SDR_0 — величина коэффициента доставки с учетом русловой составляющей. Остальные обозначения прежние.

Важно отметить, что в формулах (6) и (7) остается неучтенной часть водосбора, представленная необрабатываемыми задернованными поверхностями, определение площадей которых для каждого отдельно взятого водосбора весьма затруднительно. Особую сложность представляет дифференциация площадей полевых задернованных участков от лесных массивов, эрозионные процессы на которых практически отсутствуют. Однако подавляющая часть смытого материала приходится именно на распаханые участки из-за значительной разницы в интенсивности эрозии. В связи с этим, неучтенная часть площади водосборов не оказывает существенного влияния на точность расчета величин SDR и SDR_0 .

На четвертом этапе определялись интегральные характеристики бассейновой и русловой эрозии для всей площади каждого из исследуемых лесостепных районов, а также рассчитан суммарный привнос продуктов смыва с их территории в эрозионно-русловую сеть (ЭРС) р. Енисей.

Вначале определена интегральная величина бассейновой эрозии на территории каждого лесостепного района, т.е. суммарная масса смытых почвенных частиц со всей его площади. Формула имеет следующий вид:

$$W_{\text{у.лр.сумм}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{у.лр}_i} \cdot \mathcal{E}_{\text{у.б}_i}, \quad (8)$$

где $W_{\text{у.лр.сумм}}$ — интегральная величина бассейновой эрозии со всей территории лесостепного района, т; $S_{\text{у.лр}_i}$ — площадь i -го вида угодий в лесостепном районе, га; $\mathcal{E}_{\text{у.б}_i}$ — средняя величина интенсивности годовой эрозии почв i -го вида угодий, т/га в год. В процессе расчета по формуле (8) учтены необрабатываемые задернованные поверхности (сенокосы, пастбища и залежи). Таким образом, суммарно учитываются три вида угодий — пар/зябь, стерня/сельскохозяйственные культуры и задернованные поверхности ($n = 3$); их площади учтены по данным (Система ..., 2015).

По результатам исследований Института географии СО РАН (Баженова, 2018), средняя интенсивность годового смыва на задернованных поверхностях в Южно-Минусинском природном округе (Койбальская степь) составляет от 0.02 до 0.44 мм/год (от 0.2 до 4.4 т/га в год). Для наших расчетов в Южно-Минусинской лесостепи принято среднее значение из данного диапазона, в двух других лесостепных районах данная величина получена по формуле (2).

Вторым шагом стало определение массы смытых частиц бассейновой эрозии, достигающих ЭРС с территории лесостепных районов. Формула имеет следующий вид:

$$W_{\text{басс.эрс}} = W_{\text{у.лр.сумм}} \cdot SDR_{\text{лр}}, \quad (9)$$

где $W_{\text{басс.эрс}}$ — среднее значение массы смытых частиц, ежегодно поступающих в ЭРС лесостепного района (величина привноса продуктов бассейновой эрозии), Мт; $W_{\text{у.лр.сумм}}$ — интегральная величина бассейновой эрозии со всей территории лесостепного района, Мт; $SDR_{\text{лр}}$ — среднее значение коэффициента доставки наносов для всего лесостепного района; за данную величину принимается среднее значение SDR_0 между двумя репрезентативными реками в каждой островной лесостепи.

Далее рассчитывались интегральные величины русловой эрозии для территории каждой исследуемой лесостепи. В первую очередь, определено соотношение долей площади водосборов средних и малых рек в пределах каждого лесостепного района. Анализ картографических материалов показал, что в Южно-Минусинской лесостепи на долю водосборов малых рек приходится примерно 65%, в Канской лесостепи — 50%, в Красноярской — 100% от общей площади лесостепного района. Изучение территориального расположения средних рек показывает, что в Красноярской лесостепи они отсутствуют, в Канской лесостепи — только р. Кан, территория бассейна которой занимает половину площади данного лесостепного района; в Южно-Минусинской лесостепи, кроме изучаемых рр. Туба и Абакан, присутствуют неизученные рр. Оя и Сыда.

На основе сопоставления данных о расходах воды по гидрологическим постам р. Кан — с. Усть-Кан, р. Абакан — г. Абаза, р. Туба — п. Курагино и результатов расчетов русловой эрозии для данных рек, установлена регрессионная зависимость ($R^2 = 0.94$):

$$y = 0.0074 \cdot x + 1.6586, \quad (10)$$

где y — средний объем русловой эрозии, Мт/год; x — норма среднегодового расхода воды,

м³/с. По данной зависимости определены величины русловой эрозии ($W_{\text{русл}}$) неизученных средних рек. Доля общей массы русловой эрозии в лесостепном районе, которая приходится на средние реки ($W_{\text{русл.ср}}$, т) рассчитывалась суммированием их значений $W_{\text{русл}}$ в пределах островных лесостепей.

Для малых рек с использованием картографических материалов, данных ежегодников Среднесибирского УГМС и общедоступной информации установлено соотношение средних величин русловой эрозии и усредненной площади их водосборов — 50000 т/год и 1253 км² соответственно. Исходя из данного соотношения, рассчитана общая величина русловой эрозии с площади лесостепного района, которая приходится на бассейны малых рек. Формула имеет следующий вид:

$$W_{\text{русл.мр}} = (F_{\text{мр}} \cdot 50000) / 125333, \quad (11)$$

где $W_{\text{русл.мр}}$ — доля общей массы русловой эрозии в лесостепном районе, которая приходится на малые реки, т; $F_{\text{мр}}$ — общая площадь всех бассейнов малых рек в лесостепном районе, га. Величины $F_{\text{мр}}$ устанавливались из вышеприведенного процентного соотношения площадей водосборов малых и средних рек.

