

УДК 551.311.24(571.56)

ДИНАМИКА ЭРОЗИИ И ПОСТУПЛЕНИЯ НАНОСОВ В РЕКИ НА СЛАБО ОСВОЕННЫХ РАВНИННЫХ ВОДОСБОРАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ[#]

© 2025 г. К. А. Мальцев^{1,*}, С. Р. Чалов^{1,2}, М. А. Иванов¹, Т. С. Мальцева¹,
Е. А. Фингерт², Е. В. Петрова¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, Казань, Россия

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

* E-mail: mlcvkirill@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2024 г.

После доработки 19.11.2024 г.

Принята к публикации 10.01.2025 г.

В работе исследуются интенсивность бассейновой эрозии и особенности формирования стока взвешенных наносов слабо освоенных водосборов в бассейне р. Лены, расположенных возле г. Якутска (15 740 км²) и в верхнем течении р. Б. Черепаниха (1709 км²). Впервые в пределах залесенных водосборов бассейна р. Лены проведена адаптация эрозионно-аккумулятивной модели WaTEM/SEDEM, дополненная использованием модифицированной Г. А. Ларионовым модели ГГИ. Сделан вывод о важнейшей роли разрешения цифровой модели рельефа в расчетах стока наносов: четырехкратное уменьшение шага сетки (со 100 до 25 м) меняет оценку стока наносов на 25%. Установлено, что среднемноголетние эрозионные потери почвы в районе г. Якутска возросли с 4.7 (2003–2007) до 4.9 (2015–2019) т/км² в год, что объясняется сокращением площади лесной растительности и появлением луговых сообществ на месте прошедших здесь лесных пожаров. В пределах водосбора р. Б. Черепанихи произошли сокращения с 7.2 (1985–1990) до 6.4 (2015–2019) т/км² в год вследствие увеличения площади лесов, сокращения естественной луговой растительности и исчезновения пахотных угодий. Наблюдаемая величина стока наносов по данным гидропоста Бом с территории водосбора р. Б. Черепанихи также сократилась за два рассматриваемых периода с 0.41 до 0.37 т/км² в год. Тренды стока наносов в пределах участка у г. Якутска и самой р. Лены также связаны между собой: измеренная величина стока взвешенных наносов р. Лены на посту Табага за те же периоды возросла с 8.76 до 10.82 т/км² в год. Полученные результаты свидетельствуют об исключительной роли бассейновой эрозии в формировании стока наносов малых рек (р. Б. Черепаниха) и ее незначительном влиянии на сток наносов крупных рек (р. Лена).

Ключевые слова: WaTEM/SEDEM; ливневая эрозия; талая эрозия; аккумуляция; сток наносов; динамика земного покрова; р. Лена

DOI: 10.31857/S2949178925020043, **EDN:** GPTLUQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата сопровождаются интенсификацией разнообразных природно-антропогенных процессов (деградация криолитозоны, лесные пожары и т.д.). Во многих частях России на границе 1980–1990-х гг. произошли изменения землепользования и климата (Park et al., 2014; Golosov

et al., 2018), что привело к изменению интенсивности деградации почвенного покрова, усилению эрозионно-аккумулятивных процессов и стока твердого вещества. Считается, что в наибольшей степени эти процессы проявляются в арктической зоне и непосредственно в бассейнах рек Северного Ледовитого океана (Nummelin et al., 2016; Vihma et al., 2019; Magritsky et al., 2020; Nasonova et al., 2023).

Крупнейшей рекой азиатской части России по площади бассейна является Лена. Несмотря на то, что здесь изученность эрозионно-аккумулятивных процессов относительно высока и рассматривалась в работах Сибирского отделения РАН (Рыжов, 2009), Московского государственного университета (Литвин и др., 2021; Магрицкий, Банщикова, 2021; Магрицкий, 2022), Казанского университета

[#] Ссылка для цитирования: Мальцев К. А., Чалов С. Р., Иванов М. А., Мальцева Т. С., Фингерт Е. А., Петрова Е. В. (2025) Динамика эрозии и поступления наносов в реки на слабо освоенных равнинных водосборах Центральной Сибири в связи с изменениями землепользования и лесными пожарами. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 2. С. 231–250. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020043>; <https://elibrary.ru/GPTLUQ>

(Шынбергенов, Ермолаев, 2017), а также в рамках глобальных исследований (Cohen et al., 2013; Borrelli et al., 2017), интегральные оценки баланса наносов для малых водосборов, учитывающие аккумуляцию части смываемого материала, никогда не проводились. Не было также оценки твердого стока с водосбора с талыми водами. При этом климатические изменения и связанные с ними воздействия на водный сток и сток наносов от процессов деградации многолетнемерзлых пород, регистрировавшиеся для рек бассейна Лены, а также возможность верификации результатов по данным многолетних изменений речного стока (Магрицкий и др., 2023) определяют актуальность выполнения оценок формирования стока наносов для малых водосборов именно для этой территории (Chalov et al., 2021; Chalov, Prokopenko, 2022).

