

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННО-РУСЛОВЫХ СИСТЕМ В XXI ВЕКЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

С.Р. Чалов*, В.Н. Голосов, А.С. Завадский, В.В. Сурков, А.И. Иннокентьев,
А.А. Куракова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет*

**srchalov@geogr.msu.ru*

Поступила в редакцию 20.03.2026

После доработки 15.04.2026

Принята к публикации 23.04.2026

Аннотация. Эрозионно-аккумулятивная деятельность водных потоков происходит в разных пространственных масштабах на разных уровнях эрозионно-русловых систем (ЭРС). В статье приводятся основные результаты исследований, выполнявшихся представителями научной школы НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова, посвященных основным компонентам ЭРС — склонам и междуречьям, речным долинам и руслам, а также стоку наносов, связывающему эти разобщенные в пространстве элементы речного бассейна между собой. Каждое из направлений охарактеризовано с точки зрения наиболее актуальных технологий — физических моделей и моделей долевого вклада, балансовых подходов применительно к междуречьям; методов гидродинамического моделирования русловых потоков; технологий мониторинга стока наносов. Приводятся данные об интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах водосборов умеренного пояса и оценка доставки наносов водосборов разного размера в речную сеть. Рассмотрены методика исследования речных пойм, их формирования, эволюции, принципы картографирования; практические вопросы освоения пойм и отражения хозяйственной деятельности на них. На примере крупнейших бассейнов рек РФ (Оби, Енисея, Лены и Колымы) показано, что в современных гидроклиматических условиях эти территории являются областями аккумуляции, где сток наносов, выносимый за пределы речного бассейна, значительно ниже массы наносов, перемещаемых эрозионными процессами на водосборе и в руслах рек.

Ключевые слова: эрозионно-аккумулятивные системы, смыв почвы, модели эрозии, пойменно-русловые комплексы, гидродинамическое моделирование, сток наносов, геохимия речных наносов

DOI: [10.71367/3034-4638-2026-1-1-8-44](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2026-1-1-8-44)

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионно-русловые системы (ЭРС) — пространственные системы взаимодействия водных потоков и подстилающей поверхности, границы которых соответствуют речным водосборам. Основными механизмами функционирования эрозионно-русловых систем являются эрозионные и русловые процессы. Связующим процессом между ними является перемещение вещества — сток воды и наносов. Происходит замыкание цикла — эрозии, транспорта и аккумуляции наносов.

Существует ряд подходов в изучении перемещения наносов в речных бассейнах (табл. 1). ЭРС представляют собой древо водотоков с примыкающими к ним участками водосбора (склонами), состоящими из

серии подсистем, динамически связанных потоками массы и энергии (Clayton, Chorley, Kennedy, 1972). Представление о существовании обособленных участков перемещения материала стало одним из ключевых подходов в теории стока наносов (Burt, Allison, 2009). Теория единого эрозионно-аккумулятивного процесса, развиваемая учением Н.И. Маккавеева (1955), основана на выявлении общего и частного в эрозионно-аккумулятивном процессе в разных звеньях сети водотоков. Каскадная структура речного бассейна связана с продольной трансформацией соотношения русловых и бассейновых источников (Алексеевский, 1998; Голосов, 2006). Теория руслового «конвейера» (jerky conveyor belt) Д. Фергюсона (Ferguson, 1981) важнейшим свойством транспорта вещества и энергии по длине

Таблица 1. Подходы к изучению перемещения наносов в речных бассейнах**Table 1.** Approaches to studying sediment transport in river basins

Концепция	Авторы	Основные свойства	Выделяемые уровни
Единый эрозионно-аккумулятивный процесс	Маккавеев, 1955; Литвин, 2002	Единство поступления, транспорта и аккумуляции наносов	Эрозионно-склоновые подсистемы; Овражно-балочные подсистемы; Речные подсистемы
«Речной конвейер» (jerky conveyor belt)	Ferguson, 1981	Эпизодичность транспорта наносов в связи с их временной задержкой на разных уровнях ЭРС	—
Прерывистость каскада наносов (sediment disconnectivity)	Fryirs, 2013	Перенос вещества определяется существованием разных зон аккумуляции (буферы, барьеры и аккумулятивные поверхности), которые определяют время доставки наносов	Части водосбора: верхние звенья речной сети; средние водосборы; нижние звенья речной сети. Продольные связи (приток-река; верхнее-нижнее течение) Поперечные связи (склон-русло; пойма-русло) Вертикальные связи (массообмен в системе поток-дно)
Связанность каскада наносов (sediment-connectivity)	Bracken et al., 2015	Перемещение наносов определяется в зависимости от соотношений «фаза-частота» эрозии, транспорта и аккумуляции; пространственно-временными соотношениями между эрозией и транспортом наносов	В пределах водосборов Между водосбором и руслом Внутри русловой сети
Непрерывность транспорта наносов (sediment continuity)	Joyce et al., 2018	Сохранение баланса массы при нисходящем движении частиц в ЭРС	

русловых систем называет эпизодичность в связи с временной задержкой потоков на разных уровнях эрозионно-русловых систем при сохранении единства процесса. Понятие непрерывности транспорта наносов (sediment continuity (Joyce et al., 2018)) характеризует закон сохранения массы при перемещении вещества из верхних в нижние звенья ЭРС. Выделение продольных, поперечных и вертикальных связей между частями эрозионно-русловой системы, выполненное К. Fryirs (2013), выявляет разные типы взаимодействия между источниками поступления и потоком наносов (соответственно склон-приток-река; горизонтальные деформации; вертикальные деформации). Сочетание эрозионных, транзитных и аккумулятивных участков определяет существование промежуточных звеньев в общей системе переноса вещества (Fryirs, 2013; Fryirs et al., 2007) и таким образом — «прерывистость» потока наносов. В общем случае, вниз по течению снижается

проявление продольных и поперечных связей и увеличивается выраженность вертикальных связей. Некоторые исследователи подчеркивали еще большую специфику пространственно-временных изменений характеристик стока наносов (Bracken et al., 2015) и, в частности, ключевую роль коротких гидрологических событий в перераспределении наносов в пределах ЭРС (Brierley, Fryirs, Jain, 2006).

Все это позволяет выделить в пределах эрозионно-русловых систем три основных пространственных компоненты — водосбор, река, устье. Они связаны между собой единым процессом — перемещением наносов. Эти пространственные единицы и процессы, происходящие в их пределах, являются основными составляющими учения о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, рассматриваемом в данной статье: водосбор (склоны и междуречья), русла рек и сток наносов. С учетом того, что в последние годы публиковался ряд обобщающих

трудов по эрозионно-русловым системам, в первую очередь, одноименная монография 2017 г., в данной статье рассматриваются только наиболее значимые вопросы в каждом из направлений изучения ЭРС и делается акцент на современные технологии исследований. Представленные в статье результаты обобщают исследования НИЛлаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева.

1. СКЛОНЫ И МЕЖДУРЕЧЬЯ

Современные технологии исследований

Исследования склонов и междуречий охватывают широкий спектр процессов, связанных как с эрозией почв и развитием линейных форм временных водотоков, так и с аккумуляцией наносов. Таким образом, рассматривается разнообразие эрозионно-аккумулятивных процессов. В пределах речных бассейнов поверхностный сток на склонах и в днищах временных водотоков приводит к переносу рыхлообломочного материала и формированию как отрицательных (промоины, овраги и т. д.), так и положительных (шлейфы, конусы выноса и т. д.) форм рельефа. Степень детальности оценок объемов выноса и аккумуляции транспортируемых наносов определяет точность количественных оценок вещества, поступающего с площади исследуемого водосбора в постоянные водотоки и водоемы. Особенностью склонового стока воды является его дискретность во времени и пространстве и существенный вклад экстремальных эрозионных событий в суммарный вынос материала за среднесуточный период (Edwards, Owens, 1991; Larson et al., 1997). Эти характеристики предопределяют необходимость широкого использования косвенных методов оценки скоростей смыва, размыва и переотложения материала, поскольку организация и поддержание сети мониторинга стока воды и наносов в различных звеньях флювиальной сети на участке от элементарного склона до русла постоянного водотока является весьма затратной задачей (Голосов, 2008). Ограниченные ряды подобных наблюдений, когда синхронно фиксируется сток воды и наносов в круглогодичном режиме на склоновых водосборах и в суходольной сети, единичны, а их продолжительность не превышает двух десятилетий (Cerdan et al., 2012). Несколько чаще длительные ряды встречаются на постах наблюдений за стоком воды с автоматизированным отбором проб воды на мутность, расположенных на малых водотоках (Benselama et al., 2019). Но в этом случае накапливаются только данные о выносе материала в постоянные водотоки, и отсутствует информация об объемах материала, перемещенного внутри данного водосбора. В горах

они обычно оцениваются на основе сочетанного применения дистанционных методов исследования и оценок площадей распространения и скоростей протекания различных экзогенных процессов, которые определяются с помощью наземного лазерного сканирования, путем установки ловушек наносов и применения современных методов датирования отложений (Кедич и др., 2020).

Для сельскохозяйственных водосборов, на которых проводится регулярная обработка почвы, использование дистанционных методов ограничивается только возможностями оценки линейного и объемного прироста овражных форм (Медведева и др., 2018; Frankl et al., 2013). Но и в этом случае необходимо использовать наземные повторные съемки в сочетании со съемками с БПЛА, так как только это дает возможность с нужной точностью оценивать трансформацию стенок овражных форм (Castillo et al., 2012). Технологии использования БПЛА при оценке трансформации рельефа эффективны только при высокоточной привязке реперных точек, число которых должно быть достаточным для сопоставления цифровых моделей рельефа, построенных по результатам разновременных съемок (Харченко, 2023). Процессы плоскостного и ручейкового смыва вносят в большинстве случаев значимый вклад в перенос материала на пахотных склонах. Тем не менее современные технологии пока не позволяют фиксировать изменения рельефа, связанные со смывом, с достаточно высокой точностью даже на пастбищных склонах (Харченко, 2024). Это связано с тем, что даже различия во влажности почвы сопоставимы с изменениями рельефа, обусловленными потерями почвы за счет проявления эрозионно-аккумулятивных процессов. Исключением являются только участки интенсивного смыва, когда за одно эрозионное событие с поверхности склона смывается несколько сантиметров, а иногда и весь пахотный слой.

Тем не менее следует учитывать, что значимый вклад в среднесуточные потери почвы со склонов вносят экстремальные эрозионные события редкой повторяемости, а также то обстоятельство, что существенная часть наносов, вовлеченных в плоскостной и ручейковый смыв, переоткладывается внутри пашни (Голосов и др., 2024). Кроме того, механическая эрозия, связанная с обработкой почвы, также вносит свой, местами весьма значительный (Lindstrom et al., 1992), вклад в перераспределение почвенного материала на пашне. Поэтому наиболее перспективными представляются методы повторного отбора проб с определением в них содержания цезия-137 или других радионуклидов, которые используются в качестве трассеров.

Данный подход стал использоваться еще с конца прошлого века (Zhang, 2023), но в последние годы в него были внесены важные дополнения, связанные с принципами отбора проб почвы в пределах различных элементов рельефа склона или склонового водосбора (Иванов и др., 2024). Выделение различных элементов в пределах обрабатываемых склонов предполагает, с одной стороны, понимание процессов формирования поверхностного стока и расположения возможных участков переотложения наносов внутри пашни, а с другой стороны, должно базироваться на степени детальности конечных оценок скоростей перераспределения почвенного материала (Panin et al., 2001). В частности, в случае высокой расчлененности склонов ложбинно-потяжинной сетью необходимо учитывать вклад механической эрозии в заполнение почвенным материалом крупных промоин, формирующихся в днищах ложбин и потяжин (Belyaev et al., 2005).

Массовое использование эрозионных моделей для расчета смыва почвы с пахотных склонов предполагает обязательную верификацию полученных данных расчетов на основе использования независимых полевых методов оценки смыва и аккумуляции. Это связано с тем, что большая часть моделей либо полностью эмпирические, либо в них присутствуют блоки, основанные на эмпирических данных (Zhidkin et al., 2023). Их применение без верификации оправданно только в регионах, где были собраны данные наблюдений, на основе которых используемые модели были разработаны. Применение в эмпирических моделях глобальных баз данных, доступных для большей части факторов, входящих, например, в наиболее часто используемые модификации USLE, часто ведет к получению непроверенных результатов. Это во многих случаях обусловлено дефицитом метеорологических данных (разреженная сеть метеостанций) или лабораторных анализов (механический состав почв) для целого ряда регионов, с одной стороны, и высокой пространственно-временной вариабельностью информации о ряде факторов (осадки, посевы и т. п.) с другой. Совершенствование обработки дистанционных данных и собственно повышение качества космических снимков постепенно улучшают ситуацию с точностью расчетов, но пока она недостаточно высока. Для среднесрочных оценок смыва почвы в последние годы стали использоваться усовершенствованные эрозионные модели, которые позволяют оценивать переотложение наносов на пахотных склонах (Ivanova et al., 2025), а также включают блок оценки вклада механической эрозии в перераспределение почвенного материала внутри пашни (Van Rompay et al., 2001).

Существенным ограничением широкого применения физически обоснованных моделей эрозии для оценки темпов смыва является дефицит данных о водопроницаемости почвы при различных типах ее обработки и уборке урожая (Gupta et al., 2024). Это ключевая характеристика, определяющая коэффициент поверхностного стока со склонов. Следует подчеркнуть, что даже для ненарушенных почв существует высокая пространственная вариабельность водопроницаемости. Это обусловлено неравномерностью сложения почв в связи с влиянием корней травянистых растений, деятельностью землероев, а также с различиями в механическом составе почвы, которые чаще проявляются в пределах территорий с большой пестротой почвообразующих пород.

Надежным индикатором изменений в темпах эрозии на пахотных водосборах являются оценки изменений темпов аккумуляции в ловушках наносов, примыкающих к обрабатываемым участкам. В качестве хрономаркеров помимо набора радионуклидов природного (^{210}Pb) и техногенного (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{240}Pu) происхождения, возможности использования которых в последние годы существенно расширились (Leslie, Hancock, 2008; Golosov, Walling, 2015), используются также продукты сгорания угля (Шамшурина и др., 2024). Это позволяет с большей детальностью реконструировать изменение темпов аккумуляции во времени и делать выводы о росте или снижении скоростей смыва.

Наиболее надежным методом количественной оценки перераспределения наносов на речных водосборах за счет развития эрозионно-аккумулятивных процессов является балансовый подход, который по его содержанию следует отнести к традиционным методам исследований. Однако в последние десятилетия развитие полевых, дистанционных методов, а также совершенствование подходов к исследованию пространственных закономерностей протекания процессов переноса вещества и трансформации форм флювиального рельефа с использованием ГИС-технологий и применением методов машинного обучения, существенно повысили достоверность оценки расходных и приходных частей баланса наносов (Tsyplenkov et al., 2026). При этом остается пока не решенной проблема соотнесения скоростей процессов в разных звеньях флювиальной сети, выявленных за различные интервалы времени. Актуальность этой проблемы обусловлена нестационарностью эрозионно-аккумулятивного процесса, связанной с климатическими флуктуациями, и различиями в воздействии человека на различные элементы

исследуемого водосбора, связанными как с изменениями землепользования, так и с характером обработки почвы, а также воздействием на пути доставки наносов с площади водосбора в постоянные водотоки.

Всё более совершенными становятся технологии идентификации долевого вклада различных источников наносов на водосборах в сток наносов водотоков и заилиние водоемов (Голосов и др., 2020). Существующие методики расчета позволяют выявить питающие провинции в пределах исследуемого водосбора в том случае, если существуют значимые отличия в содержании различных трассеров у выделенных потенциальных источников наносов (Успенский и др., 2025). В последние годы существенно выросло теоретическое осмысление этих процессов (Гирло и др., 2025), расширен и апробирован арсенал разных статистических алгоритмов.

Оценка перераспределения наносов на малых водосборах

Одним из важнейших направлений исследований на междуречных пространствах является оценка перераспределения наносов. Классическое понимание единства эрозионно-аккумулятивного процесса предопределяет необходимость количественной характеристики скоростей и объемов вовлеченного в перенос склоновым стоком рыхло-обломочного материала и интенсивности перераспределения наносов по пути их транспортировки в днища долин постоянных водотоков. Решение этой задачи путем прямых наблюдений за стоком воды и наносов в пределах различных элементов каскадной системы перемещения вещества по

направлению от приводораздельных склонов к днищам сухих долин и далее к постоянным водотокам — достаточно затратный процесс. Это связано с необходимостью организации мониторинга стока воды и наносов, предусматривающего сооружение лотков, собирающих сток на нижней границе пашни, на которых проводятся измерения расхода воды и отбор проб воды на мутность в ручном или автоматизированном режиме. Такие наблюдения за формированием талого стока и смыва проводились НИИ Лабораторией эрозии почв и русловых процессов на Сатинском учебном полигоне. Были установлены среднесезонные и максимальные величины смыва со склонов и склоновых водосборов различной конфигурации в области распространения вторично-ледникового рельефа, которые изменялись в диапазоне от первых десятков кг/га до 8 т/га за одно снеготаяние (Литвин и др., 1998).

Достоверные данные о среднесезонных темпах смыва почв и переотложения наносов в пределах склонов и склоновых водосборов в период ливневого и талого смыва получены при совместном применении набора косвенных методов исследования и расчетов по эрозионным моделям. В последние годы подобные исследования были проведены в пределах малых пахотных водосборов, расположенных в различных частях южного мегасклона Восточно-Европейской равнины (Безухов и др., 2019; Голосов и др., 2022, 2024). В качестве примера здесь приводятся оценки эрозии и аккумуляции на малом водосборе Спокоевка, в одном из притоков первого порядка бассейна р. Воробжи, Курская область (рис. 1, табл. 2) (Голосов и др., 2022).

Полученные результаты показывают достаточно высокое соответствие результатов вычисления мас-

Таблица 2. Аккумуляция наносов в днище балки (тонн с участка в год), рассчитанная по радиоцезиевому и почвенно-морфологическому методам (Голосов и др., 2022)

Table 2. Sediment accumulation in the bottom of the ravine (tons per site per year), calculated using radiocesium and soil-morphological methods (Goloso et al., 2022)

Сегмент	Площадь, кв. м	Радиоцезиевый метод		Почвенно-морфологический метод	
		мощность намытой толщи, см	аккумуляция в сегменте, т/год	мощность намытой толщи, см	аккумуляция в сегменте, т/год
A	6628	20	49	220	76
B	4547	18	31	225	53
C	4232	30	49	213	47
D	2618	39	39	200	27
E	2017	33	25	190	20
Всего в днище			194		223

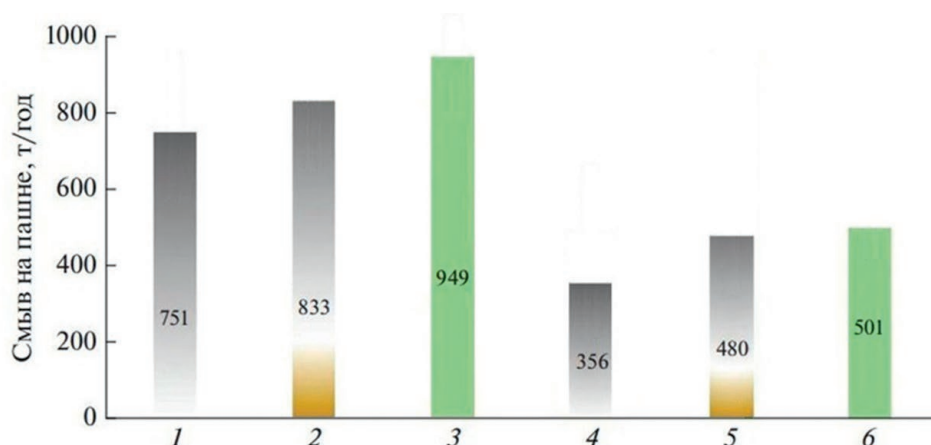


Рис. 1. Средние значения и диапазон варьирования темпов среднемноголетнего смыва почв на пашне водосбора Спокоевка. 1 – суммарный смыв по почвенно-морфологическому методу (горизонт A1); 2 – вынос наносов с пашни по почвенно-морфологическому методу (горизонт A1); 3 – суммарный смыв по почвенно-морфологическому методу (горизонт A1B); 4 – вынос наносов с пашни по почвенно-морфологическому методу (горизонт A1B); 5 – суммарный смыв, установленный на основе расчетов по модели WaTEM/SEDEM; 6 – вынос наносов с пашни, установленный на основе расчетов по модели WaTEM/SEDEM (Голосов и др., 2022)

Fig. 1. Average values and variation range of the rates of average annual soil loss in the arable land of the Spokoevka catchment. 1 – total loss by the soil-morphological method (horizon A1), 2 – sediment removal from arable land by the soil-morphological method (horizon A1), 3 – total loss by the soil-morphological method (horizon A1B), 4 – sediment removal from arable land by the soil-morphological method (horizon A1B), 5 – total loss established on the basis of calculations by the WaTEM/SEDEM model, 6 – sediment removal from arable land established on the basis of calculations by the WaTEM/SEDEM model (Goloso et al., 2022)

сы перемещенного внутри пашни и вынесенного за пределы пашни почвенного материала, полученных на основе расчетов по модели WaTEM/SEDEM и выявленных при использовании почвенно-морфологического метода (рис. 1). Следует отметить, что расположение зон аккумуляции внутри пашни, выявленное по результатам расчетов по модели, далеко не всегда совпадает с фактическим расположением зон аккумуляции. В связи с этим модель SERSAL, разработанная на основе совершенствования универсального уравнения почвенной эрозии в НИЛабораии эрозии почв и русловых процессов, более достоверно привязывает положение зон аккумуляции, определенное на основе расчетов, к их фактическому расположению на участке (Ivanova et al., 2025). Также небольшие различия между результатами применения двух полевых методов выявлены в оценке среднегодовой массы отложения наносов в днище балки Спокоевки, где переотлагается большая часть смытого с пашни материала (табл. 2). Вполне достоверно выглядит и соотношение смытого с пашни и переотложившегося в днище материала, при том что определенная часть смытых наносов аккумулируется на участке между нижним краем пашни и днищем балки, а другая – выносится за пределы водосбора.