Интегральные величины русловой эрозии для всей территории лесостепных районов получены суммированием полученных ее значений для малых и средних рек в пределах островных лесостепей:

$$W_{\text{русл.сумм}} = W_{\text{русл.мр}} + W_{\text{русл.ср}}, \quad (12)$$

где $W_{\text{русл.сумм}}$ — суммарное количество продуктов русловой эрозии с территории лесостепного района, Мт; остальные обозначения прежние.

Суммированием полученных интегральных величин русловой эрозии и части бассейновой, достигающей русел рек, определялась суммарная величина привноса продуктов смыва с лесостепных районов в ЭРС верхнего и среднего течения р. Енисей:

$$W_{\text{эрс}} = W_{\text{русл.сумм}} + W_{\text{басс.эрс}}, \quad (13)$$

где $W_{\text{эрс}}$ — суммарный сток наносов с территории лесостепного района, Мт.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Интенсивность годовой бассейновой эрозии. На основе материалов детальных полевых исследований эрозионно-аккумулятивных процес-

сов, а также вышеприведенного соотношения величин талой и дождевой эрозии определены средние значения интенсивности годовых величин бассейновой эрозии с учетом агрофона (Бураков, 2009; Голубев, 2022). Выполнен расчет (экстраполяция) для неизученной территории Канского и Южно-Минусинского лесостепных районов (табл. 1).

Условия развития бассейновой и русловой эрозии. Для расчета среднегодовой массы смытых частиц в процессе бассейновой эрозии определялись доли обрабатываемых земель (процент распахки) и значения их площади в исследуемых лесостепных районах (табл. 2). Для Красноярской лесостепи значения доли пашни получены с использованием цифровых векторных карт и ортофотопланов, а также данных литературы (Голубев, 2022).

Площадь пашни на водосборах рр. Кан и Большая Уря определена исходя из процента пахотных земель Канской лесостепи (Система ..., 2015).

В Южно-Минусинской лесостепи доля распаханности рассчитана с использованием литературных данных (Егунова, Загородняя, 2014), а также данных космических снимков и картографических материалов.

Интенсивность русловой эрозии определяется распространением разных морфодинамических типов русел (рис. 4). В Канской лесостепи р. Кан и ее приток р. Большая Уря в основном имеют свободно меандрирующие русла, в нижнем течении появляются участки распространения адаптированных излучин. Сходные типы русла характерны для Красноярской лесостепи на рр. Кача и Нижняя Подъемная. В Южно-Минусинской лесостепи условия формирования русел в наибольшей степени характеризуются свободными условиями, что определяет значительную интенсивность русловых деформаций. Для рр. Туба и Абакан характерны как меандрирующие, так и разветвленные русла (пойменная и русловая многорукавность) (см. рис. 4).

Соотношение бассейновой и русловой эрозии. Выполнен расчет величин суммарной массы смытых почвенных частиц $W_{п.общ}$ с обрабатываемых земель водосбора каждой из репрезентативных рек на основе данных по интенсивности годовой эрозии и площади пашни с различным состоянием агрофона (табл. 3). Наибольшая величина бассейновой эрозии характерна для речных водосборов Канской лесостепи.

Таблица 1. Интенсивность бассейновой эрозии на пашне в лесостепных районах

Лесостепной район	Интенсивность смыва от талых вод ($\mathcal{E}_т$), т/га за период снеготаяния		Интенсивность смыва от ливневых дождей ($\mathcal{E}_д$), т/га за летне-осенний период		Средняя интенсивность годовой эрозии $\mathcal{E}_п$, т/га в год	
	Зябь	Стерня	Пар	Сельскохозяйственные культуры	Пар + зябь	Стерня + Сельскохозяйственные культуры
Красноярская лесостепь — северная часть (данные измерений)	31.4	7.6	35.2	8.5	66.6	16.1
Красноярская лесостепь — центральная часть (типичная лесостепь) (данные измерений)	16.5	4	18.5	4.5	35	8.5
Красноярская лесостепь — среднее между подзонами	23.9	5.8	26.9	6.5	50.8	12.3
Чулымо-Енисейская лесостепь (данные измерений)	1.8	1.1	5.4	2.7	7.2	3.8
Канская лесостепь (данные экстраполяции)	24.1	6	27	6.7	51.1	12.7
Южно-Минусинская лесостепь (данные экстраполяции)	8.2	2.4	60.8	14.1	69	16.5

Таблица 2. Структура пахотных угодий лесостепных районов в бассейне Енисея

Лесостепной район	Площадь угодий $S_{\text{улр}}$, га			Структура угодий, %		Средняя степень распаханности, %
	Пар/зять	Стерня/Сельскохозяйственные культуры	Общая	Пар/зять	Стерня/Сельскохозяйственные культуры	
Канская лесостепь	134 041	364 429	498 470	26.89	73.11	51.1
Красноярская лесостепь	32 114	139 636	171 750	18.70	81.30	33
Южно-Минусинская лесостепь	46 884	200 018	246 902	18.99	81.01	50