Поэтому работа преследует следующие цели: 1) оценка соотношений между эрозией и аккумуляцией на водосборе; 2) оценка возможного вклада доставки наносов с водосбора в сток наносов рек на основе сравнения с данными гидрометрических постов; 3) выявление временной динамики эрозионно-аккумулятивных процессов. Последняя задача решается для следующих отрезков времени: на водосборе р. Б. Черепаниха — 1985–1990 гг. и 2015–2019 гг., на участке “Якутск” — 2003–2007 гг. и 2015–2019 гг. Разные интервалы времени обусловлены наличием исторических ДДЗЗ нужного разрешения и существенным сокращением пашни (в 2 раза и более) в пределах модельных водосборов.

В работе использованы наработки традиционных полумпирических моделей на базе универсального уравнения эрозии USLE (Wischmeier et al., 1978) и его модификации RUSLE (Renard et al., 1997). Для возможности оценки эрозионных потерь почвы с учетом аккумуляции части смываемого материала от стока дождевых вод в пределах водосбора и стока наносов в реку использовано понятие о “седиментационной связности” исследуемой территории. Возможности выполнения такой оценки связаны с употреблением одного из следующих индексов: *sediment delivery ratio* (SDR) (Boomer et al., 2008; Baartman et al., 2013; Heckmann et al., 2018); *index of connectivity* (IC) (Borselli et al., 2008; Gay et al., 2016; Zhao et al., 2020); *travel time* (Ferro, Porto, 2000; Bhattarai, Dutta, 2008); *transport capacity* (Verstraeten et al., 2007; Жидкин и др., 2021). В нашем исследовании за основу взят индекс *transport capacity*, реализованный в программном коде модели WaTEM/SEDEM (Borrelli et al., 2021). Ранее опыт использования алгоритма WaTEM/SEDEM применялся в Испании (de Vente et al., 2008), Италии (Van Rompaey et al., 2005), Бельгии (Van Rompaey et al., 2001), Монголии (Pietroń et al.,

2017), Китае (Sheng, Fang, 2014), в сельскохозяйственных регионах юга Европейской части России (Жидкин и др., 2021), а также востока Русской равнины (Maltsev et al., 2022), где показал высокую эффективность оценки эрозионно-аккумулятивных процессов и их динамики в пределах водосборов рек разной степени сельскохозяйственного освоения. Учитывая методические сложности применения модели для лесной зоны, авторы ориентировались как на ранее выполненные оценки верификации алгоритмов универсального уравнения эрозии почв USLE для сходных условий сибирских речных бассейнов (Цыпленков и др., 2022; Chalov, Ivanov, 2023), так и на опыт проведения подобных расчетов, реализованных в глобальных моделях эрозии почв (Borrelli et al., 2017).

Оценка применимости алгоритма для двух равнинных и сельскохозяйственно слабо освоенных водосборов центральной части таежной зоны явилась дополнительной методической задачей исследования. Для оценки потерь почвы от талого смыва использовалась модель ГГИ в модификации НИЛЭП и РП (Ларионов, 1993).

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

2.1. Территория исследования

Исследуемые участки располагаются в пределах Приленского плато и характеризуются в целом равнинным рельефом. Первый участок (далее — участок “Якутск”) объединяет бассейны рек, впадающих в Лену в районе г. Якутска между Табагинским и Кангаласским мысами. Почвенный покров представлен палевыми осолоделыми (Haplic Cambisols Dystric), палевыми карбонатными (Haplic Cambisols Eutric), боровыми песками (Rubic Arenosols Eutric), черноземами обыкновенными (Voronich Chernozems Pachic), луговыми (Haplic Gleysols Dystric) и пойменными кислыми (Umbric Fluvisols Oxyaquic) почвами. Участок занимает площадь 15740 км², абс. высоты в диапазоне от 74 до 423 м. В возвышенной части участок сложен терригенно-обломочными осадочными породами, ближе к руслу р. Лены — аллювиальными отложениями (Hartmann, Moosdorf, 2012). Среднегодовое количество осадков — 8.9°С и годовая норма осадков около 240 мм.