Оценка доставки наносов с площади малых водосборов в постоянные водотоки и водоемы

Изучение связи процессов на водосборе и в руслах рек проводится на основе оценки доставки наносов. При этом несмотря на то, что коэффициент доставки наносов, равный отношению стока наносов к объему смытого грунта на водосборе, стал важнейшим инструментом в изучении ЭРС, погрешность масштабирования его оценок и несоответствие измеряемого стока наносов и расчетных значений эрозии делает исследование доставки наносов крайне актуальным.

Специфика развития эрозионно-аккумулятивных процессов в горах и на равнинных территориях вносит существенные различия в особенности транспорта и переотложения наносов по пути их доставки в постоянные водотоки. В горах источником материала, поступающего в водотоки и водоемы, являются продукты выветривания коренных пород, формирующие рыхлообломочный чехол, мощность которого варьирует в широких пределах в зависимости от соотношения скоростей выветривания и денудации. Набор экзогенных процессов, которые наряду с водной эрозией способны перемещать материал внутри склонов и доставлять его в водотоки, достаточно обширен, а их вклад в суммарную дену-

дацию изменяется в зависимости от высотной зоны. Это предопределяет необходимость проведения геоморфологического картографирования исследуемых малых горных водосборов с выделением площадей распространения различных склоновых процессов исходя из принципа доминирования одного из них на конкретном участке. При этом всё равно, согласно имеющимся количественным оценкам перераспределения наносов на склонах, водно-эрозионные процессы вносят значимый вклад в вынос материала с площади водосборов как в среднегорном (Харченко и др., 2023), так и в высокогорном поясах (Tsyplenkov et al., 2021). А сокращение площади пахотных земель в пределах крупных речных бассейнов, таких как р. Кубань (выше Краснодарского водохранилища), является ключевым фактором снижения стока наносов (Tsyplenkov et al., 2025). В среднегорном поясе Северного Кавказа склоны преимущественно используются в качестве пастбищ, и в зависимости от нагрузки проективное покрытие склонов травянистой растительностью изменяется в широких пределах. Оценка баланса наносов с использованием комплекса полевых, дистанционных и расчетных

методов на малом водосборе Гитче-Гижгит (бассейн р. Баксан) позволила установить, что продукты плоскостного и ручейкового смыва составляют 83% от общего объема материала, выносимого в водоем, расположенный в устьевой части водосбора. При этом данные процессы распространены только на 50% площади водосбора. На долю остальных экзогенных процессов, включая линейную эрозию, приходится оставшиеся 17% (табл. 3) (Tsyplenkov et al., 2026).

На равнинах умеренного пояса при отсутствии антропогенных нарушений сток наносов, поступающих с площади водосбора, ничтожно мал. Это определяет значительное превышение объемов перемещаемого материала на водосборах крупных рек над результирующим стоком наносов в их устьях (Chalov, Ivanov, 2024). Это обусловлено высоким проективным покрытием поверхности почвы растительностью, хорошей водопроницаемостью почв и защитной ролью крон деревьев и кустарников. Мониторинговые наблюдения, проводившиеся в Центрально-Черноземном заповеднике на участке некосимой степи, выявили полное отсутствие

Таблица 3. Сводные данные по оценке объемных потерь и выноса наносов с водосбора Гитче-Гижгит с использованием средних показателей скоростей каждого из учтенных процессов (по Tsyplenkov et al., 2026 с упрощением)

Table 3. Summary data on the assessment of volumetric losses and sediment removal from the Gitche-Gizhgut catchment using the average rates of each of the processes taken into account (according to Tsyplenkov et al., 2026 with simplification)

Экзо-генный процесс	Площадь распространения, км ² (%)	Среднегодовой объем перемещенного материала, м ³ год ⁻¹ (%)	Средний <i>SDR</i> *	Расчетный объем материала, поступившего в водоем, м ³ год ⁻¹ (%)
Осыпи	0.053 (2.85)	62 (5.62)	0.19	11 (5.73)
Почвенный крип и сезонная солифлюкция	0.79 (42.5)	13.5 (1.22)	0.17	7 (3.65)
Линейная эрозия	0.008 (0.43)	86.5 (7.84)	0.24	14 (7.29)
Плоскостной смыв и ручейковая эрозия	0.94 (50.5)	942 (85.3)	0.17	160 (83.3)
Скальные выходы	0.07 (3.76)	—	—	—
Всего	1.86 (100)	1104 (100)	0.17	192 (100)

* Коэффициент доставки наносов.

формирования поверхностного стока (Грин, 1970). Антропогенное вмешательство и, прежде всего, распашка земель приводят к резкому росту поверхностного стока и смыва почвы. Наглядной иллюстрацией влияния площади распашки водосбора на доставку наносов в водоем являются результаты детальных исследований перераспределения наносов на пруду Поповском (Голосов и др., 2020). Согласно оценкам, за весь период существования пруда с 1964 г. в нем отложилось не менее 75–80 см наносов. При этом 97% из них были доставлены со склонов в водоем до 1986 г., что соответствует среднегодовому выносу 1.7 мм с площади водосбора. После 1986 г. вынос материала с водосбора в пруд резко сократился и составил в период до 2010 г. величину, соответствующую слою выноса не более 0.03 мм/год. Столь кардинальные изменения были обусловлены двумя основными причинами: уменьшением площади пашни с 134 до 50 га и резким сокращением вплоть до полного прекращения талого стока, связанным с сокращением глубины промерзания почв на фоне общего повышения температур воздуха в зимние месяцы (Барабанов и др., 2018). Эпизодические проявления ливневого стока и смыва, а также размыва вершин овражных врезов приводили к поступлению в пруд ничтожно малого объема наносов, так как их основная масса переоткладывалась по краю пашни, в днищах сухих долин и конусах выноса. Данный пример наглядно демонстрирует влияние изменений площади пашни и климата на доставку наносов с антропогенно нарушенных склонов и склоновых водосборов в постоянные водотоки и водоемы южного мегасклона Восточно-Европейской равнины.

II. РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Гидродинамическое моделирование русловых деформаций

Важнейшим направлением в области изучения русловых процессов стало развитие методов математического моделирования (используется также термин «гидродинамическое моделирование» как раздел математического, который, соответственно, использует уравнения гидродинамики). Оно позволяет не только анализировать гидравлический режим водного потока при различных гидрологических сценариях, но и прогнозировать русловые переформирования в русле и на пойме, как в краткосрочной, так и в долгосрочной (20–50 и более лет) перспективе, в т. ч. с учетом глобальных тенденций изменения климата и водного стока рек. Моделирование — обязательный элемент проектирования крупных инженерных сооружений в реч-

ных руслах и на пойме; оно позволяет просчитать разные сценарии трансформации гидрологических и морфодинамических характеристик при техногенном вмешательстве в природные процессы (рис. 2). При этом гидродинамическое моделирование аккумулирует широкий спектр гидрологических, геоморфологических, геофизических, геодезических, ландшафтных исследований и является завершающим звеном в цепочке анализа и прогнозирования пойменных и русловых процессов.

Важнейшее значение в исследовании русловых процессов получил программный комплекс STREAM 2D CUDA, разработанный в ООО НПП «Аквариус Аналитик». В последней версии этой программы используется точный решатель задачи Римана для уравнений мелкой воды над разрывным дном (Алексюк и др., 2020), разработанный в ИВП РАН и опубликованный в (Aleksyuk, Belikov, 2019; Aleksyuk, Malakhov, Belikov, 2021). Наиболее подробно программно-моделирующий комплекс STREAM 2D CUDA и приложения к нему описаны в монографии (Беликов, Алексюк, 2020). Программа предназначена для расчета нестационарных и неравномерных течений, к которым относятся половодья и паводки в реках, речных долинах и водохранилищах, волны прорыва, вызванные разрушением напорного фронта плотин, и т. п. Для расчета деформаций дна и берегов русла, заиления и промывки водохранилищ применяется новый алгоритм транспорта наносов с учетом неоднородного (многофракционного) состава грунта, движения как влекомых, так и взвешенных наносов, переформирования подводных и надводных склонов (Krylenko I. et al., 2018; Алабян и др., 2018; Беликов и др., 2025). В модели реализован блок моделирования ледовых явлений, позволяющий учитывать основные параметры, связанные с льдообразованием; находится на стадии внедрения модуль учета неоднородности слоев грунта в разрезах русловых и пойменных отложений.

Все большее применение в практике математического моделирования находят данные дистанционного зондирования Земли. Космические снимки используются практически на всех этапах создания математических моделей, а также при визуализации результатов моделирования. При составлении цифровой модели рельефа космические снимки используются для актуализации положения береговой линии, антропогенных объектов и т. п. Многоканальные космические снимки могут быть применены к составлению ландшафтных карт, которые служат для выделения зон различной шероховатости. Космические снимки, отражающие выдающееся гидроло-

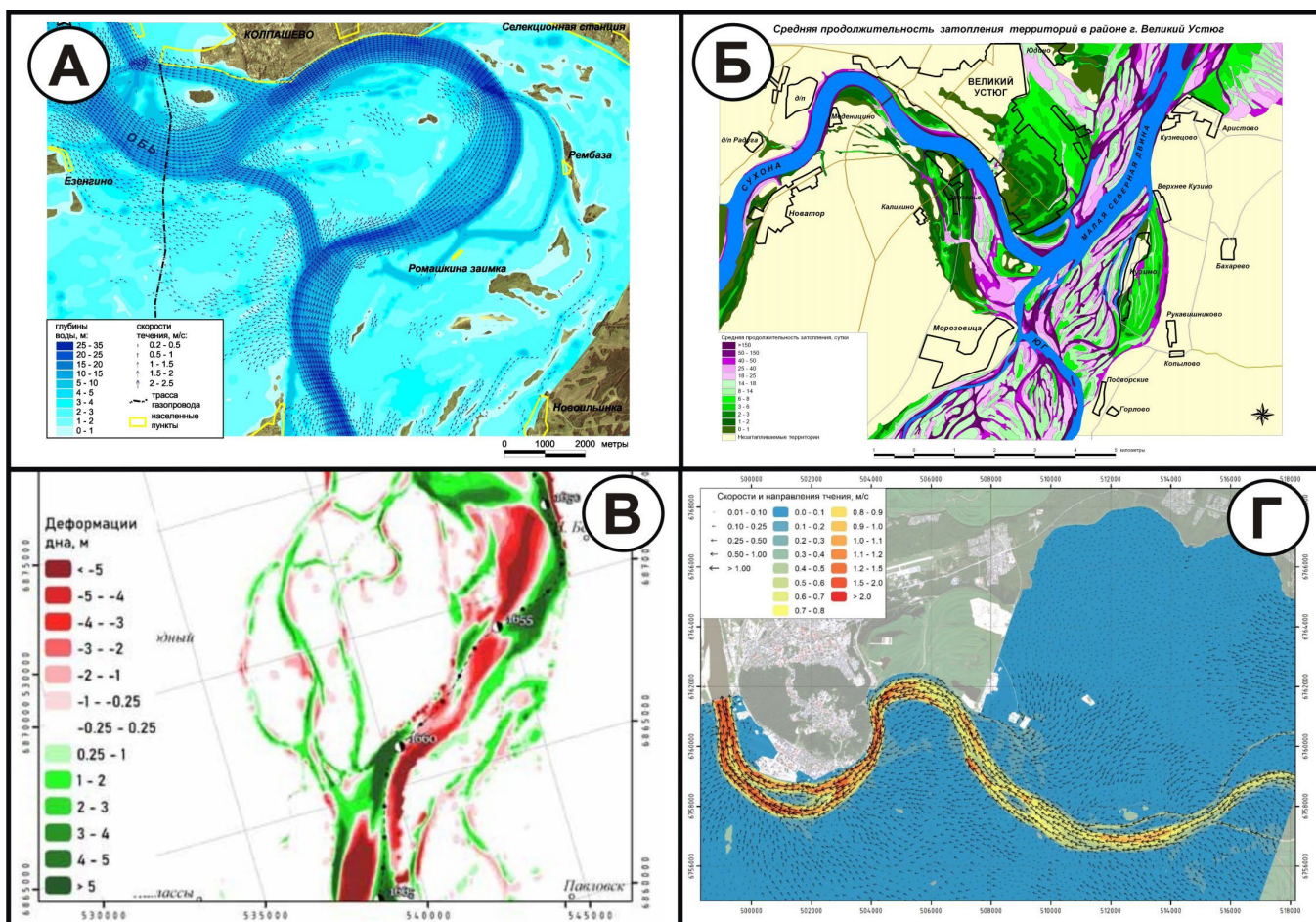


Рис. 2. Визуализация результатов моделирования русловых и пойменных процессов: А – рассчитанные глубины и скорости течения р. Оби при проектировании спрямляющего канала через излучину Оби у г. Колпашево (половодье обеспеченностью 1%); Б – расчет средней продолжительности затопления пойм Северной Двины, Юга и Сухоны у г. Великого Устюга; В – прогноз деформаций дна р. Лены на 20-летний период для средней части Якутского узла (фрагмент); Г – рассчитанные скорости течения Иртыша при расходе воды 1% обеспеченности и перекрытии дамбами предназначенного к застройке пойменного сегмента

Fig. 2. Visualization of the results of modeling channel and floodplain processes: А – calculated depths and flow rates of the Ob River during the design of a straightening canal through the Ob bend near the town of Kolpashevo (flood probability of 1%); Б – calculated average duration of flooding of the floodplains of the Northern Dvina, Yug and Sukhona near the town of Veliky Ustyug; В – forecast of deformations of the Lena River bed for a 20-year period for the middle part of the Yakut node (fragment); Г – calculated flow rates of the Irtysh with a water flow of 1% of the probability and damming of the floodplain segment intended for development

гическое событие, как, например, затопление поймы редкой обеспеченности, могут служить материалом для калибровки путем сопоставления фактических и расчетных (модельных) границ затопления. По космическим снимкам также возможно определение положения ледовых заторов для их корректного учета при специализированных сценарных расчетах.

Одним из примеров изучения эрозионно-русловых систем для разработки методов инженерного регулирования (управления) русловых процессов

с применением методов гидродинамического моделирования является участок среднего течения р. Лены (от г. Покровска до узла слияния с р. Алдан) (Корнилова, Крыленко и др., 2018; Чалов и др., 2019; Krylenko I. et al., 2024). Общим фоном, определяющим морфологию и динамику этого участка, являются большая водоносность реки, слабая устойчивость берегов к размыву (сложенных преимущественно рыхлыми грунтами), внутригодовая неравномерность стока, наличие многолетнемерзлых пород в русле и пойме, еже-

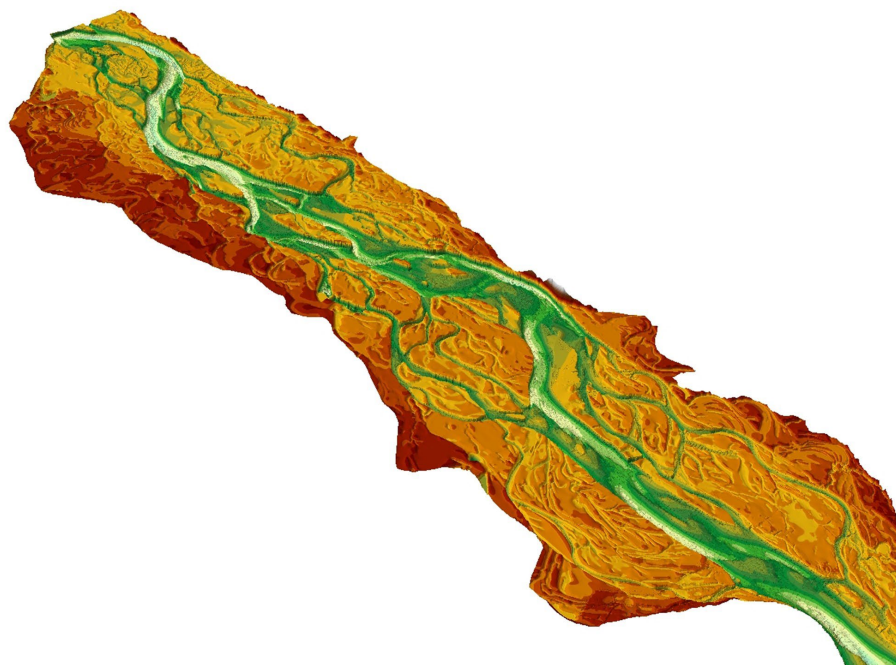


Рис. 3. Пример визуализации цифровой модели рельефа пойменно-руслового комплекса р. Лены в трехмерном виде на центральную часть модельного участка р. Лены (Якутский узел)

Fig. 3. An example of visualization of a digital relief model of the floodplain-channel complex of the Lena River in a three-dimensional view of the central part of the model section of the Lena River (Yakut node)

годно формирующиеся ледовые заторы. Большая ширина реки способствует делению потока на отдельные струи и их миграции в пределах русла при изменении уровня воды, что приводит к ежегодному, зачастую продолжительному затоплению поймы. Накопленные многолетние данные натурных исследований позволили подготовить единую двумерную численную модель пойменно-руслового комплекса р. Лены общей протяженностью около 300 км. Расчетная сетка и рельеф модели (рис. 3) учитывают как разветвления основного русла, так и всю пойму р. Лены, местами превышающую более 10 км в ширину, основные русловые и пойменные протоки. Гибридная треугольно-четыреугольная сетка двумерной гидродинамической модели включает более 300 тыс. расчетных ячеек.

Хозяйственная нагрузка на приречные территории модельного участка одной из крупнейших рек РФ весьма велика и постоянно усиливается. Начато строительство уникального мостового перехода через Лену в районе Табагинского мыса, проектируются масштабные работы по инженерной защите левобережных пойменных массивов от затопления, осуществляется разработка русловых и пойменных карьеров, ежегодно проводятся дноуглубительные и русловыправительные работы для обеспечения безаварийного судоходства, устойчивого функционирования водозаборных узлов г. Якутска, подходных каналов к речному порту и Жатайскому судостроительному заводу. На этом участке был разработан комплекс расчетных модулей, позволяющих прогнозировать изменения гидрологических и русловых

процессов при совокупном влиянии антропогенных факторов и изменений климата на основе методов математического моделирования. Расчетные модули позволяют решать следующие задачи:

- оценка зон затопления и гидравлических характеристик потока при наводнениях и паводках;
- оценка гидравлики потока при ледовых заторах;
- оценка русловых деформаций в бытовых условиях и при антропогенном вмешательстве;
- оценка климатически обусловленных изменений гидравлики потока и русловых процессов;
- научное сопровождение проектирования гидротехнических мероприятий:
 - проектирование противопаводковых дамб и берегозащитных сооружений;
 - проектирование мостовых переходов и подводных линейных переходов.