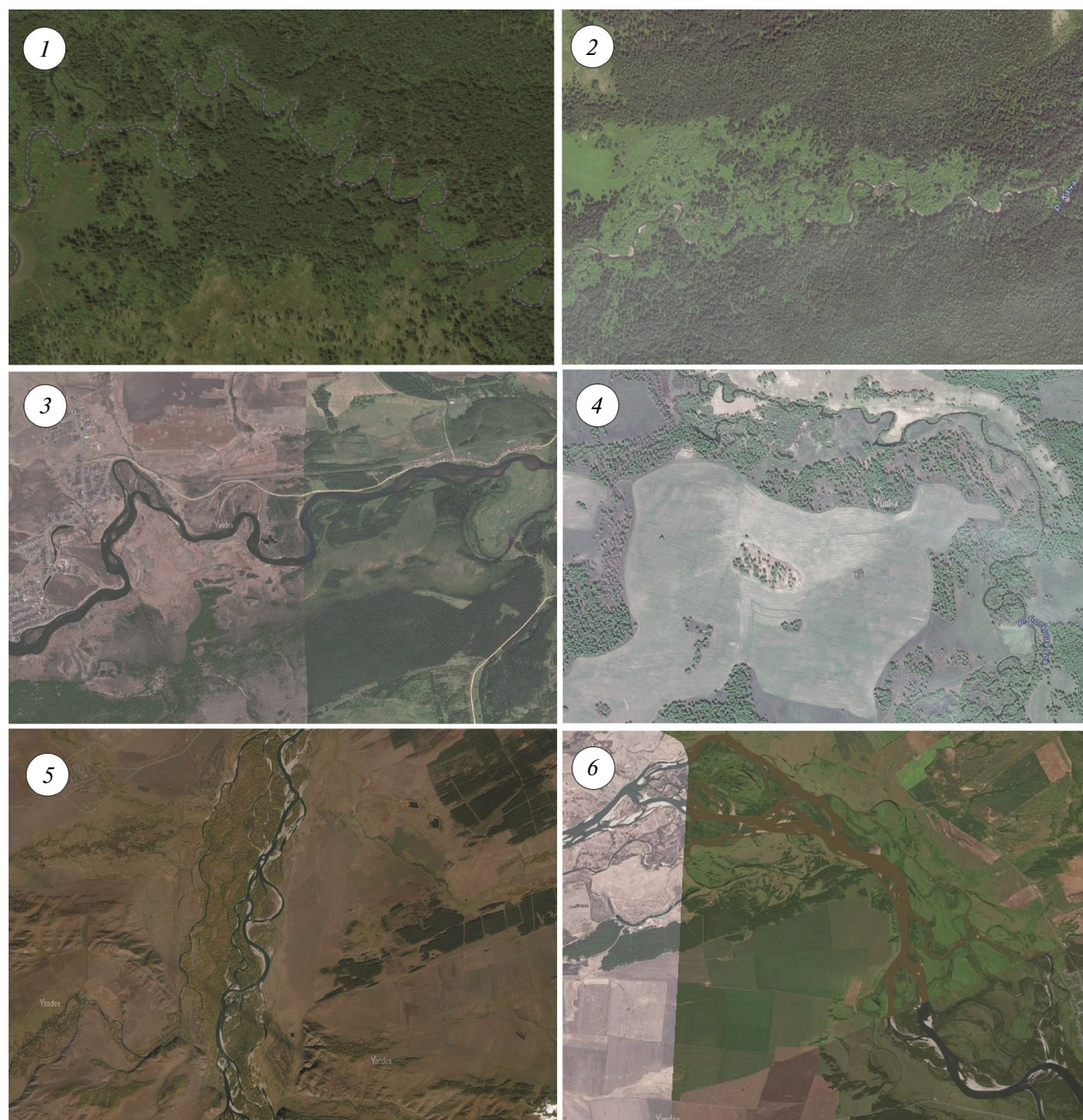
**Рис. 4.** Характерные морфодинамические типы русел исследуемых рек: 1 — Нижняя Подъемная, 2 — Кача, 3 — Кан, 4 — Большая Уря, 5 — Абакан, 6 — Туба.

Таблица 3. Расчет величин бассейновой эрозии водосборов репрезентативных рек

Река — пункт	Структура пашни на водосборе, га		Характеристики бассейновой эрозии		
	Вид агрофона	Площадь $S_{п_i}$, га	Интенсивность годовой эрозии на пашне $\mathcal{E}_{п_i}$, т/га в год	Масса смытых частиц на долю площади агро- фона $W_{п}$, т	Суммарная масса смытых с пашни частиц $W_{п.общ}$, Мт
Канская лесостепь					
р. Кан — с. Усть-Кан	Пар	505463.2	51.1	25831922.3	43.3
	Стерня/Сельскохозяй- ственные культуры	1374280.8	12.7	17495488.4	
р. Большая Уря — с. Малая Уря	Пар	15795.7	51.1	807247.6	1.3
	Стерня/Сельскохозяй- ственные культуры	42946.3	12.7	546734.0	
Красноярская лесостепь					
р. Кача — п. Емельяново	Пар	10518.8	35.0	368491.2	0.7
	Стерня/Сельскохозяй- ственные культуры	45731.3	8.5	388375.8	
р. Нижняя Подъёмная — п. Большая Мурта	Пар	3966.3	66.6	263997.0	0.5
	Стерня/Сельскохозяй- ственные культуры	17243.7	16.1	278242.8	
Южно-Минусинская лесостепь					
р. Туба — п. Курагино	Пар	36365.9	69.0	2508927.3	5.07
	Стерня/Сельскохозяй- ственные культуры	155134.2	16.5	2562986.8	
р. Абакан — г. Абаза	Пар	10938.2	69.0	754643.4	1.5
	Стерня/Сельскохозяй- ственные культуры	46661.8	16.5	770903.6	

Таблица 4. Результаты оценки поступления наносов руслового происхождения в русловую сеть исследуемых рек

Водосбор	Длина участка L_p , км	Объем русловой эрозии $W_{русл}$, Мт/год	Суммарная площадь размыва $S_{разм}$, км ²	Средняя интенсивность размыва $\mathcal{E}_p$, м/год
Абакан	309	4.98	20.6	0.07
Кан	329	3.38	8.94	0.03
Туба	408	7.29	20.2	0.05

Количественные характеристики русловой эрозии (табл. 4) наиболее крупных исследованных рек определены по формулам (4) и (5). Особенности их руслового режима определяют отличия в особенностях поступления наносов руслового происхождения. В наибольшей степени развитию русловых деформаций подвержена р. Абакан, где в русло поступает в среднем

4.98 Мт/год наносов с участка длиной около 300 км. Распространение ограниченных условий развития русловых деформаций р. Кан определяют самые низкие темпы поступления в нее наносов руслового происхождения.