Отдельным направлением исследования стало внедрение методов математического моделирования русловых процессов для обоснования дноуглубительных мероприятий, нацеленных на улучшение судоходных условий на затруднительных участках (Завадский, Фингер и др., 2019; Чалов и др., 2020). Учитывались современные гидрологические и морфологические характеристики пойм и русла р. Лены, а также полученные на основе модельных расчетов прогнозные оценки русловых переформирований на период 5, 15, 25 лет. Это позволило в рамках наиболее вероятных гидрологических сценариев визуализировать из-

менения руслового рельефа на кратко-, средне-, долгосрочную перспективу и дать количественную оценку необходимых объемов дноуглубительных работ для оптимального положения трассы судового хода с учетом возможности увеличения гарантированной глубины судового хода на лимитирующих перекатах до 3.0 м. Для наиболее затруднительных для судоходства участков, в число которых вошли Якутский узел, перекальный участок Делюсюнних, Намский-Машарский перекалы, Хайтыалахско-Атаринский участок, перекалы Омулаган-Мунхасыт, были созданы локальные математические модели. Это позволило для каждого участка провести сценарные расчеты на 5, 15 и 25 лет, на основе которых были уточнены прогнозы русловых переформирований ретроспективного гидролого-морфологического анализа. С учетом выявленных тенденций развития русла в численные модели закладывались различные варианты дноуглубительного регулирования русла с целью закрепления динамической оси потока в том или ином положении без ущерба для судоходных условий на выше и ниже расположенных участках. Результатом проведенных исследований стала схема коренного улучшения судоходных условий на перспективу до 2050 г., согласованная и принятая к реализации в ФБУ «Администрация Ленского бассейна» (Росморречфлот РФ).

Исследования пойменно-русловых комплексов

Речные поймы представляют собой части нижнего звена эрозионно-русловых систем, периодически затопляемые в половодья и паводки, покрытые растительностью и обремененные своим происхождением эрозионно-аккумулятивной деятельностью речного потока (Чалов, 1970). В России речные поймы занимают площадь 42 млн га (Добровольский, Балабко и др., 2011), или 2.4% территории. В хозяйстве они используются давно и повсеместно; освоена примерно половина площади пойм. Использование речных пойм многоцелевое: селитебное; промышленное; добыча полезных ископаемых; транспортное; энергетическое (строительство тепловых и гидроэлектростанций); сельскохозяйственное; лесохозяйственное; рыболовное, рекреационное. Задачи ведения хозяйства в поймах, прогноза опасных явлений и катастроф, связанных с регулярными половодьями, невозможно решить без знания механизма формирования и развития пойменных ландшафтов.

Изучение пойм на протяжении всей истории носило эмпирический и утилитарно-практический характер, и только с середины XX в. было поставле-

но на научную основу. Основная причина — недостаточное понимание генезиса пойм и механизма их формирования. До начала 50-х гг. XX в. большинство исследователей связывало происхождение пойм и особенности их рельефа с затоплением дна речной долины полыми водами. При этом поверхность поймы рассматривалась как неизменная и существовавшая изначально. Только в 1949 г. Н.И. Маккавеев и в 1951 г. Е.В. Шанцер сформулировали тезис о возникновении речных пойм в результате эрозионно-аккумулятивной деятельности потока и русловых деформаций. Развитие русловедения во второй половине XX в. решило эту проблему. Сейчас русловые и пойменные процессы рассматриваются как единое явление, а процесс формирования пойм, их рельефа и геологического строения, затопления получил полное, вплоть до деталей, физическое объяснение. Установлена связь типов пойм с типами русел, с определенными гидрологическими и русловыми режимами; разработаны геоморфологические классификации пойм (Попов, 1968; Чернов, 1983; Чалов, Чернов, 1985), последние из которых (Чалов, Чернов, 1985; Чернов, 2009) имеют сложную блоковую структуру, показывая строгую зависимость типов и разновидностей пойм, их рельефа, литологии от типа русла, вертикальных и горизонтальных русловых процессов и многочисленных нефлювиальных факторов. В развитие положения о единой системе русло-пойма было сформулировано понятие о пойменно-русловом комплексе (ПРК, Чернов, 2009). Главные его составляющие — русло как динамичная и активная часть, пойма и выходящие к руслу уступы террас и коренных берегов как подвижные границы.

Признание русловых процессов в качестве узлового фактора формирования речных пойм позволило вычислить темпы развития пойменных ландшафтов (ландшафтная структура пойм разветвленных рек оказалась весьма подвижной), построить эволюционно-динамические ряды природных комплексов и развивать ландшафтно-индикационное направление в поймоведении: динамика почвенно-растительного покрова и ландшафтов в целом рассматривается как показатель направленности, интенсивности, многолетнего и сезонного режима русловых деформаций и гидрологического режима реки (Беркович, Злотина, 1983; Злотина, 1989; Сурков, 1999).

Четыре давно известных метода натурного исследования пойм — точечная рекогносцировка, профилирование, сплошное картографирование и метод комплексной ординации (Роднянская, 1961; Анненская, 1963; Жучкова, 1977; Жучкова, Раковская, 2004) — сейчас дополняются квадрокоптерной

(или лидарной) съемкой и математическим моделированием пойменных процессов (в частности, прохождения потока половодья и трансформации рельефа — размыва или намыва берегов, перестройки русла реки и пойменных массивов). Часто они применяются совместно, дополняя друг друга. Широко применяются и косвенные аналитические методы — дешифрирование аэро-, космо- и коптерных снимков, ландшафтно-индикационный, метод построения эволюционных рядов пойменных урочищ и опросы местных жителей.

Точечная рекогносцировка применяется при мелком масштабе работ, большой территории исследования; в случаях, не требующих создания специальных (геоморфологических, ботанических, ландшафтных) карт, — при локальной застройке, сооружении берегоукреплений, противопаводковой защиты, трансформации сети пойменных протоков, создании на них прудов и водохранилищ, русловых изысканиях, трассировании местных дорог и коммуникаций.

Профилирование — основной прием исследования пойм при геоморфологических, почвенных, ботанических, ландшафтных, геофизических, геохимических работах, исследовании режима затопления и специальных работах, связанных с освоением пойм, — трассированием дорог, коммуникаций, строительством мостов. В комплексе с квадрокоптерной съемкой и анализом космических снимков метод также позволяет создавать специальные карты пойм и схемы затопления. Суть метода — в прокладке линейных поперечных профилей через пойму, от одного борта долины до другого, с выходом на бровки коренных берегов и террас. Метод комплексной ординации — по сути, то же профилирование, но дополняемое одновременным снятием данных (снегомерных, уровня воды в пойменных водоемах, температуры и влажности почв, мощности отложившихся наносов, микроклиматических, характеристик растительного покрова, геофизических, геохимических и пр.) в выбранных точках профиля. Фактически это стационарный или полустационарный (при сезонном производстве работ в полосе профиля) метод, направленный на исследование природных режимов, динамики природных комплексов.

Картографирование поймы — наиболее дорогостоящий и сложный метод ее исследования. Он используется при специальных исследованиях для целей сельского хозяйства, мелиорации, оценки радиоактивного загрязнения поймы, при экологических исследованиях, широкомасштабной застройке пойм. При комплексных крупномасштабных исследованиях и картографировании поймы изучается

каждый компонент и свойство пойменного ландшафта, а также факторы, его формирующие.

Картографирование, в частности, применялось при изучении техногенных террас, возникающих на месте пойм в результате их выхода из режима регулярного затопления под влиянием антропогенных факторов. Техногенные террасы характеризуются специфическими ландшафтами, резко отличными от пойменных — вплоть до сплошной городской застройки, имеют искусственный режим стока воды и увлажнения, особый почвенно-растительный покров (Сурков и др., 2019; Завадский и др., 2020; Завадский и др., 2021; Завадский, Сурков, Самохин, 2025). Их водный режим отличен от пойменного. При блокировании регулярного (или периодического) затопления поймы ее водный режим становится плакорным. Речной поток больше не является его составляющей, основными факторами увлажнения становятся осадки, снеготаяние и сток воды с соседних возвышенных территорий. Сток воды на бывшей пойме сосредоточивается в старичных понижениях и ложбинах, а незатопляемые теперь гривы и гряды становятся водоразделами. Связанная транзитным пойменным потоком поверхность распадается на изолированные водосборы, которых на первых порах, из-за обилия ложбин, может быть много.

Квадрокоптерная съемка стала применяться совсем недавно. Ее достоинством служат возможность фотографирования малодоступных сегментов поймы, островов, болот и труднопроходимых лесных массивов, а также перспективы повторной съемки поймы в любую фазу водного режима — при затоплении, ледоходе, обсыхании. Квадрокоптеры могут фиксировать последствия катастрофических явлений: ледовых заторов, заломов, прорывов дамб, наводнений, размывов берегов. Квадрокоптерная съемка позволяет строить рельеф поймы (в условной или абсолютной системе высот), отбирая необходимые снимки с помощью специальных программ. Лидарная съемка направлена на исследование рельефа поймы и применяется главным образом при строительстве. Ее достоинство — получение рельефа без постобработки.

Математическое моделирование гидрологических, пойменных и русловых процессов стало обязательным этапом исследований; оно позволяет не только детально отследить затопление пойм и прохождение потока половодья, но и прогнозировать трансформации пойм как в краткосрочном плане, так и на длительную (20–50 и более лет) перспективу. Моделирование — практически незаменимый прием при оценке последствий строительства различных сооружений на пойме. Моделирование

русловых и гидрологических процессов требует значительной подготовки: сбора данных, подготовки цифровой модели рельефа и расчетной сетки, калибровки (подбора параметров для совпадения с реальными измерениями), верификации (тестирования и проверки). Итоги зависят от собранного материала — чем точнее будут исходные данные, тем корректнее выводы.

Ландшафтно-индикационный метод дает возможность оценить среднюю, минимальную и максимальную продолжительность затопления поймы на различных уровнях (как за многолетний период, так и в конкретный год). Он применяется при недостатке непосредственных наблюдений за затоплением поймы, при редкой сети гидрологических постов или их полном отсутствии, а также при недостаточных данных о рельефе поймы, и основан на расположении растительных сообществ, почв и природных комплексов на поймах, в соответствии с определенными высотными «этажами» или ярусами над меженным урезом. В поймах существует относительно жесткая зависимость между условиями увлажнения и растительным покровом, с одной стороны, и между растительным покровом и составом отложений, с другой. Периодические длительные затопления обуславливают жесткий отбор видов, существующих на том или ином ярусе. На поймах прослеживаются своеобразные высотные ряды сообществ (и, шире, природных комплексов), которые отражают развитие поймы от примитивных зарастающих русловых форм до сложно построенных береговых массивов.

Наличие относительно жесткой зависимости высотного положения природных комплексов от условий затопления создает предпосылки для решения обратной задачи: используя их (или один из их компонентов, например, растительность) как индикатор, можно оценить продолжительность и вероятность затопления того или иного массива поймы (Сурков, 2006). При этом выполняется следующая последовательность действий: строится опорный ландшафтный профиль в районе действующего гидрологического поста; рассматривается высотный ряд природных комплексов; производится оценка затопления каждого природного комплекса по данным гидрологического поста; вычисляется удельная высота каждого природного комплекса; уточняется рельеф поймы с помощью ландшафтной карты. На основе этих данных создаются схемы затопления поймы, исходя из поставленных задач. Ландшафтно-индикационным методом можно оценить затопление поймы, даже не имея данных гидрологических постов. Для этого необходимо проводить подбор пойм-аналогов

со сходной ландшафтной структурой и известным водным режимом.

Ландшафтно-индикационный метод позволяет строить карты пойменного рельефа, существенно сокращая геодезические работы. Для этого необходимо привязывать опорные ландшафтные профили к реперам геодезических сетей и проводить горизонтالي по контурам ландшафтных таксонов в соответствии с основными особенностями пойменного рельефа. В частности, таким путем был отстроен рельеф пойм рек Надуй, Се-Яха и Морда-Яха в районе пос. Бованенково на центральном Ямале (рис. 4). Ширина пойм здесь местами превышает 20 км. Метод дает удовлетворительные результаты, учитывая жесткие привязки растительных сообществ и природных комплексов на поймах тундровых рек к их положению над меженным урезом. При использовании ландшафтно-индикационного метода наиболее точные результаты режима затопления получаются для островов, прирусловых пойм, ступенчатых пойм, периодически действующих проток. Наиболее корректные результаты характеристик затопления можно получить при наличии длительного, 40–50-летнего ряда наблюдений на опорных гидрологических постах.

Ландшафтно-индикационный метод позволяет оценивать скорости пойменного потока по характеру грунтов и связанным с ними растительным сообществам. Эту зависимость характеризуют режимы формирования пойменных природных комплексов — проточный, слабопроточный, умеренный, слабозастойный, застойный. На равнинных реках проточный режим характеризуется максимальными скоростями на пойме 0.5–0.8 м/с, в руслах более 1.5 м/с; в отложениях господствуют крупные и гравелистые пески, галечники при незначительном участии супесей и легких суглинков. Поймы слабопроточного режима формируются при скоростях потока 0.3–0.5 м/с, для них характерны средне- и мелкозернистые пески, супеси, легкие опесчаненные суглинки. Для пойм умеренного режима характерны скорости 0.1–0.3 м/с, слабозастойного — менее 0.1 м/с, с накоплением тонкого аллювия. При застойном режиме течение отсутствует, здесь накапливаются торф и глина. Проточный режим господствует в прирусловой зоне; на зрелых массивах здесь доминируют ветляники, сосняки, злаковые тополевики, с характерным подлеском (акация, облепиха, шиповник) и вейниковые луга на примитивных и слоистых дерновых почвах, контрастный гривистый, грядовый и ложбинно-островной рельеф с промоинами, высыпками, эрозионными котлами. В слабопроточных и умеренных режимах на пологогривистых

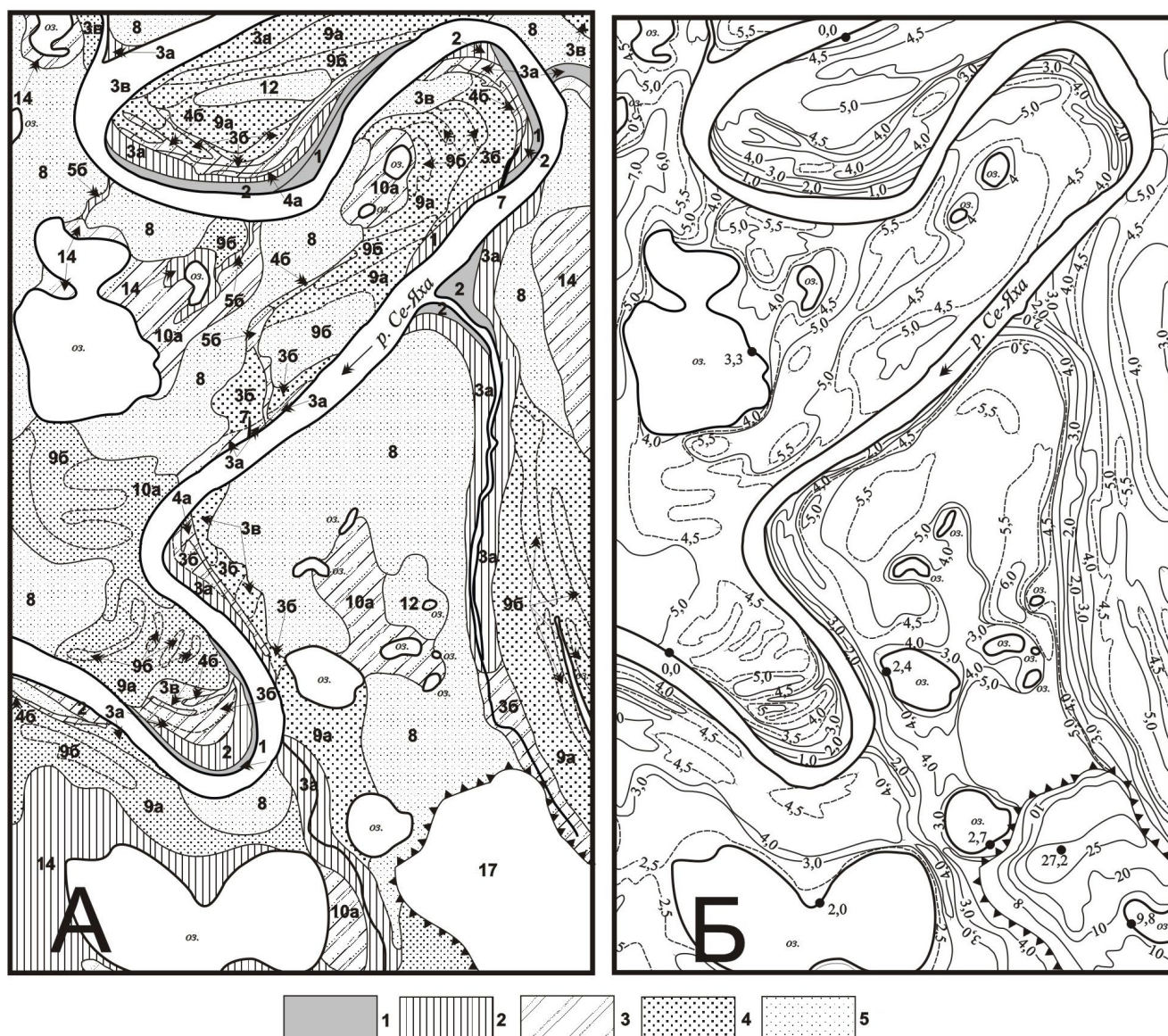


Рис. 4. Отрисовка пойменного рельефа на основе ландшафтно-индикационного метода. А – ландшафтная карта и относительная высота природных комплексов: 1 – менее 2 м надурезом, 2 – 2–3 м, 3 – 3–4 м, 4 – 4–5 м, 5 – более 5 м; Б – рельеф поймы

Fig. 4. Drawing of floodplain relief based on the landscape-indication method. А – Landscape map and relative height of natural complexes: 1 – less than 2 m above the waterline, 2 – 2–3 m, 3 – 3–4 m, 4 – 4–5 m, 5 – more than 5 m; Б – floodplain relief

и плоскостных поймах с узкими, но глубокими межгрядными ложбинами доминируют мезофитные луга, березняки, дубравы, леса из ильма, ясеня, ивы, в лесотундре – лиственничники; здесь господствуют луговые и дерново-луговые почвы. Для слабозастойного режима в плоских депрессиях, пологовогнутых заплывших межгрядных понижениях и на выровненных поверхностях обычные сырые луга, ольховники, ельники, пихтарники и лугово-болотные почвы; в застойном режиме развиваются болотные комплексы.

Важное направление изучения пойм в контексте влияния на них русловых процессов представляет собой восстановление эволюционно-динамических рядов, отражающих последовательность развития пойменных ландшафтов в целом (Беркович и др., 1983; Сурков, 1999) и характеризующих формирование пойм в ходе русловых деформаций и динамики затопления. Эволюционно-динамические ряды природно-территориальных комплексов (ПТК) нижней Катуни (рис. 5) характеризуют формирование поймы полугорной реки с сложно-

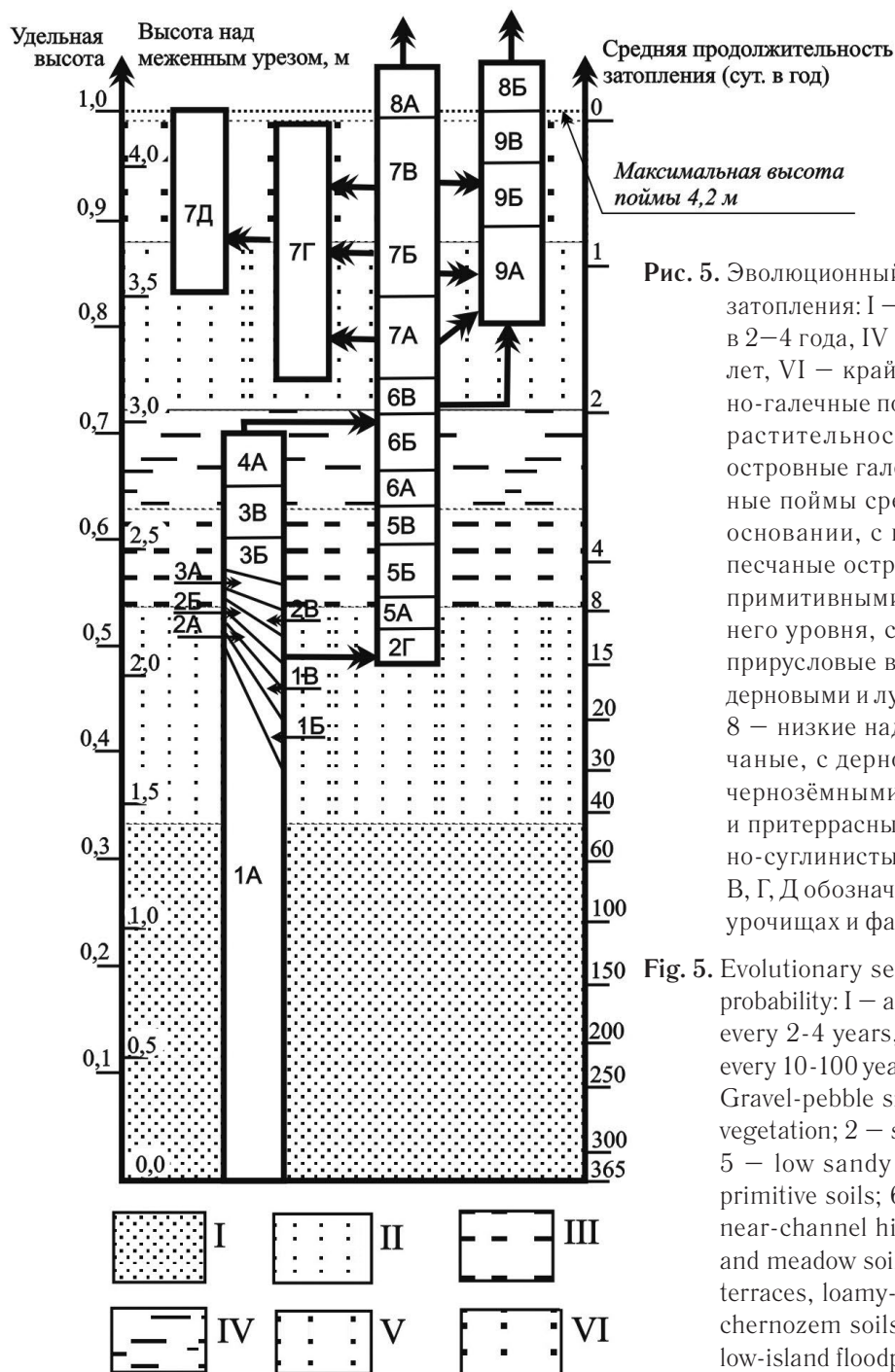


Рис. 5. Эволюционный ряд ПТК нижней Катунь. Вероятность затопления: I — ежегодно, II — 1 раз в 2 года, III — 1 раз в 2–4 года, IV — 1 раз в 4–10 лет, V — 1 раз в 10–100 лет, VI — крайне редкое. Фации и урочища. Гравийно-галечные побочни, косы, осерёдки: 1 — лишённые растительности; 2 — задернованные; 3 — низкие островные галечные поймы; 4 — прирусловые песчаные поймы среднего уровня, на гравийно-галечном основании, с примитивными почвами; 5 — низкие песчаные островные поймы с дерновыми слоистыми примитивными почвами; 6 — песчаные поймы среднего уровня, с дерновыми слоистыми почвами; 7 — прирусловые высокие ложбинно-островные поймы с дерновыми и луговыми почвами, супесчано-песчаные; 8 — низкие надпойменные террасы, суглинисто-песчаные, с дерново-подзолистыми и оподзоленными чернозёмными почвами; 9 — высокие центральные и притеррасные ложбинно-островные поймы, песчано-суглинистые, с луговыми почвами. Буквами А, Б, В, Г, Д обозначены стадии развития растительности в урочищах и фациях

Fig. 5. Evolutionary series of the lower Katun' NTC. Flooding probability: I — annually, II — once every 2 years, III — once every 2-4 years, IV — once every 4-10 years, V — once every 10-100 years, VI — extremely rare. Facies and tracts. Gravel-pebble side banks, spits, middens: 1 — devoid of vegetation; 2 — sodded; 3 — low island pebble floodplains; 5 — low sandy island floodplains with soddy layered primitive soils; 6 — sandy, with soddy layered soils; 7 — near-channel high hollow-island floodplains with soddy and meadow soils, sandy loam-sandy; 8 — low floodplain terraces, loamy-sandy, with sod-podzolic and podzolized chernozem soils; 9 — high central and terrace-like hollow-island floodplains, sandy-loamy, with meadow soils

разветвленным неустойчивым руслом. Подвижные галечные осерёдки (ПТК 1 и 2, рис. 5) при появлении растительности и отложении песчаных наносов трансформируются в элементарные острова низкого и среднего уровня, зарастающие кустарником и мелколесьем (ПТК 3 и 4), крупные островные массивы (ПТК 5 и 6) и береговую песчано-суглинистую ложбинно-островную пойму (ПТК 7 и 9) с луговыми и лесными комплексами. При этом режим формирования ПТК сменяется от проточного к умеренному, а врезание русла способствует

постепенной трансформации пойменных ПТК в террасовые (ПТК 9). Подвижность галечного аллювия предопределяет появление растительности только на высоких побочнях и осерёдках, а неустойчивость русла — возможность разрушения урочища на любом этапе его формирования и возвращения к галечным русловым формам.

Изменения руслового и гидрологического режима реки сопровождаются изменением ландшафтной структуры поймы; новая тенденция их развития приобретает направленный характер. Трансфор-

мация уже существующих ПТК продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие, соответствующее новому сочетанию факторов. Чаще всего такие процессы имеют региональный характер. Эволюционные ряды отражают вертикальные смещения природных комплексов, которые могут иметь естественные причины, но чаще всего они связаны с изменениями уровня режима при регулировании стока гидроузлами, с «посадками» уровней при карьерных разработках в русле, со строительством инженерных сооружений, регулирующих растекание воды по пойме.

Для оценки степени хозяйственного освоения пойм рек РФ была разработана 10-балльная шкала с тремя основными направлениями хозяйственной деятельности в поймах: 1) сельское хозяйство; 2) промышленно-селитебное освоение; 3) лесное хозяйство. Неиспользуемые и крайне редко посещаемые населением поймы в заповедниках, в труднодоступных верховьях тундровых, горных и таежных рек оцениваются в 0 баллов. 10 баллов означает ликвидацию поймы как физико-географического объекта: обвалование, засыпку, создание техногенной террасы с многоэтажной жилой и промышленной застройкой, городскими почвами (урбоземами), газонами, парками и скверами, искусственной системой стока воды и дренажа. Были описаны пять подобных террас — в Москве, Санкт-Петербурге в дельте Невы, в г. Междуреченске на стрелке слияния Томи и Усы, в Омске и в Ивангороде на р. Нарве, но в разной степени засыпка и обвалование пойм под жилую, промышленную и общественную застройку производятся во всех расположенных на реках крупных и средних городах.

Градация 1–2 балла подразумевает точечное и редкое использование пойменных угодий: охота, рыбалка, неорганизованный туризм с соответствующей инфраструктурой (тропы, домики, балки, кордоны, стоянки). К этой градации относятся единичные переходы ЛЭП, трубопроводов, расположенные на пойме одиночные скважины, вышки связи, лесосклады, малолюдные деревни. Основной признак ранга — отсутствие широкой сельскохозяйственной деятельности. Расположенные на бортах речной долины города и поселки, даже относительно крупные (Нарьян-Мар, Дудинка, Сунтар), на пойму почти не влияют.

Градация 3–4 балла означает очаговое и местное использование поймы для пастбищно-сенокосного животноводства и отгонного оленеводства; 3 балла — локального, ориентированного на местные нужды, 4 — товарного, с сетью ферм, сельских поселений, связанных грунтовыми и грейдерными

дорогами, часто приподнятыми выше максимального уровня затопления, осушительными каналами. На этом уровне в городах и поселках на пойму выносятся отдельные предприятия, цеха, склады, отстойники, обычно расположенные в притеррасной зоне; судоремонтные заводы, мастерские и оборудованные портовые затоны, водозаборы — в прирусловой; связанные дорогами кусты скважин нефте- и газодобычи; единичные карьеры. Селитебного освоения поймы еще нет, промышленное — носит очаговый характер. Для лесохозяйственного освоения характерны местные вырубki и просеки, обустройство лесоперевалок — лесосклады, дороги, площадки формирования плотов и т. д. Сплошных вырубok леса на поймах не производится, за исключением некоторых речных пойм на Урале, в Карелии, Западной Сибири и Архангельской области (градация 7в).

Градация 5–6 баллов — местное использование ресурсов пойм, выходящее за пределы сельских и городских анклавов. Это сплошное использование поймы для пастбищ и сенокосов, для мелиорации на ее больших отрезках и распашка 30–50% площади. Промышленно-селитебное освоение характеризуется строительством на пойме не только промзон, но и дачных, и коттеджных поселков, прокладкой дорог на высоких насыпях, частичным обвалованием, засыпкой пойменных проток, берегозащитными сооружениями, созданием парков и скверов. Насыпи и дамбы в значительной степени ограничивают затопление поймы и разбивают ее поверхность на незатопляемые ячейки.

7–8 баллов — полная распашка и мелиорация поймы, создание полейдеров и обвалованных рисовых чеков с регулируемым водным режимом, использование пойм для садоводства, виноградарства, тепличного хозяйства; густая сеть сельских поселений, защищенных дамбами; регулируемый дамбами и водопропусками пойменный поток. На малых реках степного Крыма — Салгире, Каче, Индоле — вода зачастую отводится из основного русла в каналы в притеррасной части поймы. Этот уровень определяет почти полную застройку поймы, как малоэтажную, так и высотную. Подобная застройка ведется как на отсыпках, так и на пойменной поверхности, что не исключает периодического затопления. Естественные урочища сохраняются только на неудобьях и на охраняемых территориях.

9-балльный уровень использования поймы — ее превращение в техногенную террасу с регулируемым стоком воды и затоплением, с дамбами и отсыпками, искусственными насаждениями или городскими и дачными кварталами.

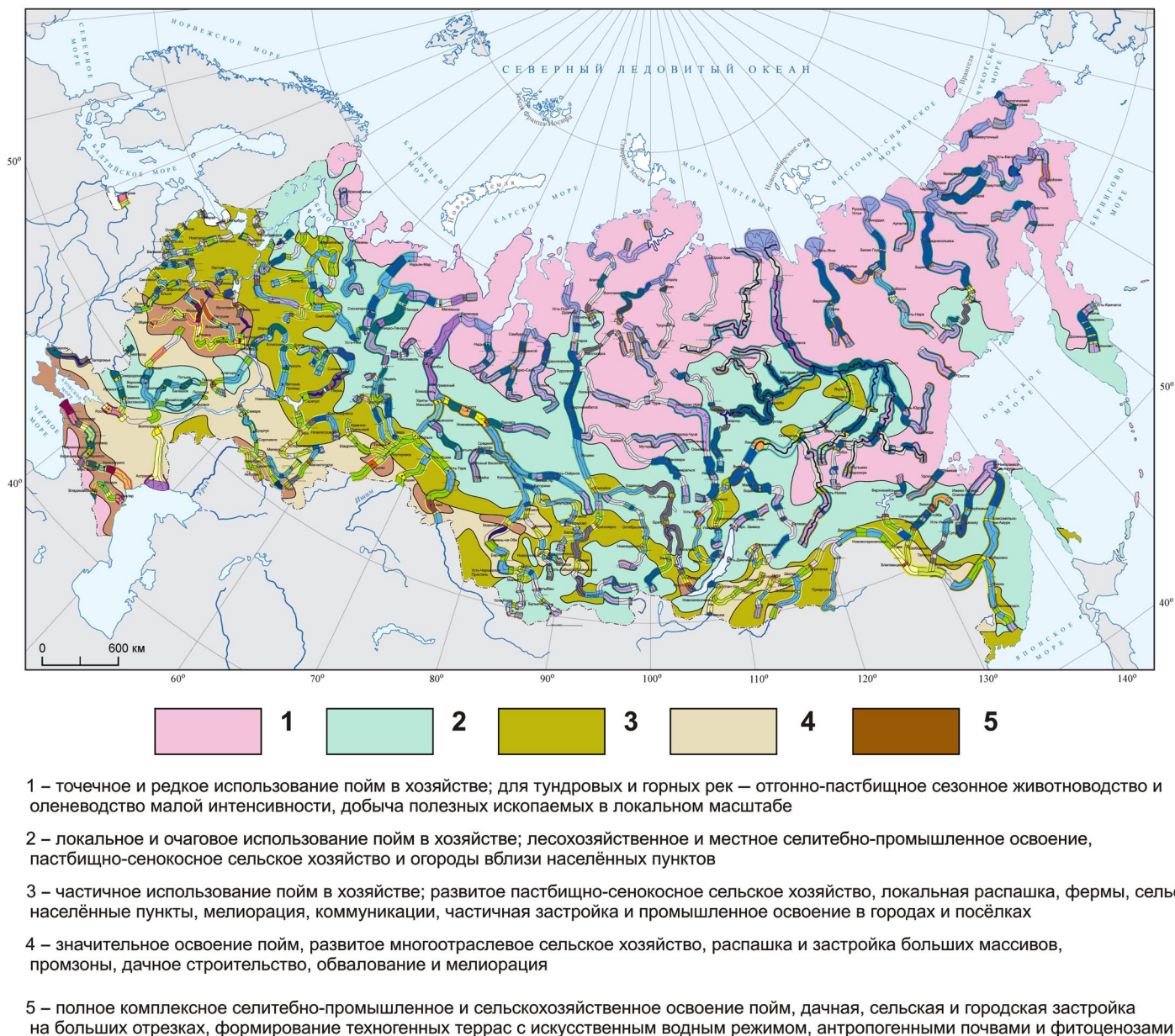


Рис. 6. Карта-схема хозяйственной освоенности пойм больших и средних рек РФ

Fig. 6. Map-scheme of economic development of floodplains of large and medium-sized rivers of the Russian Federation

На основе балльной оценки была разработана методика картирования пойм больших и средних рек РФ, которая отражает зональность хозяйственной деятельности на них (рис. 6).

III. СТОК НАНОСОВ

Технологии изучения стока наносов

Сток наносов — связующий процесс в речном бассейне. Именно транспорт наносов водотоками всех уровней, от временных до постоянных, опре-

деляет взаимосвязь эрозии на водосборе и русловых процессов. Теория стока наносов в СССР развивалась преимущественно в двух направлениях — гидролого-географическом и гидродинамическом (ведущие научные школы в этой области сформировались в Казанском университете, ИВП РАН, на физическом факультете МГУ, в Государственном гидрологическом институте). Позже в трудах Н.И. Алексеевского была разработана теоретическая концепция, объединяющая географо-гидрологический и гидродинамический подходы к изучению

процессов формирования и перемещения наносов, учитывающая физические, географо-гидрологические особенности возникновения и трансформации потоков литогенного материала в водных объектах на локальном, региональном и глобальном уровне рассмотрения денудационных процессов (Алексеевский, 1998). Большое внимание уделялось исследованию уравнения баланса наносов для значимых частей эрозионно-аккумулятивного комплекса и эрозионно-русловой системы, в основном малых водосборов (Сидорчук, 2015). Независимо от этого в рамках геохимии ландшафтов развивалось учение о механической миграции вещества.

Выполняемые сегодня работы, основанные на разнообразных численных и натурных технологиях измерения стока наносов, позволили существенно расширить спектр исследований стока наносов. Возникли возможности для уточнения глобальных оценок стока наносов, исследования источников поступления наносов в крупных речных бассейнах, понимания закономерностей дифференциации химического состава наносов. Таким образом, следует говорить о двух направлениях теории стока наносов, географо-гидрологическом и гидрогеохимическом, которые получили существенное развитие и определили современные исследования, выполняемые в этой области на географическом факультете МГУ.

Важнейшей вехой в развитии мониторинга характеристик стока наносов является внедрение автоматических натурных средств и дистанционных методов. Применительно к мутности воды активно развиваются оптический (фотометрический), акустический, дистанционный и лазерный методы детектирования. Общим для всех этих средств измерения являются возможности высокого пространственного и временного разрешения и охвата, недоступные для традиционных средств. При этом разные методы дополняют друг друга: оптические методы позволяют реализовать высокочастотные измерения мутности воды (регистрируется характеристика, называемая оптической мутностью T и измеряемая стандартно в нефелометрических единицах мутности, NTU); акустические доплеровские профилографы позволяют получить распределение взвешенных частиц в пределах поперечного сечения рек на основе интенсивности отражения акустического сигнала; спутниковые снимки дают информацию о приповерхностной мутности воды на больших площадях водных объектов.

Все методы основаны на разных закономерностях отражения (рассеяния) света от частиц, взвешенных в воде. Зависимость этих свойств отраже-

ния (рассеяния) зависит от размера и формы этих частиц, их минералогического и петрографического состава, наличия органики и др., что определяет региональные особенности пересчета косвенных характеристик в значения весовой мутности (SSC , мг/л). Применительно к оптическим методам используется линейная аппроксимация (Алексеевский и др., 2013; Ankcorn, 2003; Chanson, Takeuchi, Trevethan, 2008; Gippel, 1995; Gray, Gartner, 2009; Pavanelli, Bigi, 2005) между переменными:

$$SSC = \alpha + \beta T, \quad (1)$$

где α и β – эмпирические параметры.

Рядом авторов используется также степенная (Davies-Colley, Smith, 2001; Lewis, 1996; Zimmermann, Lapointe, 2005) и логарифмическая (TMDL team, 2006; Lewis, 2001) зависимость. Региональные зависимости между SSC и T рассмотрены в работах (Белозерова, Чалов С.П., 2013; Промахова, 2016) и обобщены в (Чалов, 2024). В общем случае, при четком подборе рек-аналогов, в первую очередь по генезису взвеси и ее крупности, сходным геолого-геоморфологическим особенностям и режиму хозяйственной деятельности, возможно использование типовых региональных зависимостей.

Сложные картины распределения взвесей в русловом потоке открываются с помощью лазерных дифрактометров, помимо мутности воды измеряющих крупность взвесей. Измерение гранулометрического состава взвесей с помощью лазерной дифракции заключается в следующем: мощность создаваемого лазерного луча измеряется специальным датчиком (LREF); затем луч подвергается коллимации (COL), то есть создается параллельно идущий поток излучения. Далее лазерный луч проходит через пропускающее стекло (TW) и попадает в среду (SV), где рассеивается на частицах под разными углами. Светофильтр используется для подавления дневного света, причем углы после рассеяния частицами не изменяются. После этого рассеянные отфильтрованные лучи попадают в фокальную плоскость приемного объектива, где установлена фокусирующая линза (FL), которая перенаправляет лучи на кольцевой детектор (RD), представляющий собой набор кремниевых 60-градусных дуг, где каждая дуга охватывает небольшой диапазон углов рассеяния, а кольцевидная форма используется для достижения стабильности инверсии. Происходит преобразование набора измерений рассеяния света под многими углами в гранулометрический состав. Проведенные тестовые измерения прибора на малых реках Москвы (Чалов, Лошков, Крастынь, 2024) показали исключительную перспективность его применения.