Территориальное распределение расхода и годового объема стока наносов характеризуется их максимальными значениями в Южно-Ми-

Таблица 5. Параметры стока взвешенных наносов рр. Кача, Нижняя Подъёмная, Кан, Большая Уря, Туба и Абакан

Река — пункт	Период	Средний расход воды Q , м ³ /с*	Средняя мутность μ , г/м ³	Расход взвешенных наносов R , г/с	Количество наносов W_p , т	Суммарная годовая величина стока наносов $W_{p, \text{общ}}$, т
Канская лесостепь						
р. Кан — с. Усть-Кан	Весенний сток (15.04—31.05)	444.9	58.5	26027.2	105691.4	368927.0
	Летне-осенний сток (01.06—15.10)	463.2	48.0	22238.7	263235.6	
р. Большая Уря — с. Малая Уря	Весенний сток (15.04—31.05)	4.6	67.7	308.0	1250.9	1640.6
	Летне-осенний сток (01.06—15.10)	2.3	14.1	32.9	389.7	
Красноярская лесостепь						
р. Кача — п. Емельяново	Весенний сток (15.04—31.05)	15.9	15.9	253.4	1029.1	1396.1
	Летне-осенний сток (01.06—15.10)	3.2	9.8	31.0	367.0	
р. Нижняя Подъёмная — п. Большая Мурта	Весенний сток (15.04—31.05)	14.2	40.4	575.2	2335.7	2605.1
	Летне-осенний сток (01.06—15.10)	2.0	11.6	22.8	269.3	
Южно-Минусинская лесостепь						
р. Туба — п. Курагино	Весенний сток (15.04—31.05)	2019.5	54.1	109198.9	443434.8	641734.8
	Летне-осенний сток (01.06—15.10)	1005.4	16.7	16752.8	198300.0	
р. Абакан — г. Абаза	Весенний сток (15.04—31.05)	874.9	14.8	12926.2	52490.7	92618.6
	Летне-осенний сток (01.06—15.10)	398.6	8.5	3390.1	40127.9	

нусинской лесостепи, наименьшими — в Красноярской (табл. 5). Это является следствием различий в размерах рек, а также особенностей строения и гранулометрического состава почвогрунтов.

Для расчета коэффициентов доставки наносов рек в исследуемых лесостепных районах использованы формулы (6) и (7). Результаты расчета данных коэффициентов за счет бассейновой эрозии и с учетом бассейновой и русловой эрозии SDR_0 приведены в табл. 6. Количественные характеристики русловой эрозии на основе базы данных GSWE (Pekel et al., 2016) определены только для рр. Кан, Туба и Абакан рассматриваемых районов. Для остальных рек выполнена экстраполяция величин русловой эрозии относительно среднесуточных расходов воды. Для средних рек использовалась регрессионная формула (10). Выполнение экстраполяции на малые реки с помощью данной формулы некорректно из-за слишком высокой разницы величин расходов воды, в связи с этим, величины русловой эрозии малых репрезентативных рр. Кача, Большая Уря и Нижняя Подъемная определены экстраполяцией с помощью простой пропорции относительно расходов воды каждой из рр. Кан, Туба и Абакан.

Интегральные оценки бассейновой и русловой эрозии. На основании данных по площади пахотных угодий и задернованных поверхностей исследуемых районов островной лесостепи (Система ..., 2015; Халицкий, Коханьска, 2015; Чупрова, 2018) и рассчитанных значений интенсивности годовой эрозии определены средние значения суммарной массы смытых почвенных частиц с территории каждого района ($W_{у.лр.сумм}$). На основе полученной величины $W_{у.лр.сумм}$ и среднего значения коэффициента доставки наносов ($SDR_{лр}$), по формуле (9) рассчитана величина привноса продуктов бассейновой эрозии для каждого лесостепного района в эрозионно-русловую сеть в пределах бассейна р. Енисей ($W_{басс.эрс}$), результаты приведены в табл. 7.

Учет неизученных средних рр. Оя и Сыда при расчете величины русловой эрозии для Южно-Минусинского лесостепного района выполнен по регрессионной зависимости (10). Общая величина русловой эрозии средних рек в Южно-Минусинской лесостепи получена суммированием данного показателя по четырем рекам — рр. Туба, Абакан, Оя и Сыда, ее значение составило 22.36 Мт/год. В Канской лесостепи из средних рек присутствует только

Таблица 6. Расчет коэффициента доставки наносов для репрезентативных рек

Река — пункт	Суммарная годовая величина стока наносов $W_{p.общ}$, Мт	Суммарная масса смытых с пашни частиц $W_{п.общ}$, Мт	Объем русловой эрозии $W_{русл}$, Мт/год	SDR , %	SDR_0 , %	$SDR_{лр}$, % (средний SDR_0)
Канская лесостепь						
р. Кан — с. Усть-Кан	0.369	43.3	3.38	0.85	0.79	0.45
р. Большая Уря — с. Малая Уря	0.002	1.3	0.04	0.12	0.12	
Красноярская лесостепь						
р. Кача — п. Емельяново	0.001	0.7	0.05	0.18	0.17	0.31
р. Нижняя Подъёмная — п. Большая Мурта	0.003	0.5	0.05	0.48	0.44	
Южно-Минусинская лесостепь						
р. Туба — п. Курагино	0.642	5.07	7.29	12.65	5.19	3.31
р. Абакан — г. Абаза	0.093	1.5	4.98	6.07	1.42	

р. Кан, в Красноярской лесостепи средние реки отсутствуют.

Общая величина русловой эрозии с площади лесостепного района, которая приходится на бассейны малых рек, рассчитана по формуле (11). Сложение величин русловой эрозии средних и малых рек по формуле (12) дает ее суммарное значение по каждому лесостепному району (см. табл. 7).

Суммирование полученных величин доставки продуктов бассейновой эрозии в русла рек и русловой эрозии по формуле (13) показывает усредненную величину общего объема стока наносов по каждому из трех исследуемых островных лесостепных районов ($W_{эрс}$); а их сумма — общая масса частиц, выносимая в эрозионно-русловую сеть верхнего и среднего течения Енисея с островных лесостепей в его бассейне (см. табл. 7).

Таблица 7. Среднегодовая масса смытых частиц с лесостепных районов Приенисейской Сибири, поступающая в эрозионно-русловую сеть (бассейн Енисея)

Лесостепной район	Вид угодий (агрофон)	Площадь вида угодий $S_{у.лр}$, га	Средняя интенсивность годовой эрозии $\mathcal{E}_{у.б.}$, т/га в год	Масса смытых частиц с вида угодий в лесостепном районе $W_{у.лр_i}$, Мт	Интегральная бассейновая эрозия ландшафтов лесостепного района $W_{у.лр.сумм}$, Мт	Средний коэффициент доставки наносов $SDR_{лр}$, %	Величина привноса материалов бассейновой эрозии в русла рек, $W_{басс.эрс}$, Мт	Количество продуктов русловой эрозии с лесостепного района $W_{русл.сумм}$, Мт	Суммарный сток наносов с лесостепного района $W_{эрс}$, Мт
Красноярская лесостепь	Пар/Зябь	32114	50.8	1.63	4.06	0.31	0.01	0.20	0.21
	Стерня/Сельскохозяйственные культуры	139636	12.3	1.72					
	Необрабатываемые земли	328008	2.2	0.71					
Канская лесостепь	Пар/Зябь	134041	51.1	6.85	13.03	0.45	0.06	3.62	3.68
	Стерня/Сельскохозяйственные культуры	364429	12.7	4.64					
	Необрабатываемые земли	706610	2.2	1.54					
Южно-Минусинская лесостепь	Пар/Зябь	46884	69.0	3.23	7.67	3.31	0.25	22.47	22.72
	Стерня/Сельскохозяйственные культуры	200018	16.5	3.30					
	Необрабатываемые земли	490443	2.3	1.13					
ИТОГО объем частиц, выносимых в ЭРС бассейна Енисея									26.62

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ стока наносов и условий их формирования показывает специфику бассейнов рек Южно-Минусинской лесостепи. Большие объемы стока связаны с большими размерами рек (Туба и Абакан), протекающих в пределах данного района, по сравнению с другими реками. В первую очередь, это проявляется в высоких значениях объемов русловой эрозии. Кроме того, влияние оказывает расположение бассейнов указанных рек в степных, наиболее освоенных в сельскохозяйственном отношении районах, более легкий грансостав почвогрунтов, слагающих водосборы рек. Таким образом, р. Туба характеризуется наибольшими значениями стока наносов из всех исследованных рек (см. табл. 5).

Следует отметить высокую дифференциацию среднегодовых значений массы бассейновой эрозии между лесостепными районами — от 0.5 до 43.3 Мт/год на водосборах исследуемых рек. Это может быть следствием влияния как различий в суммах годовых осадков и увлажнении, так и значительной разницы в площадях пашни в Канской лесостепи — общая площадь пахотных угодий в 2–3 раза больше, чем в других лесостепных районах, при этом площадь пашни под паром/зябью выше в 3–4 раза (см. табл. 2).

Полученные значения коэффициента доставки наносов показывают существенное его увеличение в Южно-Минусинской лесостепи по сравнению с другими районами, что, вероятно, связано с расположением значительной части пахотных массивов в непосредственной близости от русел рассматриваемых рек. Для Канской лесостепи важно отметить, что р. Большая Уря является притоком р. Кан, параметры ее стока наносов учтены в количественных данных, относящихся к данной реке (см. табл. 5, рис. 2). Тем не менее, расчет коэффициентов производился для каждой из вышеуказанных рек Канской лесостепи отдельно, что позволяет получить усредненную его величину ($SDR_{др}$).

С учетом русловой составляющей коэффициент доставки наносов существенно меняется для рр. Туба и Абакан, что свидетельствует о значительном вкладе в баланс наносов этих рек продуктов размыва берегов. В бассейне р. Туба коэффициент доставки без учета и с учетом величин русловой эрозии составляет 12.65 и 5.19% соответственно, а в р. Абакан — 6.07 и 1.42%. Наоборот, в бассейне р. Кан влияние русловой составляющей исключительно мало (коэффициент доставки снижается от 0.85 до 0.79%).

В Красноярской лесостепи при общей схожести условий рельефа с остальными рассматриваемыми районами наличие значительных

выровненных площадей формирует невысокие по сравнению с другими лесостепями средние уклоны рек (2.2–3.8‰) (Ресурсы ..., 1973). В сочетании с небольшими размерами рек, это определяет малые расходы воды, скорости течения и, соответственно, меньшие величины стока наносов и интенсивности размыва берегов.

Полученные суммарные величины русловой эрозии и стока наносов по лесостепной зоне бассейна р. Енисей сопоставимы со стоком наносов в его нижнем течении (Chalov and Ivanov, 2023), что свидетельствует о важнейшей роли лесостепной зоны в формировании данных величин. Нижерасположенные участки бассейна р. Енисей оказывают минимальное влияние на формирование стока наносов.

Результаты оценки эрозии почв на сельскохозяйственных землях России (Литвин, 2002), основанные на модели USLE для дождевой эрозии и модели ГГИ для талой, заметно отличаются от полученных в данной работе. Отличия объясняются среднесезонным масштабом смыва в модели USLE, ее ограниченностью для определения смыва в ложбинах и на мелколожбинчатых склонах, отсутствием верификации моделей ГГИ и USLE в условиях лесостепи Приенисейской Сибири. Важно отметить, что результаты полевых наблюдений в Красноярском и Чулымско-Енисейском лесостепных районах, используемые в настоящей работе, получены значительно позже вышеприведенных данных (2009–2017 и 1970–1998 гг. соответственно).