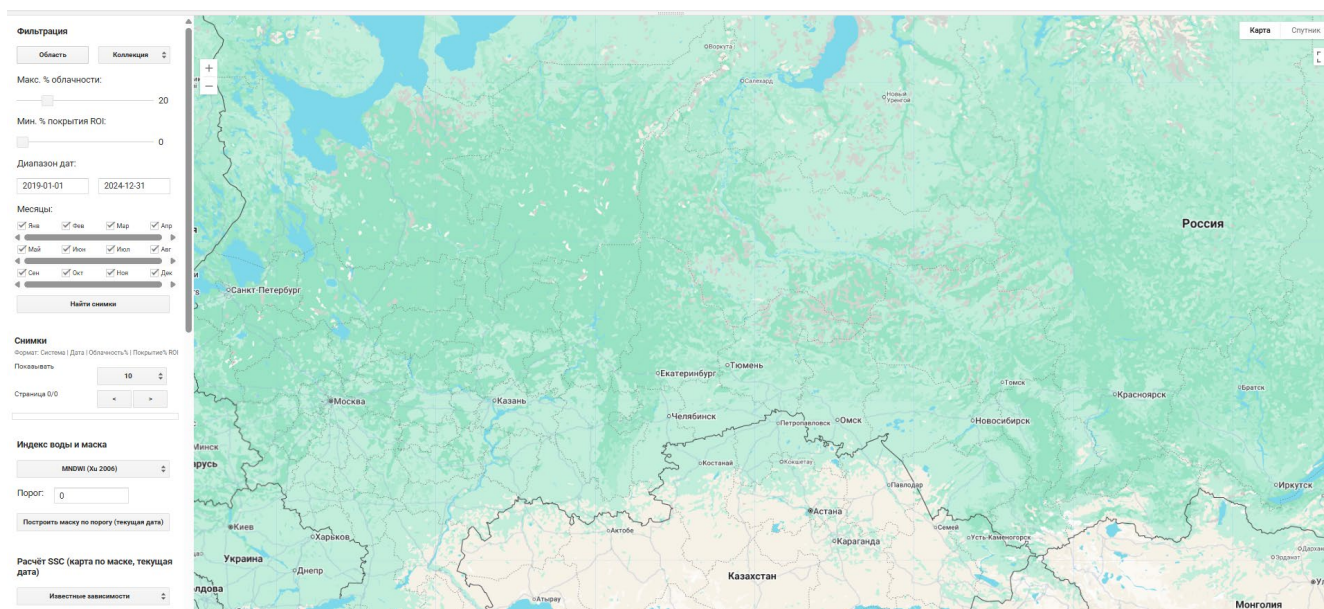


Рис. 7. Общий вид программного модуля TripleS на платформе Google Earth Engine

Fig. 7. General view of the TripleS software module on the Google Earth Engine platform

Наконец, в последние годы значительно выросла роль применения дистанционных данных в изучении стока наносов. Изучение характеристик поверхностных вод, в том числе мутности воды, с помощью методов дистанционного зондирования проводится относительно давно (Carlson, 1976; Nduaguba D.C., 1976; Кравцова и др., 1974; Лабутина и др., 1976). В их основе лежит сопоставление значений коэффициентов спектральной яркости пикселей, полученных в спектре разных длин волн, с измеренной мутностью воды, что позволяет получить региональные или потенциально — универсальные зависимости для расчета мутности поверхностных вод по снимкам. В то же время в последние годы значительно увеличилось возможности автоматизации этого метода. В НИ-Лаборатории эрозии почв и русловых процессов был разработан программный модуль Surface Suspended Sediment (TripleS) для автоматизированного определения мутности воды по спутниковым снимкам Landsat и Sentinel. Разработка была обусловлена необходимостью превратить дистанционные оценки мутности воды из набора разрозненных процедур в целостный исследовательский подход. Несмотря на высокую информативность спутниковых данных, их использование в работах по мутности воды и стоку взвешенных наносов долгое время оставалось трудоемким и несистемным: значительная часть усилий уходила на подготовку и согласование материалов.

Создание TripleS позволило объединить этапы обработки в единой рабочей среде и тем самым сделать возможным регулярный анализ больших архивов спутниковых наблюдений Landsat и Sentinel за много лет.

TripleS реализован на платформе Google Earth Engine (GEE) в виде интерактивного JavaScript-приложения; его общий вид представлен на рис. 7. Выбор платформы GEE определяется тем, что она объединяет доступ к многолетним архивам спутниковых данных и вычислительные ресурсы для их обработки, что хорошо зарекомендовало себя в научных исследованиях.

Доступ к приложению осуществляется через веб-интерфейс Code Editor без необходимости локальной установки программного обеспечения. TripleS работает с двенадцатью коллекциями спутниковых снимков, доступными непосредственно в каталоге GEE: Landsat 4—9 (уровни обработки TOA и SR, коллекция C02) и Sentinel-2 (уровни L1C и L2A, гармонизированные коллекции). Для выделения водной поверхности реализованы пять индексов: MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), LSWI (Land Surface Water Index), а также AWEI (Automated Water Extraction Index) в двух модификациях — без учета теней (AWEInsh) и с их учетом (AWEIsh). Пороговое значение индекса задается пользователем вручную, что позволяет адаптировать маску воды к конкретным условиям

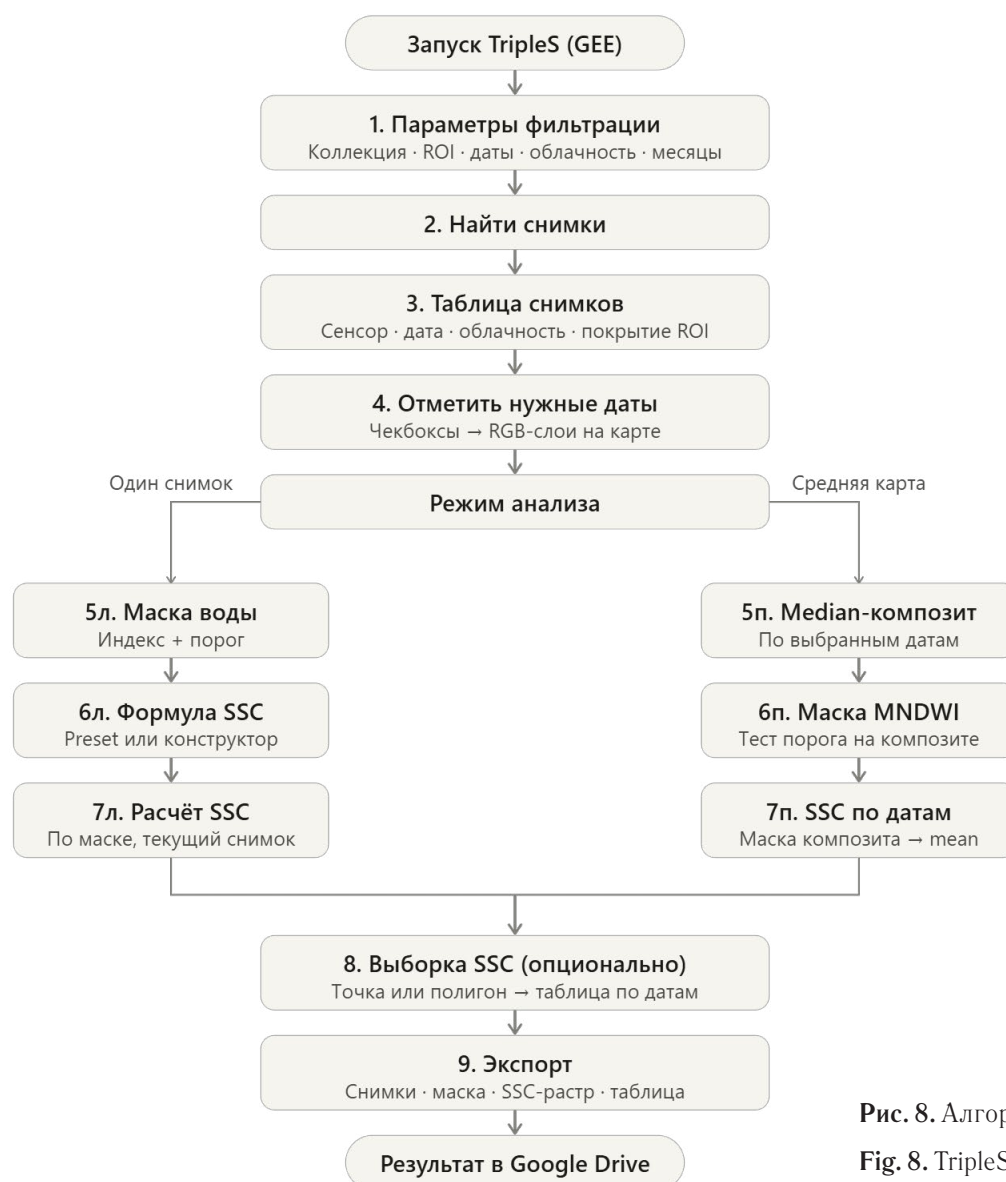


Рис. 8. Алгоритм работы модуля TripleS

Fig. 8. TripleS module operation algorithm

съемки. Расчет концентрации взвешенных веществ выполняется по набору из более чем тридцати эмпирических зависимостей, калиброванных для различных речных систем мира, либо по пользовательской формуле, задаваемой в конструкторе выражений. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 8.

Исследования баланса наносов крупных речных бассейнов

Новые технологии привели к появлению данных о балансе наносов как малых, так и крупных речных бассейнов. Важным направлением исследований стали временные реконструкции баланса наносов, позволившие восстановить трансформацию источников поступления наносов в реки в связи с гидроэ-

нергетическим строительством или развитием горнодобывающей деятельности. Много работ было направлено на оценку (в том числе сравнительную) баланса наносов речных бассейнов (Hinderer, 2012; Tena and Batalla, 2013; Frings et al., 2014; Reid and Dunne, 2016). Мы сопоставили характеристики стока взвешенных наносов WR рек бассейна Дона ($n = 28$) и Оби ($n = 26$) с расчетными значениями объемов бассейновой эрозии водосборов $W_{эр}$. На рис. 9 показано отношение стока наносов и различных процессов формирования стока наносов (K) относительно площади водосборов F . В оценку включены показатели эрозии на водосборе ($K_{эр}$), эрозии на водосборе и в руслах рек ($K_{эр} + K_{русл}$); эрозии на водосборе и деятельности ледников ($K_{эр} + K_{ледн}$); эрозии на водосборе и в руслах рек и объема

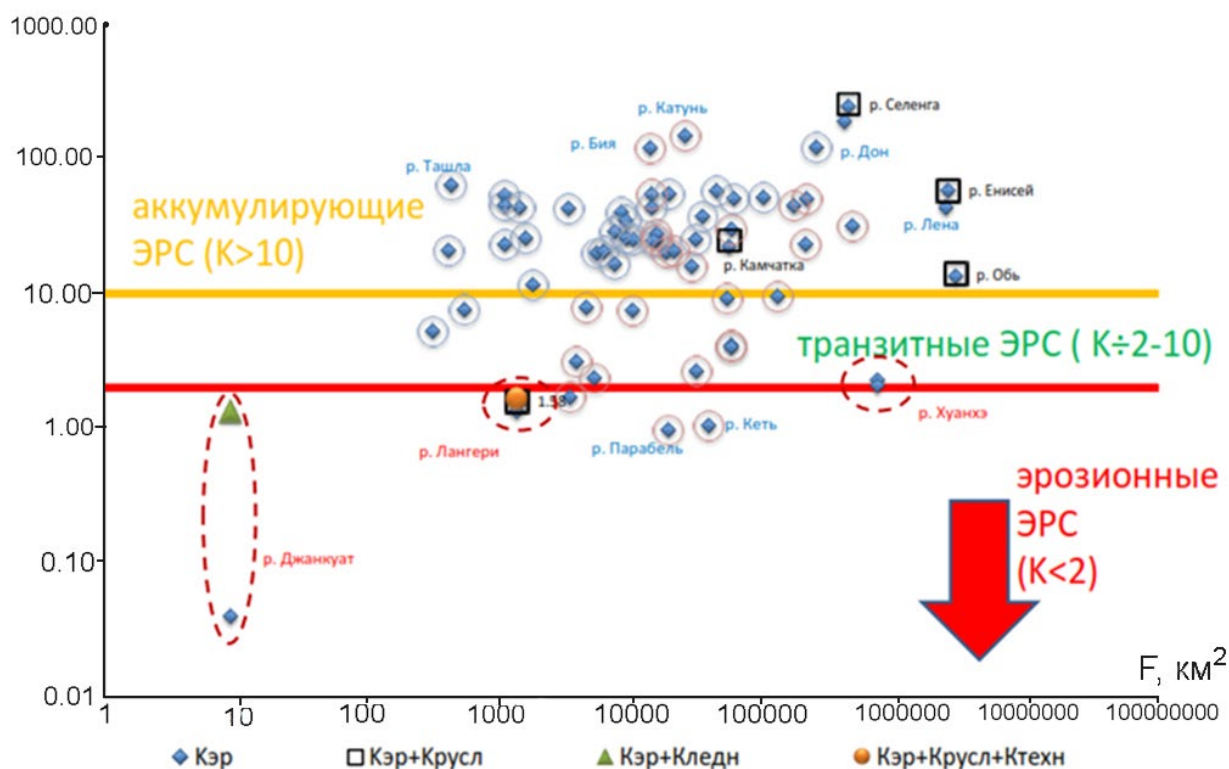


Рис. 9. Связь площади ЭРС F и коэффициентов масштабной редукции K для рек России, оцененных относительно разных источников перемещения массы грунта. Синими кругами обведены посты в бассейне р. Дон, красными — в бассейне р. Обь. Обозначения в тексте

Fig. 9. Relationship between the area of the ERS F and the scale reduction factors K for Russian rivers, estimated relative to different sources of soil mass movement. Blue circles indicate stations in the Don River basin; red circles indicate stations in the Ob River basin. Legend in the text

техногенных потоков наносов, связанных с горно-добывающей деятельностью ($K_{\text{эр}} + K_{\text{русл}} + K_{\text{техн}}$). В бассейнах малых рек ключевую роль играют местные факторы формирования стока наносов — ледниковая экзарация (р. Джанкуат) или объемы техногенного стока, например, сбросы сточных вод с территорий разработок (р. Лангери). Именно в этом масштабе существуют эрозионные водосборы, где объемы выноса за пределы системы превосходят объемы аккумуляции ($K < 2$). Существуют примеры эрозионных бассейнов и у более крупных рек. К ним относится бассейн р. Хуанхэ, где до проведения противоэрозионных мероприятий $K_{\text{эр}}$ был равен 2, а в условиях снижения эрозии в результате масштабных противоэрозионных мероприятий с 2.23×10^9 до 1.7×10^9 и сокращения стока наносов р. Хуанхэ с 1.08×10^6 до 0.75×10^6 т/год (Chalov et al., 2018) $K_{\text{эр}}$ увеличился до 2.24 (трансформация режима от транзитного в транзитно-аккумулятивный). Важнейшую роль в этом сыграла аккумуляция наносов в водохранилищах. Зависимость $K = f(F)$ отражает влияние широтной зональности на закономерности баланса наносов. В пределах южных

освоенных территорий величины $K_{\text{эр}}$ значительно выше по сравнению с северными территориями. Так, для рек бассейна Оби $K_{\text{эр}}$ меняется от 1 до 146 (среднее — 26.5, $n = 25$), в бассейне р. Дон — от 5 до 121 (среднее — 36.2, $n = 28$). При этом максимальные значения ($K > 100$) на территории бассейна Оби характерны для самых южных и наиболее освоенных ее притоков — бассейнов р. Катунь и р. Бии. Среди вошедших в оценку водосборов самые высокие значения K характерны для бассейна р. Селенги, где показатель эродированности почв характеризуется экстремальными значениями в 90%, связанными с тем, что от 70 до 90% площади степных и лесостепных районов в начале 90-х гг. XX в. находилось под сельскохозяйственными угодьями (Баженова, Кобылкин, 2013), и одновременно на значительной части бассейна наблюдался перевыпас скота (Onda и др., 2007).

Исследования стока наносов крупнейших рек выявили упомянутую выше закономерность того, что сток наносов в крупнейших бассейнах рек РФ (Оби, Енисея, Лены и Колымы) в современных гидроклиматических условиях значительно ниже мас-

сы наносов, перемещаемых эрозионными процессами на водосборе и в руслах рек (Chalov, Ivanov, 2023). Объемы бассейновой и русловой эрозии (1400 Мт/год для Оби, 331 Мт/год для Енисея, 1100 Мт/год для Лены) и сток наносов в замыкающих створах этих рек (63.5 Мт/год для Оби, 32.5 Мт/год для Енисея и 38.6 Мт/год для Лены) отличаются на порядок значений. По мере роста бассейна доля аккумуляции наносов в результирующем балансе увеличивается. Составляющие баланса наносов подчиняются широтной зональности. Интерактивная база данных о динамике берегов рек Северной Евразии представляет собой обобщение сведений по более чем 140 000 км русел и 626 772 участкам рек Вислы, Волги, Урала, Сакмары, бассейна Оби, Оки, Надыма, бассейна Енисея, бассейна Лены, Индигирки, Яны, Мессояхи, бассейна Колымы, Амура, Камчатки, малых рек Московского региона, бассейна Кудьмы, бассейна Селенги и Уссури. В ней объединены результаты полевых измерений, дешифрирования спутниковых снимков (Landsat, Sentinel, Keyhole) и аэрофотосъемки с беспилотных

летательных аппаратов и сведены такие данные по участкам рек (длиной от 100 м до 2 км), как: средние и максимальные скорости отступления берегов (м/год); площади и объемы размыва; вынос наносов в результате боковой эрозии. Описание базы данных опубликовано в журнале *Earth System Science Data* (Q1; Journal Impact Factor 2024: 11.6; 5-летний IF: 13.9), а также в виде открытой системы <https://map.giscarta.com/viewer/93a6a4b3-179f-450f-be02-a31ca6db245b> и репозитория <https://zenodo.org/records/15965461>.

На основе интерактивной базы даны оценки степени увеличения характеристик размывов берегов рек криолитозоны по сравнению с реками за ее пределами — рек бассейнов Оби, Енисея, Лены и Колымы. Выявлено, что масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, площади размывов и скорости отступления берегов в криолитозоне оказались на 40–55% выше, чем за ее пределами (рис. 10). Статистический анализ с применением критерия Манна — Уитни выявил значимые различия (p -value < 0.05) в характеристиках

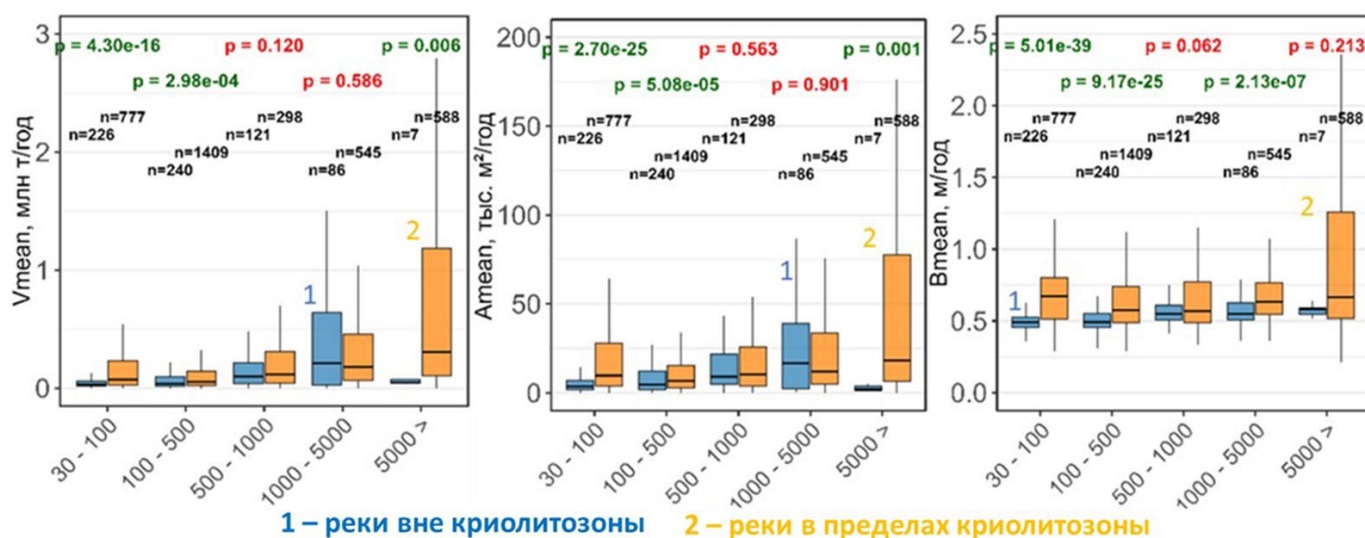


Рис. 10. Диаграмма размаха для параметров русловой эрозии: совместное влияние расходов воды и мерзлотных условий. n — количество 10-км участков русла, p — p -value критерия Манна — Уитни, значимость различий между характеристиками русловых деформаций в криолитозоне и за ее пределами: зеленый — значимые различия, p -value < 0.05; красный — незначимые различия; статистика размывов, приведенная на диаграмме размаха: белый прямоугольник — границы 25% и 75% квантилей (Q1 и Q3), жирная линия внутри — медианное значение; линиями, отходящими вниз и вверх от прямоугольников, обозначены доверительные интервалы, равные $\pm 2,7\sigma$

Fig. 10. Boxplot for channel erosion parameters: the combined effect of water discharge and permafrost conditions. n is the number of 10-km channel sections, p is the Mann-Whitney U-test p -value, and the significance of differences between channel deformation characteristics in and outside the permafrost zone: green indicates significant differences, p -value < 0.05; red indicates insignificant differences. Erosion statistics presented in the boxplot: the white rectangle represents the 25% and 75% quantiles (Q1 and Q3), the thick line inside represents the median value; the lines extending downward and upward from the rectangles indicate confidence intervals equal to $\pm 2.7\sigma$

русловых деформаций для участков русла в криолитозоне и вне ее для всех групп расходов, кроме диапазона 500–1000 м³/с (рис. 10). Для малых и средних рек все характеристики размывов значительно выше в криолитозоне. Для рек со среднегодовым значением расхода воды в диапазоне (30–100 м³/с) масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, на 45% больше в криолитозоне, чем за ее пределами (медианное значение составляет 85 тыс. т/год, за пределами криолитозоны – 58 тыс. т/год), площадь размывов больше на 50% (11.2 тыс. м²/год в криолитозоне против 7.5 тыс. м²/год за ее пределами), линейное отступление берегов больше на 55% (0.72 м/год в криолитозоне и 0.46 м/год за ее пределами); для рек с расходом воды в диапазоне от 100 до 500 м³/с масса наносов, поступающих в результате русловой эрозии в криолитозоне, больше на 40% (78 тыс. т/год в криолитозоне против 55 тыс. т/год за ее пределами), площадь размывов больше на 38% (9.8 в криолитозоне и 7.1 тыс. м²/год за ее пределами), отступление берега больше на 42% (0.68 м/год в криолитозоне и 0.48 м/год за ее пределами). Для больших рек (1000–5000 м³/с) статистическое различие наблюдается только для линейного отступления берегов: в криолитозоне отступления больше на 60% (0.92 м/год против 0.58 м/год), хотя наблюдаются и статистически незначимые различия как по массам наносов, поступающих в результате русловых деформаций (210 тыс. т/год против 225 тыс. т/год), так и по площадям размывов (18.5 тыс. м²/год против 20.1 тыс. м²/год). Для самых крупных рек в криолитозоне (>5000 м³/с) масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, выше на 50% (1250 тыс. т/год против 830 тыс. т/год), площадь размывов выше на 55% (95 тыс. м²/год против 61 тыс. м²/год, $p = 0,001$); для скорости отступления берега значимые различия не выявлены.

Гидрогеохимические исследования речных наносов

В гидролого-геохимических исследованиях можно выделить несколько основных направлений: оценка содержания химических веществ и соединений в составе речных наносов; определение источников поступления взвешенного вещества в реки и оценка загрязнения речных наносов в речных бассейнах; исследование гидродинамических закономерностей дифференциации химического состава наносов.

Определение химического состава взвешенных наносов — актуальная тема как фундаментальных, так и прикладных исследований. Учитывая тот факт, что системы государственного стационар-

ного мониторинга во всем мире ориентированы на растворенные формы химических веществ, изученность химического состава взвесей — белое пятно в исследованиях русловых потоков. Концентрации химических элементов в речных наносах зависят от распространенности химических элементов и от особенностей их коэффициента подвижности в данных условиях, гидрологической обстановки, характера русловых процессов, что определяет их высокую пространственную и временную вариабельность. Активное развитие аналитической химии (появление масс-спектрального анализа) определило возможности создания массивов данных о составе взвешенных наносов и на основе региональных исследований позволило получить ряд обобщений о химическом составе взвешенных наносов. В работе В.В. Гордеева, датированной 1978 г. и в дальнейшем опубликованной в 2009 г. (Гордеев, 2009), приведен средний химический состав взвесей рек мира, основанный на материалах по 100 рекам. В работе В.С. Савенко (Савенко, 2006) были суммированы данные о среднем содержании оксидов главных петрогенных элементов во взвесах 128 рек мира, а также микроэлементов и биогенов. Последнее крупное обобщение выполнено в работе (Viers, Dupré, Gaillardet, 2009) и для некоторых элементов включает в себя данные до 164 рек. С учетом вариабельности состава взвешенных наносов более перспективными представляются детальные региональные исследования. Подобная программа, в 2018–2021 гг. охватившая разные фазы водного режима, была реализована в нижнем течении крупнейших рек России — Оби, Енисея, Лены и Колымы — и привела к появлению наиболее подробной оценки состава наносов (табл. 4). Сведения о химическом составе взвешенных наносов лежат в основе исследований происхождения речных наносов в бассейнах. Для них традиционно используют относительные коэффициенты концентрации K_c , показывающие, во сколько раз содержание элемента x в речных наносах C_i превышает их кларковые или фоновые значения C_0 , либо концентрационные функции речных наносов, показывающие отличие содержания элемента в наносах от содержания элемента в составе пород, слагающих бассейн. Показательны также характеристики расхода взвешенных и влекомых наносов и характеристики гранулометрического состава наносов. В частности, модальность распределения гранулометрического состава (экстремумы функции распределения i -той фракции в составе наносов) характеризует наличие преобладающих источников разного типа, в частности бассейновой и более крупной русловой фракции (Чалов, Ефимов, 2021). Применение подобной оценки для крупнейших арктических рек (Обь, Енисей,

Таблица 4. Содержание ММ (металлов и металлоидов) в составе взвешенных наносов и средние расходы ММ в период открытого русла в замыкающих створах рек

Table 4. Content of ММ (metals and metalloids) in the composition of suspended sediments and average ММ discharges during the open-channel period in the outlet sections of rivers

Элемент	Средние концентрации ММ в период открытого русла, мкг/г			
	Обь (n = 78)	Енисей (n = 60)	Лена (n = 67)	Колыма (n = 230)
Fe	66 215	46 508	60 648	45 427
Al	55 790	50 334	99 249	72 695
Mn	2751	1239	2386	1812
Zn	270	141	254	194
Sr	145	198	292	159
Cr	100	101	119	104
Zr	92	60	140	90
V	87	87	129	125
Ni	50	52	56	40
Cu	35	45	46	37
Pb	27	19	31	25
As	24	4.92	8.66	21
Co	18	21	25	16
Sn	6.89	2.20	3.17	5.03
Cs	3.84	2.65	4.71	4.57
U	2.09	2.05	3.78	2.04
W	1.01	0.62	1.50	1.23
Sb	0.94	0.81	0.58	1.23
Cd	0.36	0.38	1.33	0.33
Mo	0.20	1.06	0.90	1.48

Лена и Колыма) позволило установить, что бассейновая составляющая стока взвешенных наносов в нижнем течении рек меняется от 34 (Енисей) до 62% (Колыма). Доля бассейновой составляющей увеличивается во взвесах Лены и Колымы за счет поступления продуктов разрушения обнажений многолетнемерзлых пород (едом) в бортах долин и антропогенной деятельности (рис. 11).

Актуальной тематикой становится изучение происхождения органического углерода и его миграции по русловым потокам. Считается, что в метровом слое почв захоронено около $1550 \cdot 10^9$ т органического углерода и $950 \cdot 10^9$ т неорганического углерода, что почти в 3 раза больше, чем объем

углерода в атмосфере (Lal, 2004). В результате разрушение почвы приводит к мобилизации огромных количеств органического углерода, и этот процесс дополнительно усиливается за счет высвобождения древнего углерода, захороненного в толще многолетнемерзлых пород, имеющих тенденцию к массовому разрушению в арктических бассейнах (Chalov и др., 2025). Существующие глобальные базы данных о содержании взвешенного углерода в почвах (Hengl et al., 2017) в совокупности с моделями бассейновой и русловой эрозии позволяют выполнить покомпонентную оценку эрозионных источников поступления углерода в реки. В глобальном масштабе выполненные оценки (Zheng et al., 2025) свидетельствуют о том, что в Мировой океан поступает около $0.71\text{--}1.06 \cdot 10^9$ т углерода, что составляет 3–5% от стока наносов рек мира (Чалов, 2025). Наши расчеты годового поступления взвешенного углерода в крупные водохранилища Сибири показали, что в Колымское водохранилище поступает $1.195 \cdot 10^6$ тС/год, в Саяно-Шушенское — $1.741 \cdot 10^6$ тС/год, в Богучанское — $0.110 \cdot 10^6$ тС/год, в Зейское — $0.848 \cdot 10^6$ тС/год, в Бурейское — $0.535 \cdot 10^6$ тС/год. Русловая составляющая определяет от 12.1 до 38.5% формирования потоков ВОУ. При этом ближайшими задачами в развитие этой темы являются внедрение расчетной схемы в климатические модели (Дымников и др., 2022), верификация расчетов по данным мониторинговых наблюдений.

Наконец, третье направление гидрогеохимических исследований речных наносов было определено появлением эмпирических данных о распределении концентраций химических элементов в составе речных наносов в пределах локальных участков рек. Актуальность этих исследований определена тем, что вариабельность концентраций химических элементов и соединений в пределах поперечного сечения крупных рек превышает их сезонную и многолетнюю изменчивость. Так, коэффициенты вариации ряда значений концентрации микроэлементов в створе р. Колымы, по данным исследований 2019–2021 гг., превышали коэффициенты вариации этих же веществ для ряда из еженедельных концентраций (Ефимов и др., 2019). Существующие данные о распределении концентрации микроэлементов в составе взвешенных наносов по глубине рек (Chalov и др., 2020) позволяют предположить существование разных характерных систем распределения разных групп элементов в зависимости от их приуроченности к крупным или мелким фракциям речных наносов. Развитие этого направления исследований имеет важнейшее значение для организации мониторинга качества речных вод, особенно на крупных реках.

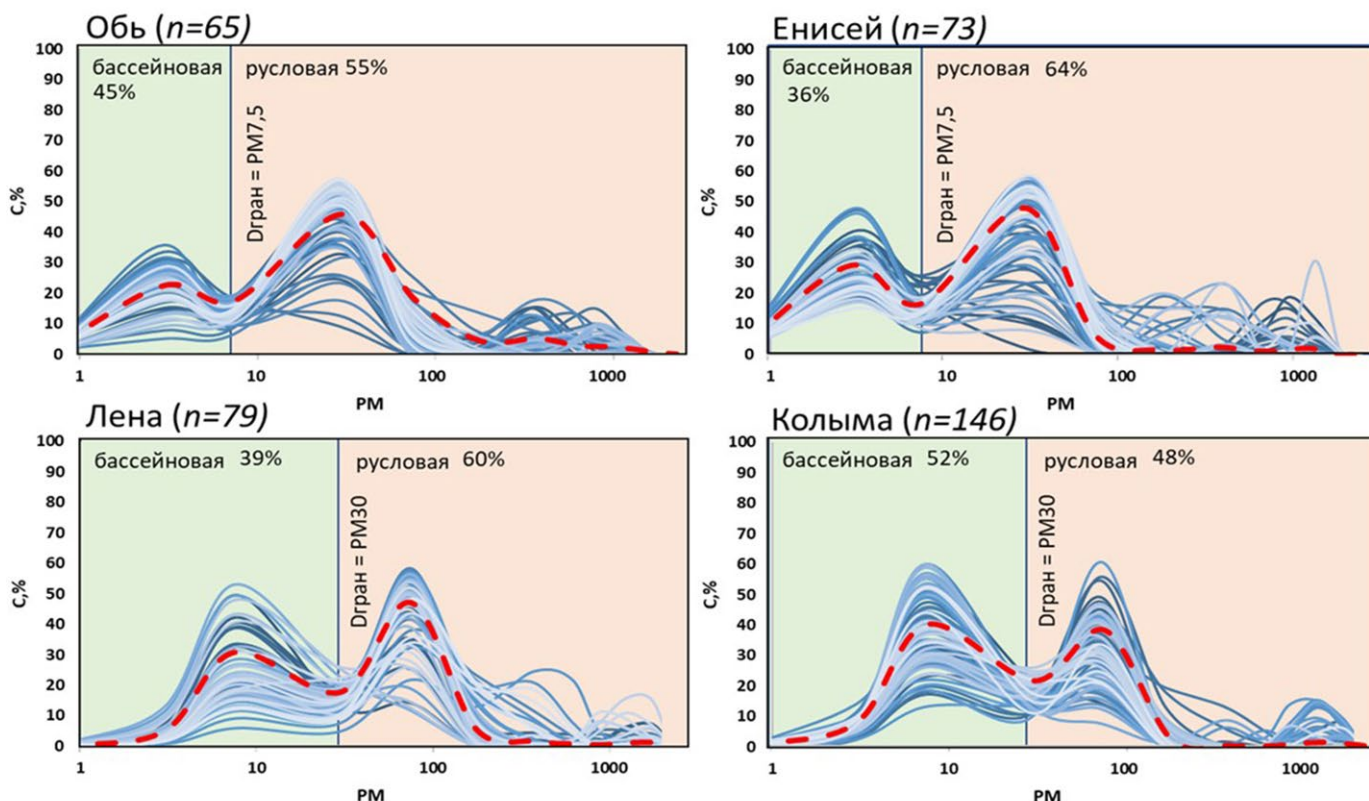


Рис. 11. Определение бассейновой и русловой фракций по данным гранулометрического состава

Fig. 11. Determination of basin and channel fractions based on granulometric composition data

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнутый прогресс в области количественных оценок смыва на пахотных землях обусловлен широким использованием данных дистанционного зондирования, что позволило получать достаточно детальные данные о ряде ключевых факторов эрозии почв на обширных пространствах. Однако дальнейшее совершенствование эрозионных моделей ограничивается отсутствием данных о водопроницаемости почв при различных типах их обработки, а также после уборки урожая. Сбор и систематизация данных о водопроницаемости почв позволят значительно повысить точность расчетов смыва на основе использования уже имеющихся физически обоснованных эрозионных моделей. Разработанная в НИЛабораии эрозии почв и русловых процессов технология применения повторного пробоотбора цезия-137 на обрабатываемых малых водосборах является перспективным направлением для оценки изменений темпов перераспределения наносов за различные интервалы времени. Внедрение методов машинного обучения, которые в настоящее время стали широко применяться, в том числе в науках о Земле, будет использоваться для картографирования процессов денудации в бассейнах горных рек, где поставщиком наносов с площади водосборов

является широкий набор экзогенных процессов. Это, наряду с дальнейшим совершенствованием расчетов связанности потоков наносов, позволит расширить достоверность расчетов бассейновой составляющей в стоке наносов малых и транзитных рек в горных странах.

Исследования пойм неразрывно связаны с изучением русловых и гидрологических процессов. Развитие русловедения во второй половине XX — первой половине XXI в. неопровержимо доказало неразрывную связь пойм с процессами в русле формирующей их реки. Это дало импульс новому направлению исследования пойм — структурно-динамическому, которое активно развивается в НИЛабораии эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева. Оно призвано рассматривать пойменные природные и природно-техногенные комплексы (и, шире, пойменно-русловые комплексы) как чрезвычайно подвижный объект, во всех видах его взаимодействия с окружающей средой, и развивать ландшафтно-индикационное направление в поймоведении. Динамика почвенно-растительного покрова и ландшафтов в целом рассматривается как показатель направленности, интенсивности, многолетнего и сезонного режима русловых деформаций и гидрологического режима

реки. Это позволяет, например (при ограниченности картографических материалов), восстанавливать рельеф поймы по мозаике ее природных урочищ, что с успехом применяется при создании и корректировке цифровых моделей рельефа. Внедрение методов математического моделирования в изучение пойменных, гидрологических и русловых процессов к настоящему времени превратилось в обязательный этап как фундаментальных исследований, так и рассмотрения прикладных вопросов. Все чаще современные подходы к изучению пойменно-русловых комплексов находят применение в разных отраслях народного хозяйства: научное обоснование проектных решений при строительстве мостовых переходов, водозаборных узлов, берегозащитных и противопаводковых сооружений; управление русловыми процессами в целях минимизации ущерба от гидрологических явлений (затопление, русловые деформации, ледовые заторы); разработка методов улучшения условий судоходства на внутренних водных путях РФ.

Транспорт наносов временными и постоянными водотоками выступает ключевым связующим звеном между эрозией на водосборах и русловыми процессами. Современные достижения в области численных методов и натурных измерений существенно расширили возможности изучения стока наносов, позволив уточнить его глобальные оценки, выявить источники поступления вещества и установить закономерности пространственной дифференциации химического состава. Внедрение автоматизированных средств и дистанционных методов стало важнейшим этапом развития мониторинга характеристик стока наносов, обеспечив получение данных о балансе наносов в речных бассейнах различных масштабов и возможность реконструкции его временной динамики в условиях возрастающего антропогенного воздействия. Установлено, что в крупнейших бассейнах России наблюдается несоответствие между объемами эрозионного материала и фактическим стоком наносов, что указывает на сложность внутрибассейновых процессов эрозии, аккумуляции и перераспределения. Особую актуальность приобретают исследования химического состава взвешенных наносов, а также происхождения и миграции органического углерода, играющих важную роль в формировании качества речных вод и глобальных биогеохимических циклов. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших регионально ориентированных исследований и совершенствования систем мониторинга, направленных на комплексное понимание трансформации эрозионно-русловых систем в современных гидроклиматических и антропогенных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова 1.13 «Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений».

ЛИТЕРАТУРА

Алабян А.М., Беликов В.В., Крыленко И.Н., Фингерт Е.А., Фёдорова Т.А. Ретроспективное моделирование экстремального наводнения на реке Ока в городе Рязани и оценка воздействия на городскую и транспортную инфраструктуру // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № S1. С. 1–10.

Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: изд-во МГУ, 1998. 202 с.

Алексеевский Н.И., Белозерова Е.В., Касимов Н.С. и др. Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. Т. 3. № 3. С. 60–65.

Алексюк А.И., Малахов М.А., Беликов В.В. Решатель задачи Римана для уравнений мелкой воды с разрывным дном // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660617, 2020.

Анненская Г.Н. Применение ландшафтного метода при изучении пойм крупных рек // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1963. № 4. С. 32–37.

Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И. и др. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69.

Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 456 с.

Безухов Д.А., Голосов В.Н., Панин А.В. Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-Европейской равнины // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 4. С. 73–84. DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84.

Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.

Беликов В.В., Васильева Е.С., Малюгин Н.Р., Головлев П.П., Завадский А.С. Численное моделирование работы берегозащитных сооружений на

участке р. Нюкжи // Гидротехническое строительство. 2025. № 12. С. 47–55.

Белозерова Е.В., Чалов С.Р. Определение мутности речных вод оптическими методами // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2013. Т. 6. № 5. С. 39–45.

Беркович К.М., Злотина Л.В., Рязанов П.Н. Эволюционный ряд островных и прирусловых природных территориальных комплексов поймы верхней Оби // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1983. № 2. С. 82–88.

Гирло Е.М., Чалов С.Р., Харченко С.В. Оценка поступления взвешенного вещества в реки методом трассировки источников наносов для решения задач управления урбанизированным водосбором // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 26–51.

DOI: 35567/1999-4508-2025-6-26-51.

Голосов В.Н. Количественная оценка перераспределения наносов в верхних звеньях флювиальной сети: достижения и проблемы // Геоморфология. 2008. № 3. С. 29–37.

Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М., ГЕОС. 2006. 296 с.

Голосов В.Н., Жидкин А.П., Петелько А.И. и др. Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований малого водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область) // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1321–1338.

Голосов В.Н., Кумани М.В., Иванова Н.Н. и др. Заиливание малого водохранилища в условиях климатических изменений и урбанизации водосбора (Поповский пруд, г. Курск) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 6. С. 51–62.

Голосов В.Н., Шамшурина Е.Н., Колос Г.И. и др. Пространственно-временные изменения эрозионно-аккумулятивных процессов на малом водосборе в северной части Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2024. № 5. С. 738–754.

Гордеев В.В. Система река — море и ее роль в геохимии океана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.28. М.: РАН, 2009. 36 с.

Грин А.М. Опыт стационарного изучения процессов стока и смыва. Современные экзогенные процессы рельефообразования. М.: Наука, 1970. С. 89–95.

Добровольский Г.В., Балабко П.Н., Стасюк Н.В. и др. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 5–13.

Дымников В.П., Залесный В.Б., Глазунов А.В., Степаненко В.М. Модели климата, геофизических пограничных слоев и деятельного слоя суши: памя-

ти В.Н. Лыкосова // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 4. С. 375–383. DOI: 10.31857/S0002351522040046

Ефимов В.А., Чалов С.Р., Магрицкий Д.В., Ефимова Л.Е. Оценка стока воды, концентраций наносов и химических веществ в устье реки Колымы по результатам полевых исследований 2019 г. // ЧЕТВЕРТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ. ГИДРОЛОГИЯ ОТ ПОЗНАНИЯ К МИРОВОЗЗРЕНИЮ. Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. СПб: Изд-во Санкт-Петербургский государственный университет, 2019. С. 1064–1069.

Жучкова В.К. Организация и методы комплексных физико-географических исследований. М.: МГУ. 1977. 186 с.

Жучкова В.К., Раковская Э.М. Методика комплексных физико-географических исследований. М.: Центр «Академия». 2004. 354 с.

Завадский А.С., Сурков В.В., Самохин М.А. Изменение режима затопления левобережной поймы р. Лены в районе г. Якутска // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. № 4. С. 110–124.

Завадский А.С., Сурков В.В., Чернов А.В. и др. Природные территориальные комплексы поймы р. Москвы в нижнем течении в условиях интенсивного хозяйственного использования // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 3–13.