ВЫВОДЫ

1. Выявлено увеличение средних значений величины бассейновой эрозии ($W_{п.общ}$) в направлении с юга на север, максимальная величина отмечена для Канской лесостепи (43.3 Мт/га в год), что согласуется с общим увеличением количества годовых осадков и общего увлажнения территории в северном направлении, при этом возрастает доля смыва от талых вод и уменьшается ливневая составляющая бассейновой эрозии. Существенная разница в массе смытых частиц между лесостепными районами является следствием различий в площадях пахотных земель, степени распашки, годовых осадках и интенсивности эрозионных процессов.

2. Отмечен контрастный режим поступления наносов руслового происхождения — их почти полное отсутствие в бассейне р. Кан и, наоборот, их преимущественное влияние на баланс наносов рр. Туба и Абакан.

3. В Южно-Минусинской лесостепи наличие открытых пространств, небольшие площади лес-

ной растительности, преобладание почв легкого и среднего гранулометрического состава и расположение значительного количества участков пашни вблизи русел суммарно определяют наибольшие величины доставки наносов (3.31%), большую подверженность размыву берегов рек, наиболее интенсивные русловые деформации, значительную дифференциацию типов русел в данном районе по сравнению с другими.

4. Выполнены дифференцированные оценки поступления наносов в реки лесостепной зоны при расчете коэффициента доставки наносов с учетом только бассейновой и совместно бассейновой и русловой эрозии. Для бассейна р. Кан степень задержки наносов на водосборе при сравнении двух вариантов расчета меняется несильно (от 0.75 до 0.8%). Напротив, для южных рр. Туба и Абакан данные изменения более существенны.

5. Оценки объемов поступления наносов со всей территории в ЭРС отдельных лесостепных районов верхнего и среднего течения р. Енисей показывают наибольший вклад в данные величины средних рек Южно-Минусинской лесостепи (рр. Туба, Абакан, Оя и Сыда). Они определяют наибольшее значение суммарного поступления наносов как для данного района (22.72 Мт/год), так и для всей лесостепной зоны в пределах бассейна р. Енисей (26.62 Мт/год). Минимальные значения характерны для Красноярской лесостепи (0.21 Мт/га) вследствие большего количества лесной растительности, более тяжелого гранулометрического состава почв, малого размера водотоков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания кафедры Гидрологии суши МГУ “Гидрологический режим и экологическое состояние водных объектов суши в условиях современного и будущего климата и антропогенного воздействия” и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов “Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений”. Оценка русловой составляющей выполнена при финансовой поддержке проекта Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 075-15-2024-614).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают огромную благодарность и признательность канд. геогр. наук Л.А. Путинцеву, сотрудникам Среднесибирского УГМС, Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв

и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева за помощь и содействие в предоставлении материалов для проведения исследований.

FUNDING

The work was performed within the framework of the state assignment of the Department of Land Hydrology of Moscow State University “Hydrological Regime and Ecological State of Water Bodies under Current and Future Climate Conditions and Human Impacts” and Research Laboratory of soil erosion and channel processes “Erosion-Fluvial Systems: Hydrological Regime, Natural-Anthropogenic Transformations and Forecast of Hazardous Manifestations.” The assessment of the riverbed component was carried out with the financial support of the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 075-15-2024-614).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their great gratitude and appreciation to PhD in Geography L.A. Putintsev, and the staff of the Central Siberian UGMS, and The Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes for their help and assistance in providing materials for research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
- Бадмаева Ю.В.* Охрана земель сельскохозяйственного назначения лесостепной зоны Красноярского края: дис. ... канд. с.-х. наук. Барнаул, 2018.
- Баженова О.И.* Современная денудация предгорных степных равнин Сибири / науч. ред. В.П. Чичагов. Новосибирск: Изд-во “Гео”, 2018. 259 с.
- Баженова О.И., Любцова Е.М., Рыжов Ю.В., Макаров С.А.* Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1997. 208 с.
- Безухов Д.А., Голосов В.Н., Панин А.В.* Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-европейской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 73–84.
- Бураков Д.А.* Эрозия почв: учеб. пособие / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2009. 160 с.
- Голубев И.А.* Исследование водной эрозии почв в зоне равнинной лесостепи Красноярского Края // Вестн. КрасГАУ. 2009. № 4 (31). С. 149–152.
- Голубев И.А.* Влияние талых вод на эрозионно-аккумулятивные процессы на пашне в центральной лесостепной зоне Красноярского края // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2021. № 1 (165). С. 24–29.