Завадский А.С., Сурков В.В., Чернов А.В. и др. Трансформация пойменных ландшафтов под влиянием природных и антропогенных изменений окружающей среды (на примере Захарковской поймы р. Москвы) // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31. № 2. С. 166–177.

Завадский А.С., Фингерт Е.А., Ботавин Д.В., Головлев П.П. Современные подходы к обоснованию генеральных схем коренного улучшения судоходных условий (на примере сложноразветвленного участка реки Лены) // Гидротехнические сооружения водных путей: Сб. науч. тр.: Вып. 4. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. 2019. С. 148–160.

Злотина Л.В. Формирование и развитие пойменных геокомплексов на участках с различной устойчивостью русла (на примере верхней и средней Оби) // Деп. ВИНТИ. 1989. № 4679-89. 10 с.

Иванов М.М., Иванова Н.Н., Голосов В.Н. и др. Оценка изменений Чернобыльского загрязнения и темпов смыва пахотных почв путём повторного обследования // Почвоведение. 2024. № 9. С. 1251–1262.

- Кедич А.И., Голосов В.Н., Харченко С.В. Экзогенные процессы в прогляциальных зонах гор: количественные оценки и их точность // Учёные записки Казанского государственного университета. Серия Естественные науки. 2022. Т. 164, № 1. С. 109–134.
- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В. и др. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат. 1959. 372 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
- Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Головлев П.П., Сазонов А.А., Никитский А.Н. Верификация двумерной гидродинамической модели р. Лены у г. Якутск по разновременным данным космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 169–178.
- Кравцова В.И., Антонова С.Ю. Применение многозональной съемки для изучения и картографирования мелководий (на примере Северо-Восточного Каспия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1974. № 1. С. 78–88.
- Лабутина И.А., Сафьянов Г.А., Шарлай Т.Г. Исследование распространения взвесей в море по многозональным снимкам // ДАН СССР. 1976. Т. 230. № 2. С. 861–864.
- Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др. Стационарные исследования эрозии почв при снеготаянии в центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1998. Т. 11. С. 57–76.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: изд-во МГУ, 1955. 353 с.
- Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат. 1949. 202 с.
- Медведева Р.А., Голосов В.Н., Ермолаев О.П. Пространственно-временная оценка овражной эрозии в зоне интенсивного земледелия Европейской части России // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 29–37.
- Попов И.В. Типы речных пойм и их связи с типами русловых процессов // Труды ГГИ. Л.: Гидрометеиздат. 1968. С. 39–55.
- Промахова Е.В. Изменчивость мутности речных вод в разные фазы водного режима. МГУ им. М.В. Ломоносова. Географический факультет, 2016. 228 с.
- Роднянская Э.Е. Методика крупномасштабного картографирования пойм больших рек // Материалы по физической географии. 1961. Вып. 1. С. 37–44.
- Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
- Сидорчук А.Ю. Баланс наносов в эрозионно-русловых системах // Геоморфология. 2015. Т. 1. С. 14–21.
- Сурков В.В. Возможности ландшафтно-индикационного метода оценки затопления пойм // Пойма и пойменные процессы. СПб.: Изд-во РГГМУ. 2006. С. 58–73.
- Сурков В.В. Динамика пойменных ландшафтов верхней и средней Оби. М.: Географический ф-т МГУ. 1999. 256 с.
- Сурков В.В., Завадский А.С., Чернов А.В. Пойма р. Москвы в нижнем течении, экологическое состояние, развитие в условиях интенсивного техногенного использования и оценка техногенной нарушенности её природных территориальных комплексов // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 21. М.: изд-во Моск. ун-та. 2019. С. 113–149.
- Успенский М.И., Харченко С.В., Цыпленков А.С. и др. Современная денудация малого приледникового водосбора озера Донгуз-Орун // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2025. Т. 80, № 4. С. 95–109.
- Харченко С.В. Новый алгоритм корегистрации цифровых моделей высот (ilem) // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55, № 4. С. 192–204.
- Харченко С.В. Способ корегистрации цифровых моделей высот для получения гидрологически корректного представления земной поверхности // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, № 3. С. 150–164.
- Харченко С.В., Голосов В.Н., Цыпленков А.С. и др. Темпы современной денудации малого водосбора в среднегорном поясе Большого Кавказа (на примере водосбора Гитче-Гижгит) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78, № 3. С. 38–51.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ. 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Рельеф пойм // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 1. М.: МГУ. 1970. С. 192–204.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 608 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлёв П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В. Покровско-Якутский водный узел на р. Лене: современные деформации и управление русловыми процессами // Известия РАН. Сер. географическая. 2019. № 6. С. 83–96.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлёв П.П., Сахаров А.И. «Разбой» Рассолода на р. Лена: русловой режим и управление им с целью

- улучшения водного пути // Речной транспорт (XXI век). 2020. № 2. С. 25–31.
- Чалов Р.С., Чернов А.В. Геоморфологическая классификация пойм равнинных рек // Геоморфология. 1985. № 3. С. 3–11.
- Чалов С.Р., Ефимов В.А. Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2021. № 4. С. 91–103.
- Чалов С.Р. Речные наносы. М: ИНФРА М, 2024. 472 с. DOI: 10.12737/1984076.
- Чалов С.Р., Лошков О.А., Крастынь Е.А. Причины и закономерности быстрых изменений состава взвесей в малой городской реке Сетунь // Известия РАН. Серия Географическая. 2024. Т. 88. № 6. С. 893–901. DOI: 0.31857/S2587556624060043.
- Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние речных русел и пойм рек Северной Евразии. М.: ООО «Крона». 2009. 684 с.
- Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ. 1983. 198 с.
- Шамшурина Е.Н., Голосов В.Н., Попова А.Р. и др. Оценка изменений интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на малых водосборах Среднерусской возвышенности с начала земледельческого освоения // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2024. Т. 17. № 3. С. 60–71.
- Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды Геол. ин-та АН СССР. Сер. геологич. 1951. Вып. 135. № 55. 275 с.
- Эрозионно-русловые системы: монография / Под науч. ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с. (Научная мысль).
- Aleksyuk A.I., Belikov V.V. The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // Journal of Computational Physics. Aug. 2019. Vol. 390, P. 232–248.
- Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // Journal of Computational Physics. 2021.
- Ankorn P.D. Clarifying Turbidity – The Potential and Limitations of Turbidity as a Surrogate for Water-Quality Monitoring // Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference. 2003.
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Sidorchuk A.Yu. et al. A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia // Geomorphology. 2005. Vol. 65, No. 3–4. P. 173–193.
- Benselama O., Mazour M., Hasbaia M. et al. Analysis of the Suspended Sediment Yield at Different Time Scales in Mediterranean Watershed, Case of Wadi El Maleh (North-West of Algeria) // Journal of Mediterranean Earth Sciences. 2019. Vol. 11. P. 3–13.
- Bracken L.J., Turnbull L., Wainwright J. et al. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales // Earth Surface Processes and Landforms. 2015. DOI: 10.1002/esp.3635.
- Brierley G., Fryirs K., Jain V. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications // Area. 2006. DOI: 10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x.
- Burt T.P., Allison R.J. Sediment cascades: an integrated approach / eds. Burt T., Allison R. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 471 p. DOI: 10.1002/9780470682876.
- Carlson P. Mapping surface current flow in turbid nearshore waters of the northeast Pacific // Geol. Surv. Profess. 1976. No. 929. P. 328–329.
- Castillo C., Perez R., James M.R. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion // Soil Sci. Soc. Am. J. 2012. Vol. 76. P. 1319–1332. DOI: 10.2136/sssaj2011.0390.
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y. et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data // Geomorphology. 2010. Vol. 122. P. 167–177. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.06.011.
- Chalov S., Ivanov V. 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. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107212
- Chalov S., Prokopeva K., Efimov V., Ivanov V., Kroffi B., Botavin D., Babinski Z., Zimov N., Pavlyukevich E., Habel M. Implications of Yedomá bank outcrop on the Arctic river sediment transport // Scientific reports. 2025. Vol. 15. P. 19320.
- Chanson H., Takeuchi M., Trevethan M. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary // Journal of Environmental Management. 2008. Vol. 88. No. 4. P. 1406–1416. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.07.009.
- Clayton K., Chorley R.J., Kennedy B.A. Physical Geography: A Systems Approach // The Geographical Journal. 1972. DOI: 10.2307/1795984.
- Davies-Colley R.J., Smith D.G. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review // Journal of the American Water Resources Association. 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x.

- Edwards W.M., Owens L. B. Large storm effects on total soil erosion // *J Soil & Water Cons.* 1991. No. 1. P. 75–78.
- Ferguson R.I. Channel form and channel changes (Britain) // *British rivers.* 1981.
- Frankl A., Poesen J., Haile M. et al. Quantifying long-term changes in gully networks and volumes in dryland environments: the case of Northern Ethiopia // *Geomorphology.* 2013. Vol. 201, P. 254–263. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.06.025.
- Fryirs K. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2013. Vol. 38. No. 1. P. 30–46. DOI: 10.1002/esp.3242.
- Fryirs K.A., Brierley G.J., Preston N.J. et al. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades // *Catena.* 2007. DOI: 10.1016/j.catena.2006.07.007.
- Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams // *Hydrological Processes.* 1995. Vol. 9. No. 1. P. 83–97. DOI: 10.1002/hyp.3360090108.
- Golosov V., Walling D.E. Using fallout radionuclides to investigate recent overbank sedimentation rates on river floodplain: an overview. *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea* // *IAHS Publ.* 2014. Vol. 367. IAHS Press, Wallingford, UK. P. 228–234. DOI: 10.5194/piahs-367-228-2015.
- Gray J.R., Gartner J.W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring // *Water Resources Research.* 2009. Vol. 45. No. 4. DOI: 10.1029/2008WR007063.
- Gupta S., Borrelli P., Panagos P. et al. An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity. *Sci Total Environ.* 2024. Vol. 908. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168249.
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R. A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 2017. No. 12(2), e0169748. DOI: 10.1371/journal.pone.0169748
- Ivanova N.N., Krasnov S.F., Ivanov M.M. Experience of large-scale modeling of soil erosion over the entire period of agricultural use of a small catchment in Tula oblast // *Eurasian Soil Science.* 2025. Vol. 58, No. 8. P. 98. DOI: 10.1134/s1064229325600101.
- Joyce H.M., Hardy R.J., Warburton J., Large A.R.G. Sediment continuity through the upland sediment cascade: geomorphic response of an upland river to an extreme flood event // *Geomorphology.* 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.05.002.
- Krylenko I., Belikov V., Fingert E., Golovlyov P., Glotko A., Zavadskii A., Samokhin M., Borovkov S. Analysis of the Impact of Hydrotechnical Construction on the Amur River near Blagoveshchensk and Heihe Cities Using a Two-Dimensional Hydrodynamic Model // *Water resources.* 2018. Vol. 45. Suppl. 1. P. S112-S121.
- Krylenko I.N., Pavlyukevich (Kornilova) E.D., Zavadskii A.S., Golovlyov P.P., Fingert E.A., Borisova N.M., Belikov V.V. Modelling of potential impact of climate change on water regime and channel processes in the river Lena near city Yakutsk: possibilities and limitations. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY.* 2024. № 17(4). P.112–120.
- Lal R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 2004. 304(5677), 1623–1627. DOI: 10.1126/science.1097396
- Larson W.E., Lindstrom M.J., Schumacher T.E. The role of severe storms in soil erosion: a problem needing consideration // *J. of Soil and Water Conservation.* 1997. Vol. 52(2). P. 90–95. DOI: 10.1080/00224561.1997.12457139.
- Leslie C., Hancock G.J. Estimating the date corresponding to the horizon of the first detection of ¹³⁷Cs and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in sediment cores // *J. Environ. Radioact.* 2008. P. 483–490. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.08.016.
- Lewis J. Turbidity-Controlled Suspended Sediment Sampling for Runoff-Event Load Estimation // *Water Resources Research.* 1996. Vol. 32. No. 7. P. 2299–2310. DOI: 10.1029/96WR00991.
- Lindstrom M.J., Nelson W.W., Schumacher T.E. Quantifying tillage erosion rates due to mouldboard plowing // *Soil and Tillage Research.* 1992. No. 24. P. 243–255.
- Nduaguba D.C. Use of Landsat-1 standard data products for multispectral radiometric analysis of sedimentation in Kainji reservoir // *Int. Sci.-Technol. Conf. Space.* 1976. No. 16. P. 45–52.
- Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, central Russia // *Geomorphology.* 2001. Vol. 40, No. 3–4. P. 185–204.
- Pavanelli D., Bigi A. A new indirect method to estimate suspended sediment concentration in a river monitoring programme // *Biosystems Engineering.* 2005. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.08.004.
- Rompay A. Van, Verstraeten G., Oost K. et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed

approach // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2001. Vol. 26(11), P.1221–1236. DOI: 10.1002/esp.275.

Tsyplenkov A., Grachev A., Yermolaev O. et al. Impacts of post-soviet land-use transformation on sediment dynamics in the western Caucasus // *Journal of Hydrology*. 2025. Vol. 656. P. 132956

Tsyplenkov A., Uspenskii M., Kharchenko S. et al. Sediment yield assessment of a small ungauged montane catchment in the north Caucasus // *Geomorphology*. 2026. Vol. 496. P. 110156.

DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.110156.

Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L. et al. Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus mountains, Russia // *Catena*. 2021. Vol. 203. P. 105285.

Viers J., Dupre B., Gaillardet G. Chemical Composition of Suspended Sediments in World Rivers: New Insights from a New Database. *Science of the Total Environment*, 2009. Vol. 407, P. 853–868.

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.053

Zhang X.J. Evaluating and improving ¹³⁷Cs technology for estimating soil erosion using soil loss data measured during 1954–2015 // *Earth-Science Rev.* 2023. Vol. 247. P. 104619.

DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104619/.

Zheng H., Miao C., Huntingford C., Tarolli P., Li D., Panagos P., Yue Y., Borrelli P., Van Oost K. The Impacts of Erosion on the Carbon Cycle. *Reviews of Geophysics*, 2025. No. 63(1). DOI: 10.1029/2023RG000829

Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D. et al. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary // *Geoderma*. 2023. Vol. 430. P. 116322.

Zimmermann A.E., Lapointe M. Sediment infiltration traps: Their use to monitor salmonid spawning habitat in headwater tributaries of the Cascapédia River, Québec // *Hydrological Processes*. 2005.

DOI: 10.1002/hyp.5879.

ОБ АВТОРАХ

Чалов Сергей Романович: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши, заведующий НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

srchalov@geogr.msu.ru

Голосов Валентин Николаевич: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доктор географических наук, в.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

gollossov@gmail.com

Завадский Александр Сергеевич: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, в.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

az200611@rambler.ru

Сурков Виталий Владимирович: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, с.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

vita.surkov@yandex.ru

Иннокентьев Александр Игоревич: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, инженер НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

sasha.inn2015@yandex.ru

Куракова Анна Александровна: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

a.a.kurakova@mail.ru

RESEARCH OF CATCHMENT EROSION-FLUVIAL SYSTEMS IN THE 21ST CENTURY: MODERN TECHNOLOGIES AND RESULTS

S.R. Chalov*, V.N. Golosov, A.S. Zavadsky, V.V. Surkov, A.I. Innokentyev, A.A. Kurakova

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

*srchalov@geogr.msu.ru

Abstract. The erosion-accumulative activity of water flows occurs on different spatial scales at different levels of catchment erosion-fluvial systems (CEFS). The article presents the main results of studies carried out by the scientific school of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University. These studies are devoted to the main components of CEFS — slopes and interfluvies, river channels, as well as sediment runoff

connecting these spatially separated zones of the river basin. Each of the research areas is characterized in terms of the most relevant technologies – physical models and models of shared contribution, balance approaches applicable to interfluvies; the method of hydrodynamic modeling of channel flows; sediment runoff monitoring technologies. Data are presented on the intensity of erosion-accumulative processes on the slopes of temperate watersheds and estimates of sediment delivery from watersheds of different sizes to the river network. This article examines methods for studying river floodplains, their formation and evolution, and mapping principles, as well as practical aspects of floodplain development and the mapping of economic activity within them. Using the largest river basins in the Russian Federation (the Ob, Yenisei, Lena, and Kolyma) as examples, it is shown that under modern hydroclimatic conditions, these areas are accumulation zones, where the sediment load transported outside the river basin is significantly lower than the sediment mass transported by erosion processes in the catchment area and river channels.

Keywords: sediment cascade, soil erosion, models of erosion, floodplain-channel complexes, hydrodynamic modeling, sediment runoff, hydrochemistry of river sediments

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out according to the State Task of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University 1.13 «Erosion-channel systems: hydrological regime, natural and anthropogenic transformations, and forecast of hazardous processes»

REFERENCES

- Alabyan A.M., Belikov V.V., Krylenko I.N., Fingert E.A., Fedorova T.A. Retrospective modeling of extreme flooding on the Oka River in the city of Ryazan and impact assessment on urban and transport infrastructure // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. No. S1. P. 1–10. (in Russ.).
- Alekseevsky N.I. Formation and Movement of River Sediments. Moscow: izd-vo MGU, 1998. 202 p. (in Russ.).
- Alekseevsky N.I., Belozerova E.V., Kasimov N.S., et al. Spatial Variability of Suspended Sediment Discharge Characteristics in the Selenga Basin During Rainfall-Induced Floods // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografija*. 2013. Vol. 3. No. 3. P. 60–65. (in Russ.).
- Alekseuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. Riemann problem solver for shallow water equations with a discontinuous bottom // Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2020660617, 2020. (in Russ.).
- Aleksyuk A.I., Belikov V.V. The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // *Journal of Computational Physics*. Aug. 2019. Vol. 390, P. 232–248.
- Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // *Journal of Computational Physics*. 2021.
- Ankorn P.D. Clarifying Turbidity – The Potential and Limitations of Turbidity as a Surrogate for Water-Quality Monitoring // *Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference*. 2003.
- Annenskaya G.N. Application of the landscape method in the study of floodplains of large rivers // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*. 1963. No. 4. P. 32–37. (in Russ.).
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., et al. Surface runoff and infiltration of meltwater into the soil on arable land in the forest-steppe and steppe zones of the East European Plain // *Pochvovedenie*. 2018. No. 1. P. 62–69. (in Russ.).
- Baryshnikov N.B., Popov I.V. Dynamics of Channel Flows and Channel Processes. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 456 p. (in Russ.).
- Belikov V.V., Aleksyuk A.I. Shallow Water Models in River Hydrodynamics Problems. Moscow: RAS, 2020. 346 p. (in Russ.).
- Belikov V.V., Vasilyeva E.S., Malyugin N.R., Golovlev P.P., Zavadskiy A.S. Numerical modeling of the operation of coastal protection structures on the Nyukzha River section // *Hydrotechnical construction*. 2025. No. 12. P. 47–55. (in Russ.).
- Belozerova E.V., Chalov S.R. Determination of river water turbidity using optical methods // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2013. Vol. 6. No. 5. P. 39–45. (in Russ.).
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Sidorchuk A.Yu. et al. A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia // *Geomorphology*. 2005. Vol. 65, No. 3–4. P. 173–193.
- Benselama O., Mazour M., Hasbaia M. et al. Analysis of the Suspended Sediment Yield at Different Time Scales in Mediterranean Watershed, Case of Wadi El Maleh (North-West of Algeria) // *Journal of Mediterranean Earth Sciences*. 2019. Vol. 11. P. 3–13.
- Berkovich K.M., Zlotina L.V., Ryazanov P.N. An evolutionary series of island and channel-side natural territorial complexes in the floodplain of the upper Ob // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 1983. No. 2. P. 82–88. (in Russ.).