- Голубев И.А. Эрозия почв от талых вод на сельскохозяйственных землях Красноярской лесостепи: дис. ... канд. геогр. наук. Красноярск, 2022.
- Голубев И.А. Уточнение региональной методики расчета потенциального смыва почв от талых вод для северной лесостепи Средней Сибири // Изв. РГО. 2023. Т. 155. № 3–4. С. 17–29.
<https://doi.org/10.31857/S0869607123030060>
- ГОСТ Р 59054-2020. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020-09-30 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд-е. Официальное. М.: Стандартинформ, 2020.
<https://docs.cntd.ru/document/566277871>
- Гусаров А.В. Основные закономерности соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах северной Евразии // Геоморфология. 2015. № 4. С. 3–20.
- Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
- Егунова Н.А., Загородняя Е.А. Оценка плодородия почв и выноса химических элементов возделываемыми на них культурами в условиях Минусинской котловины // Почвоведение. 2014. № 6. С. 74–80.
- Евсеева Н.С. Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 484 с.
- Иванов М.М., Голосов В.Н., Беляев В.Р. Анализ строения рельефа для оценки коэффициента доставки наносов бассейна реки Плавы (Тульская область) // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2017. № 3. С. 14–23.
- Караушев А.В. Теория и методы расчетов речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 272 с.
- Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.
- Орлов А.Д. Эрозия и эрозионноопасные земли Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 208 с.
- Природные условия Красноярского края. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 250 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. Г.С. Карабаева. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 823 с.
- Система земледелия Красноярского края на ландшафтной основе: руководство. Красноярск, 2015. 222 с.
- Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 176 с.
- Топтыгин В.В., Крупкин П.И., Пахтаев Г.П. Природные условия и природное районирование земель сельскохозяйственной части Красноярского края: учеб. пособие / Красноярск. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2002. 144 с.
- Халицкий В. Почвы Сибири — растущий потенциал сельхозпроизводства XXII века // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: сб. матер. V Международ. науч. конф. (Томск, 7–11 сентября 2015 г.). Томск, 2015. С. 259–273.
- Хныкина М.А. Сток и эрозия почв на водосборе реки Кача как факторы экологической обстановки на малых реках города Красноярска // Инновации и инвестиции. 2018. № 10. С. 265–269.
- Чупрова В.В. Почвы Сибири: лабораторный практикум. Красноярск: Красноярск. гос. аграр. ун-т, 2018. 126 с.
- Allen G.H., Pavelsky T. Global extent of rivers and streams // Science. 2018. Vol. 361. № 6402. P. 585–588.
<https://doi.org/10.1126/science.aat063>
- Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M. A toolbox for sediment budget research in small catchments // Geogr. Environ. Sustain. 2017. Vol. 10. № 4. P. 43–68.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68>
- Chalov S.R., Ivanov V.A. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // Catena. 2023. Vol. 230. Art. 107212.
- Golovlyov P., Kornilova E., Krylenko I., Belikov V., Zavadskii A., Fingert E., Borisova N., Morozova E. Numerical modeling and forecast of channel changes on the river Lena near city Yakutsk // Proc. IAHS. 2019. № 381. P. 65–71.
<https://doi.org/10.5194/piahs-381-65-2019>
- Kozhuhovsky A., Yamskikh G., Komatsu G. The evolution of gullies in steppe and forest-steppe landscapes of the Minusinskaya intermountain depression, Siberia: a case study in the central part of the Krasnoyarsk water reservoir // Phys. Geogr. 2015. Vol. 36. № 4. P. 305–321.
- Linke S., Lehner B., Ouellet Dallaire C. Global hydro-environmental subbasin and river reach characteristics at high spatial resolution // Sci. Data. 2019.
<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>
- Morin P., Porter C., Cloutier M. Arctic DEM; A Publicly Available, High Resolution // Elevation Model of the Arctic. 2016.
- Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016.
<https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Vercruysse K., Grabowski R.C., Rickson R.J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation // Earth Sci. Rev. 2017. P. 38–52.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>
- Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // Geomorphology. 2012. Vol. 138. P. 74–88.

The Intensity of Basin and Riverbed Erosion in the Forest-Steppe Landscapes of the Yenisei River Basin

I. A. Golubev^{a,*}, V. A. Ivanov^{b,**}, A. S. Chalova^{b,***}, and S. R. Chalov^{b,****}

^aBranch of PJSC “Rosseti Sibir” — “Krasnoyarskenergo,” Krasnoyarsk, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: igorgol1984@bk.ru

**e-mail: viktoro.1998@yandex.ru

***e-mail: aleksandra-1984@mail.ru

****e-mail: hydroserg@mail.ru

Assessment of the basin and channel components of sediment runoff, determination of the values of the introduction of flushing products from meltwater and stormwater into the riverine catchment area network is an urgent topic of geographical research. In this research for the Krasnoyarsk, Kansk and Yuzhno-Minusinsk island forest-steppe regions of the Yenisei River basin a quantitative assessment of river sediment runoff, annual erosion intensity, total basin and channel erosion volumes, and their ratios for selected representative rivers is performed. Certain differences in the areas of arable land, in the plowing degree and annual erosion intensity between forest-steppe areas determine a significant difference in the average annual volume of basin erosion—from 0.5 to 43.3 Mt/year in the basins of the case-study rivers. The coefficient of sediment delivery to river channels is determined based on data of the average annual values of sediments and soil particles washed from catchments. Its value varies from 0.12–5.19%, with the maximum in the Yuzhno-Minusinsk forest-steppe. The contribution of sediments of channel origin increases in the south direction. An integrated assessment of basin and channel erosion shows that the total inflow of washout products from the entire forest-steppe zone into the Yenisei River erosion network is 26.62 Mt/year, which is comparable to the sediment runoff of the Lower Yenisei and thus indicates the significant role of erosion and channel processes in the forest-steppe zone in sediment runoff of Russia’s largest river.

Keywords: erosion channel network, sediment runoff, contribution of basin and channel erosion in sediment runoff, sediment delivery coefficient

REFERENCES

- Alekseevskii N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Formation and Movement of River Sediments]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998.
- Allen G.H., Pavelsky T. Global extent of rivers and streams. *Science*, 2018, vol. 361, no. 6402, pp. 585–588.
<https://doi.org/10.1126/science.aat063>
- Badmaeva Yu.V. Protection of agricultural lands in the forest-steppe zone of the Krasnoyarsk territory. *Cand. Sci. (Agric.) Dissertation*. Barnaul: Altai St. Agrar. Univ., 2018.
- Bazhenova O.I. *Sovremennaya denudatsiya predgornykh stepnykh ravnin Sibiri* [Modern Denudation of the Foothill Steppe Plains of Siberia]. Novosibirsk: Geo Publ., 2018.
- Bazhenova O.I., Lyubtsova E.M., Ryzhov Yu.V., Makarov S.A. *Prostranstvenno-vremennoi analiz dinamiki erozionnykh protsessov na yuge Vostochnoi Sibiri* [Spatial and Temporal Analysis of the Dynamics of Erosion Processes in the South of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1997.
- Bezukhov D.A., Golosov V.N., Panin A.V. Assessment of the sediment delivery coefficient of small catchments in the forest-steppe and steppe regions of the East European Plain. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 4, pp. 73–84. (In Russ.).
- Burakov D.A. *Eroziya pochv* [Soil Erosion]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. Gos. Agrar. Univ., 2009.
- Chalov S.R., Ivanov V.A. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob’, Yenisey and Lena rivers sediment budget. *Catena*, 2023, vol. 230, art. 107212.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107212>
- Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M. A toolbox for sediment budget research in small catchments. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 43–68.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68>
- Chuprova V.V. *Pochvy Sibiri* [Soils of Siberia]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. Gos. Agrar. Univ., 2018.
- Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* [Erosion and Sediment Runoff on Earth]. Kazan: Kazan. Univ., 1984.
- Egunova N.A., Zagorodnaya E.A. Assessment of soil fertility and removal of chemical elements by crops cul-

- tivated on them in the conditions of the Minusinsk basin. *Eurasian Soil Sci.*, 2014, no. 6, pp. 74–80.
- Evseeva N.S. *Sovremennyyi morfolitogenez yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoi ravniny* [Modern Morpholithogenesis of the South-East of the West Siberian Plain]. Tomsk: NTL Publ., 2009.
- Golubev I.A. Soil water erosion research in the flat forest-steppe zone of the Krasnoyarsk region. *Vestn. Kras-GAU*, 2009, no. 4, pp. 149–152. (In Russ.).
- Golubev I.A. Influence of meltwater on erosion-accumulative processes on arable land in the central forest-steppe zone of the Krasnoyarsk Territory. *Ispol'zov. Okhran. Priir. Resur. Ross.*, 2021, no. 1, pp. 24–29. (In Russ.).
- Golubev I.A. Snowmelt soil erosion on agricultural lands of the Krasnoyarsk forest-steppe. *Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. Gos. Agrar. Univ., 2022. 247 p.
- Golubev I.A. Clarification of the regional methodology for calculating potential soil flushing from meltwater for the northern forest-steppe of Central Siberia. *Izv. RGO*, 2023, vol. 155, no. 3–4, pp. 17–29. (In Russ.).
- Golovlyov P., Kornilova E., Krylenko I., Belikov V., Zavadskii A., Fingert E., Borisova N., Morozova E. Numerical modeling and forecast of channel changes on the river Lena near city Yakutsk. *Proc. IAHS*, 2019, no. 381, pp. 65–71.
<https://doi.org/10.5194/piahs-381-65-2019>
- Gusarov A.V. Basic patterns of correlation of channel and basin components of erosion and sediment runoff in river basins of northern Eurasia. *Geomorfol.*, 2015, no. 4, pp. 3–20. (In Russ.).
- Ivanov M.M., Golosov V.N., Belyaev V.R. Analysis of the relief structure for estimating the sediment delivery coefficient of the Plava River basin (Tula region). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2017, no. 3, pp. 14–23. (In Russ.).
- Karaushev A.V. *Teoriya i metody raschetov rechnykh nanosov* [Theory and Methods of Calculations of River Sediments]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977.
- Khalitsky V., Kohanska M. Soils of Siberia — the growing potential of agricultural production of the 22nd century. In *Otazhenie bio-, geo-, antroposfernykh vzaimodeistvii v pochvakh i pochvennom pokrove* [Reflection of Bio-, Geo-, and Anthropospheric Interactions in Soils and Ground Cover]. Tomsk: Tomsk. Gos. Univ., 2015, pp. 259–273. (In Russ.).
- Khnykina M.A. Runoff and soil erosion in the catchment area of the Kacha River as factors of the ecological situation on small rivers of the city of Krasnoyarsk. *Innov. Invest.*, 2018, no. 10, pp. 265–269. (In Russ.).
- Kozhuhovsky A., Yamskikh G., Komatsu G. The evolution of gullies in steppe and forest-steppe landscapes of the Minusinskaya intermountain depression, Siberia: A case study in the central part of the Krasnoyarsk water reservoir. *Phys. Geogr.*, 2015, vol. 36, no. 4, pp. 305–321.
- Linke S., Lehner B., et al. Global hydro-environmental subbasin and river reach characteristics at high spatial resolution. *Sci. Data*, 2019, vol. 6.
<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>
- Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii* [Geography of Soil Erosion of Agricultural Lands of Russia]. Moscow: ICTS Akademkniga Publ., 2002.
- Morin P., Porter C., Cloutier M., et al. ArcticDEM; A Publically Available, High Resolution Elevation Model of the Arctic. *Geophys. Res. Abstr.*, 2016, vol. 18, art. EPSC2016-8396.
- Orlov A.D. *Eroziya i erozionnoopasnye zemli Zapadnoi Sibiri* [Erosion and Erosion-Prone Lands of Western Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983.
- Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, vol. 540, no. 7633, pp. 418–422.
<https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Prirodnye usloviya Krasnoyarskogo kraya* [Natural Conditions of the Krasnoyarsk Territory]. Gromov L.V., Ed. Moscow: Izd-vo Akad. Nauk SSSR, 1961.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 16. Angaro-Eniseiskii raion* [Surface Water Resources of the USSR: A Hydrological Study. Vol. 16. Angaro-Yenisei Region]. Karabaev G.S., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1973.
- Sistema zemledeliya Krasnoyarskogo kraya na landshaftnoi osnove: rukovodstvo* [The Farming System of the Krasnoyarsk Territory on a Landscape Basis: A Guide]. Brilev S.V., Ed. Krasnoyarsk: Polikor Publ., 2015.
- Surface and groundwater. Classification of water bodies. GOST 59054-2020. Moscow: Standartinform Publ., 2020. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/566277871> (accessed: 11.01.2026). (In Russ.).
- Tanasienko A.A. *Spetsifika erozii pochv v Sibiri* [The Specifics of Soil Erosion in Siberia]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2003.
- Toptygin V.V., Krupkin P.I., Pakhtaev G.P. *Prirodnye usloviya i prirodnoe raionirovanie zemledel'cheskoi chasti Krasnoyarskogo kraya* [Natural Conditions and Natural Zoning of the Agricultural Part of the Krasnoyarsk Territory]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. Gos. Agrar. Univ., 2002.
- Vercruyssen K., Grabowski R.C., Rickson R.J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth Sci. Rev.*, 2017, vol. 166, pp. 38–52.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>
- Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 2012, vol. 138, pp. 74–88.