- Bezukhov D.A., Golosov V.N., Panin A.V. Estimation of the sediment delivery coefficient for small watersheds in the forest-steppe and steppe regions of the East European Plain // *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja*. 2019. No. 4. P. 73–84. DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84. (in Russ.).
- Bracken L.J., Turnbull L., Wainwright J. et al. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2015. DOI: 10.1002/esp.3635.
- Brierley G., Fryirs K., Jain V. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications // *Area*. 2006. DOI: 10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x.
- Burt T.P., Allison R.J. Sediment cascades: an integrated approach / eds. Burt T., Allison R. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 471 p. DOI: 10.1002/9780470682876.
- Carlson P. Mapping surface current flow in turbid nearshore waters of the northeast Pacific // *Geol. Surv. Profess.* 1976. No. 929. P. 328–329.
- Castillo C., Perez R., James M.R. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2012. Vol. 76. P. 1319–1332. DOI: 10.2136/sssaj2011.0390.
- Catchment Erosion-Fluvial Systems: Monograph / Edited by R.S. Chalov, A.Yu. Sidorchuk, V.N. Golosov. Moscow: INFRA-M, 2017. 702 p. (Nauchnaja mysl') (in Russ.).
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y. et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data // *Geomorphology*. 2010. Vol. 122. P. 167–177. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.06.011.
- Chalov R.S. Channel Geomorphology: Theory, Geography, Practice. Vol. 1. Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms of Manifestation, and Conditions of Formation of River Channels. Moscow: Izdatel'stvo LKI. 2008. 608 p. (in Russ.).
- Chalov R.S. Floodplain Relief // *Soil Erosion and Channel Processes*. Issue 1. Moscow: Izdatel'stvo MGU. 1970. P. 192–204. (in Russ.).
- Chalov R.S. Geographical Studies of Channel Processes. Moscow: Izdatel'stvo MGU. 1979. 232 p. (in Russ.).
- Chalov R.S., Chernov A.V. Geomorphological Classification of Floodplains of Lowland Rivers // *Geomorfologija*. 1985. No. 3. P. 3–11. (in Russ.).
- Chalov R.S., Zavadsky A.S., Botavin D.V., Golovlev P.P., Morozova E.A., Surkov V.V. Pokrovsk-Yakutsky Water Node on the Lena River: Current Deformations and Management of Channel Processes // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2019. No. 6. P. 83–96. (in Russ.).
- Chalov R.S., Zavadsky A.S., Botavin D.V., Golovlev P.P., Sakharov A.I. Rassoloda branching on the Lena River: Channel Regime and Its Management to Improve the Waterway // *River Transport (XXI Century)*. 2020. No. 2. P. 25–31. (in Russ.).
- Chalov S., Ivanov V. 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. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107212
- Chalov S.R. River Sediments. Moscow: INFRA M, 2024. 472 p. DOI: 10.12737/1984076. (in Russ.).
- Chalov S.R., Loshkov O.A., Krastyn E.A. Drivers and Features of Rapid Suspended Sediment Composition Changes in the Small Urban River Setun // *Izvestija RAN. Serija Geograficheskaja*. 2024. Vol. 88. No. 6. P. 893–901. DOI: 10.31857/S2587556624060043. (in Russ.).
- Chalov S., Prokopeva K., Efimov V., Ivanov V., Kroffi B., Botavin D., Babinski Z., Zimov N., Pavlyukevich E., Habel M. Implications of Yedom bank outcrop on the Arctic river sediment transport // *Scientific reports*. 2025. Vol. 15. P. 19320.
- Chalov S.R., Efimov V.A. Mechanical composition of suspended sediments: classifications, characteristics, spatial variability // *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*. 2021. No. 4. P. 91–103. (In Russ.).
- Chanson H., Takeuchi M., Trevethan M. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary // *Journal of Environmental Management*. 2008. Vol. 88. No. 4. P. 1406–1416. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.07.009.
- Chernov A.V. Geography and Geoecological Condition of River Channels and Floodplains in Northern Eurasia. Moscow: ООО «Krona». 2009. 684 p. (in Russ.).
- Chernov A.V. Geomorphology of Lowland River Floodplains. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1983. 198 p. (in Russ.).
- Clayton K., Chorley R.J., Kennedy B.A. Physical Geography: A Systems Approach // *The Geographical Journal*. 1972. DOI: 10.2307/1795984.
- Davies-Colley R.J., Smith D.G. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review // *Journal of the American Water Resources Association*. 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x.
- Dobrovolsky G.V., Balabko P.N., Stasyuk N.V., et al. Alluvial Soils of River Floodplains and Deltas and Their Zonal Differences // *Aridnye jekosistemy*. 2011. Vol. 17. No. 3(48). P. 5–13. (in Russ.).
- Dymnikov V.P., Zalesny V.B., Glazunov A.V., Stepanenko V.M. Models of climate, geophysical

boundary layers and the active layer of land: in memory of V.N. Lykosov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 2022. Vol. 58, No. 4. P. 375–383.

DOI: 10.31857/S0002351522040046 (in Russ.)

Edwards W.M., Owens L.B. Large storm effects on total soil erosion // *J Soil & Water Cons.* 1991. No. 1. P. 75–78.

Efimov V.A., Chalov S.R., Magritsky D.V., Efimova L.E. Assessment of water runoff, sediment concentrations and chemical substances at the mouth of the Kolyma River based on the results of field studies in 2019 // *THE FOURTH VINOGRADOV READINGS. HYDROLOGY FROM KNOWLEDGE TO WORLD-VIEW* Collection of Papers of the International Scientific Conference in Memory of the Outstanding Russian Scientist Yuri Borisovich Vinogradov. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House, 2019. P. 1064–1069. (in Russ.)

Ferguson R.I. Channel form and channel changes (Britain) // *British rivers*. 1981.

Frankl A., Poesen J., Haile M. et al. Quantifying long-term changes in gully networks and volumes in dryland environments: the case of Northern Ethiopia // *Geomorphology*. 2013. Vol. 201, P. 254–263.

DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.06.025.

Fryirs K. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2013. Vol. 38. No. 1. P. 30–46. DOI: 10.1002/esp.3242.

Fryirs K.A., Brierley G.J., Preston N.J. et al. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades // *Catena*. 2007. DOI: 10.1016/j.catena.2006.07.007.

Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams // *Hydrological Processes*. 1995. Vol. 9. No. 1. P. 83–97. DOI: 10.1002/hyp.3360090108.

Girlo E.M., Chalov S.R., Kharchenko S.V. Assessment of suspended sediment inflow into rivers using the method of tracing sediment sources to address urbanized watershed management issues // *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2025. No. 6. P. 26–51.

DOI: 35567/1999-4508-2025-6-26-51. (in Russ.)

Golosov V., Walling D.E. Using fallout radionuclides to investigate recent overbank sedimentation rates on river floodplain: an overview. *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea* // *IAHS Publ.* 2014. Vol. 367. IAHS Press, Wallingford, UK. P. 228–234.

DOI: 10.5194/piahs-367-228-2015.

Golosov V.N. Erosional and Accumulative Processes in River Basins of Developed Plains. 2006. 296 p. (in Russ.).

Golosov V.N. Quantitative assessment of deposits' redistribution in the upper links of fluvial network: achievements and problems // *Geomorfologija*. 2008. No. 3. P. 29–37. (in Russ.).

Golosov V.N., Kumani M.V., Ivanova N.N., et al. Siltation of a small reservoir under climatic changes and urbanization of its water catchment basin (the Popovsky pond, Kursk) // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2020. No. 6. P. 51–62. (in Russ.).

Golosov V.N., Shamshurina E.N., Kolos G.I., et al. Spatiotemporal Changes in the Erosion and Deposition Processes in a Small Catchment in the North of the Central Russian Upland // *Pochvovedenie*. 2024. No. 5. P. 738–754. (in Russ.).

Golosov V.N., Zhidkin A.P., Petelko A.I., et al. Field Verification of Erosion Models Based on the Studies of a Small Catchment in the Vorobzha River Basin (Kursk oblast, Russia) // *Pochvovedenie*. 2022. No. 10. P. 1321–1338. (in Russ.).

Gordeev V.V. The river-sea system and its role in ocean geochemistry: Abstract of a Doctor of Geological and Mineral Sciences dissertation: 25.00.28. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2009. 36 p. (in Russ.).

Gray J.R., Gartner J.W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring // *Water Resources Research*. 2009. Vol. 45. No. 4.

DOI: 10.1029/2008WR007063.

Grin A.M. Experience in the stationary study of runoff and erosion processes. *Modern exogenic processes of relief formation*. Moscow: Nauka, 1970. P. 89–95. (in Russ.).

Gupta S., Borrelli P., Panagos P. et al. An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity. *Sci Total Environ*. 2024. Vol. 908.

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168249.

Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G. B. M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M. N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M. A., Vargas R., MacMillan R. A., Batjes N. H., Leenaars J. G. B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 2017. No. 12(2), e0169748. DOI: 10.1371/journal.pone.0169748

Ivanov M.M., Ivanova N.N., Golosov V.N., et al. Assessment of Changes in Chernobyl Contamination and Erosion Rates for Arable Soils Using Resampling Method // *Pochvovedenie*. 2024. No. 9. P. 1251–1262. (in Russ.).

Ivanova N.N., Krasnov S.F., Ivanov M.M. Experience of large-scale modeling of soil erosion over the entire period of agricultural use of a small catchment in Tula oblast // *Eurasian Soil Science*. 2025. Vol. 58, No. 8. P. 98. DOI: 10.1134/s1064229325600101.

- Joyce H.M., Hardy R.J., Warburton J., Large A.R.G. Sediment continuity through the upland sediment cascade: geomorphic response of an upland river to an extreme flood event // *Geomorphology*. 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.05.002.
- Kedich A.I., Golosov V.N., Kharchenko S.V. Exogenous processes in proglacial zones of mountains: quantitative estimates and their accuracy // *Uchjonye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya Estestvennye nauki*. 2022. Vol. 164, No. 1. P. 109–134. (in Russ.).
- Kharchenko S.V. The method for co-registration of digital terrain data to obtain hydrologically correct model of the earth's surface // *Geomorfologija i Paleografija*. 2023. Vol. 54, No. 3. P. 150–164. (in Russ.).
- Kharchenko S.V. A new algorithm for coregistration of digital elevation models (ILEM) // *Geomorfologija i Paleografija*. 2024. Vol. 55, No. 4. P. 192–204. (in Russ.).
- Kharchenko S.V., Golosov V.N., Tsypelenkov A.S., et al. Rates of modern denudation of a small catchment in the middle mountain belt of the Greater Caucasus (case study of the Gitche-Gizhgit catchment) // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2023. Vol. 78, No. 3. P. 38–51. (in Russ.).
- Kondratyev N.E., Lyapin A.N., Popov I.V., et al. *Channel Process*. L.: Gidrometeoizdat. 1959. 372 p. (in Russ.).
- Kondratyev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Fundamentals of the Hydromorphological Theory of the Channel Process*. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 272 p. (in Russ.).
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Golovlev P.P., Sazonov A.A., Nikitskiy A.N. Verification of a Two-Dimensional Hydrodynamic Model of the Lena River near Yakutsk Based on Multi-temporal Satellite Imagery Data // *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2018. Vol. 15, No. 5. P. 169–178. (in Russ.).
- Kravtsova V.I., Antonova S.Yu. Application of multi-zonal surveying for the study and mapping of shallow waters (using the example of the northeastern Caspian Sea) // *Proceedings of Universities. Geology and Exploration*. 1974. No. 1. P. 78–88. (in Russ.).
- Krylenko I., Belikov V., Fingert E., Golovlyov P., Glotko A., Zavadskii A., Samokhin M., Borovkov S. Analysis of the Impact of Hydrotechnical Construction on the Amur River near Blagoveshchensk and Heihe Cities Using a Two-Dimensional Hydrodynamic Model // *Water resources*. 2018. Vol. 45, Suppl. 1. P. S112–S121.
- Krylenko I.N., Pavlyukevich (Kornilova) E.D., Zavadskii A.S., Golovlyov P.P., Fingert E.A., Borisova N.M., Belikov V.V. Modelling of potential impact of climate change on water regime and channel processes in the river Lena near city Yakutsk: possibilities and limitations. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. 2024. № 17(4). P.112–120.
- Lal R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 2004. 304(5677), 1623–1627.
- DOI: 10.1126/science.1097396
- Labutina I.A., Safyanov G.A., Sharlay T.G. Study of the Distribution of Suspended Matter in the Sea Using Multizonal Images // *DAN SSSR*. 1976. Vol. 230, No. 2. P. 861–864. (in Russ.).
- Larson W.E., Lindstrom M.J., Schumacher T.E. The role of severe storms in soil erosion: a problem needing consideration // *J. of Soil and Water Conservation*. 1997. Vol. 52(2). P. 90–95.
- DOI: 10.1080/00224561.1997.12457139.
- Leslie C., Hancock G.J. Estimating the date corresponding to the horizon of the first detection of ^{137}Cs and $^{239+240}\text{Pu}$ in sediment cores // *J. Environ. Radioact.* 2008. P. 483–490.
- DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.08.016.
- Lewis J. Turbidity-Controlled Suspended Sediment Sampling for Runoff-Event Load Estimation // *Water Resources Research*. 1996. Vol. 32, No. 7. P. 2299–2310. DOI: 10.1029/96WR00991.
- Lindstrom M.J., Nelson W.W., Schumacher T.E. Quantifying tillage erosion rates due to mouldboard plowing // *Soil and Tillage Research*. 1992. No. 24. P. 243–255.
- Litvin L.F., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., et al. Long-term studies of soil erosion during snowmelt in the central Non-Chernozem region // *Jerozija pochv i ruslovyje processy*. Moscow: Moscow University Press. 1998. Vol. 11. P. 57–76. (in Russ.).
- Makkaveev N.I. *River Channels and Erosion in Their Basins*. Moscow: izd-vo MGU, 1955. 353 p. (in Russ.).
- Makkaveev N.I. *The River Channel and Erosion in Its Basin*. Moscow: Izd-vo AN SSSR. 1955. 347 p. (in Russ.).
- Medvedeva R.A., Golosov V.N., Ermolaev O.P. Spatio-temporal assessment of gully erosion in the zone of intensive agriculture in the European part of Russia // *Geografija i prirodnye resursy*. 2018. No. 3. P. 29–37. (in Russ.).
- Nduaguba D.C. Use of Landsat-1 standard data products for multispectral radiometric analysis of sedimentation in Kainji reservoir // *Int. Sci.-Technol. Conf. Space*. 1976. No. 16. P. 45–52.
- Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, central Russia // *Geomorphology*. 2001. Vol. 40, No. 3–4. P. 185–204.

- Pavanelli D., Bigi A. A new indirect method to estimate suspended sediment concentration in a river monitoring programme // *Biosystems Engineering*. 2005. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.08.004.
- Popov I.V. Types of river floodplains and their relationship to types of channel processes // *Proceedings of the State Hydrological Institute. L.: Gidrometeoizdat*. 1968. P. 39–55. (in Russ.).
- Promakhova E.V. Variability of river water turbidity during different phases of the hydrological regime. MGU im. M.V. Lomonosova. *Geograficheskij fakul'tet*, 2016. 228 p. (in Russ.).
- Rodnyanskaya E.E. Methodology for large-scale mapping of floodplains of major rivers // *Materialy po fizicheskoy geografii*. 1961. Issue 1. P. 37–44. (in Russ.).
- Rompay A. Van, Verstraeten G., Oost K. et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2001. Vol. 26(11), P. 1221–1236. DOI: 10.1002/esp.275.
- Savenko V.S. Chemical composition of suspended sediments of the world's rivers. Moscow: GEOS, 2006. 175 p. (In Russ.).
- Shamshurina E.N., Golosov V.N., Popova A.R., et al. Assessment of Changes in the Intensity of Erosion–Accumulative Processes in Small Catchment Areas of the Central Russian Upland since the Beginning of Agricultural Development // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 60–71. (in Russ.).
- Shantser E.V. Alluvium of lowland rivers in the temperate zone and its significance for understanding the patterns of structure and formation of alluvial suites // *Trudy Geologicheskogo instituta AN SSSR. Seriya geologicheskaja*. 1951. Issue 135. No. 55. 275 p. (in Russ.).
- Sidorchuk A.Yu. Sediment balance in the erosion-deposition systems // *Geomorfologiya*. 2015. Vol. 1. P. 14–21. (in Russ.).
- Surkov V.V. Dynamics of floodplain landscapes in the upper and middle Ob River. Moscow: *Geograficheskij fakul'tet MGU*. 1999. 256 p. (in Russ.).
- Surkov V.V. The Potential of the Landscape-Indicator Method for Assessing Floodplain Inundation // *Floodplains and Floodplain Processes*. St. Petersburg: Izd-vo RGGMU. 2006. P. 58–73. (in Russ.).
- Surkov V.V., Zavadsky A.S., Chernov A.V. The floodplain of the Moscow River in its lower course, ecological condition, development under conditions of intensive anthropogenic use, and assessment of anthropogenic disturbance of its natural territorial complexes // *Jerozija pochv i ruslovyje processy*, Issue 21. Moscow: Izdatel'stvo MGU. 2019. P. 113–149. (in Russ.).
- Tsyplenkov A., Grachev A., Yermolaev O. et al. Impacts of post-soviet land-use transformation on sediment dynamics in the western Caucasus // *Journal of Hydrology*. 2025. Vol. 656. P. 132956
- Tsyplenkov A., Uspenskii M., Kharchenko S. et al. Sediment yield assessment of a small ungauged montane catchment in the north Caucasus // *Geomorphology*. 2026. Vol. 496. P. 110156. DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.110156.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L. et al. Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus mountains, Russia // *Catena*. 2021. Vol. 203. P. 105285.
- Uspensky M.I., Kharchenko S.V., Tsyplenkov A.S., et al. Present-day denudation of a small alpine catchment of the Donguz-Orun lake // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2025. Vol. 80, No. 4. P. 95–109. (in Russ.).
- Viers J., Dupre B., Gaillardet G. Chemical Composition of Suspended Sediments in World Rivers: New Insights from a New Database. *Science of the Total Environment*, 2009. Vol. 407, P. 853–868. DOI: /10.1016/j.scitotenv.2008.09.053
- Zavadsky A.S., Surkov V.V., Chernov A.V., et al. Transformation of floodplain landscapes under the influence of natural and anthropogenic environmental changes (using the example of the Zakharkovskaya floodplain of the Moscow River) // *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o zemle*. 2021. Vol. 31. No. 2. P. 166–177. (in Russ.).
- Zavadsky A.S., Surkov V.V., Chernov A.V., et al. Natural territorial complexes of floodplain in the Moskva River lower reaches under intensive economic development // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2020. No. 3. P. 3–13. (in Russ.).
- Zavadsky A.S., Surkov V.V., Samokhin M.A. Changes in the flooding regime of the Lena river left bank floodplain near Yakutsk // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2025. No. 4. P. 110–124. (in Russ.).
- Zavadsky A.S., Fingert E.A., Botavin D.V., Golovlev P.P. Modern Approaches to Substantiating General Schemes for the Radical Improvement of Shipping Conditions (using the example of a complex branched section of the Lena River) // *Hydraulic Structures of Waterways: Coll. of scientific papers: Issue 4*. St. Petersburg: Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2019. P. 148–160. (in Russ.).
- Zhang X.J. Evaluating and improving ¹³⁷Cs technology for estimating soil erosion using soil loss data measured during 1954–2015 // *Earth-Science Rev*. 2023. Vol. 247. P. 104619. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104619/.
- Zheng H., Miao C., Huntingford C., Tarolli P., Li D., Panagos P., Yue Y., Borrelli P., Van Oost K. The Impacts

of Erosion on the Carbon Cycle. Reviews of Geophysics, 2025. No. 63(1). DOI: 10.1029/2023RG000829

Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D. et al. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary // Geoderma. 2023. Vol. 430. P. 116322.

Zhuchkova V.K. Organization and Methods of Comprehensive Physical-Geographical Research. Moscow: Moscow State University. 1977. 186 p. (in Russ.).

Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. Methods of Comprehensive Physical-Geographical Research. Moscow: Centr «Akademija». 2004. 354 p. (in Russ.).

Zimmermann A.E., Lapointe M. Sediment infiltration traps: Their use to monitor salmonid spawning habitat in headwater tributaries of the Cascapédia River, Québec // Hydrological Processes. 2005.

DOI: 10.1002/hyp.5879.

Zlotina L.V. Formation and development of floodplain geocomplexes in areas with varying channel stability (using the example of the upper and middle Ob) // Dep. VINITI. 1989. No. 4679-89. 10 p. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Chalov Sergey Romanovich. Lomonosov Moscow State University. Doctor of geographical sciences. srchalov@geogr.msu.ru

Golosov Valentin Nikolaevich. Lomonosov Moscow State University. Doctor of geographical sciences. golossov@gmail.com

Zavadsky Alexander Sergeevich. Lomonosov Moscow State University. Candidate of geographical sciences. az200611@rambler.ru

Surkov Vitaly Vladimirovich. Lomonosov Moscow State University. Candidate of geographical sciences. vita.surkov@yandex.ru

Innokentyev Alexander Igorevich. Lomonosov Moscow State University. sasha.inn2015@yandex.ru

Kurakova Anna Alexandrovna. Lomonosov Moscow State University. Candidate of geographical sciences. a.a.kurakova@mail.ru