Второй участок — водосбор р. Б. Черепанихи и левый приток средней Лены с замыкающим створом в пос. Бом (рис. 1). Площадь водосбора 1709 км², абс. высоты от 129 до 532 м. Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми остаточными карбонатными (Umbric Albeluvisols Abruptic), палевыми типичными (Haplic Cambisols Eutric), палевыми оподзоленными (Haplic Cambisols Dystric) и дерново-карбонатными (Rendzic Leptosols Eutric)

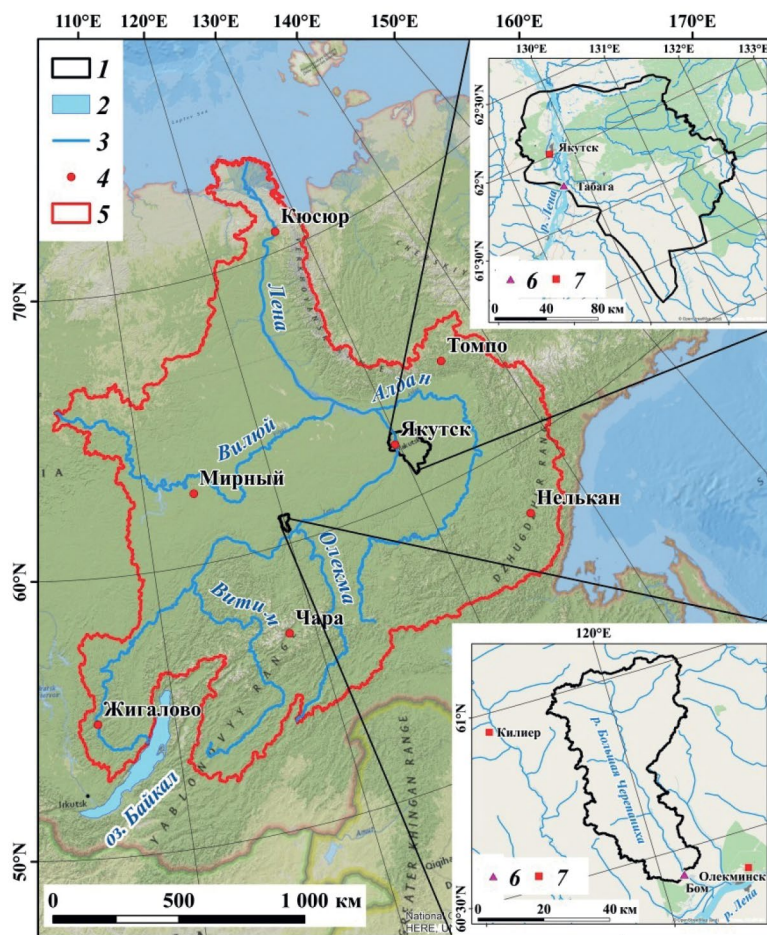


Рис. 1. Обзорная карта расположения изучаемых водосборов.

1 – границы изучаемых водосборов; 2 – водоемы; 3 – главные реки; 4 – населенные пункты; 5 – граница водосбора Лены; на врезках (6–7): 6 – гидропост, 7 – метеостанция.

Fig. 1. Location of the studied catchment.

1 – bound of the catchment; 2 – water bodies; 3 – main rivers; 4 – settlements; 5 – bound of the Lena basin; in the insets (6–7): 6 – hydrological station, 7 – weather station.

почвами. В геологическом строении участвуют в основном карбонатные и терригенные породы (Hartmann, Moosdorf, 2012). Среднегодовое количество осадков 332 мм, температура воздуха -5.8°C .

Территории выбраны с учетом наличия мониторинговых данных о стоке взвешенных наносов, что позволяет провести верификацию полученных результатов. Оба рассмотренных водосбора покрыты лесом на 70–90%, что очень типично для бассейна Лены. Положительные температуры с мая по сентябрь позволяют формироваться на водосборах поверхностному стоку.

2.2. Методика

Для оценки среднегодовой почвенной эрозии в пределах исследуемых участков использовалась формула (Ларионов, 1993):

$$E_{\Gamma} = E_{\text{Л}} + E_{\text{Т}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{Л}}$, $E_{\text{Т}}$ – модули дождевого и талого смыва соответственно, т/га в год.

Для среднегодовой оценки бассейновой эрозии от дождевого смыва, а также стока наносов с территории водосбора и создания карт использовалась модель среднегодовой оценки баланса эрозионно-аккумулятивных процессов WaTEM/SEDEM (Van Rompaey et al., 2001; Verstraeten et al., 2007).

Методика состоит из трех этапов. На первом выполняется оценка потенциальных потерь почвы в пределах каждого пикселя, представляющего тот или иной склон, на основе уравнения RUSLE (Renard et al., 1997):

$$E_{\text{Л}} = R \times K \times LS_{2D} \times C \times P, \quad (2)$$

где E_L — среднегоголетние потери почв ($\text{кг} \times \text{м}^{-2} / \text{год}^{-1}$), R — эрозионный индекс дождевых осадков ($\text{МДж мм м}^{-2} \text{ч}^{-1} \text{год}^{-1}$), K — смываемость почвы ($\text{кг ч МДж}^{-1} \text{мм}^{-1}$), LS_{2D} — эрозионный потенциал рельефа (безразмерный), C — почвозащитный коэффициент растительности (безразмерный) и P — коэффициент противоэрозионных мероприятий.

На втором этапе оценивается транспортирующая способность каждого пикселя, представляющего тот или иной склон, на основе уравнения:

$$TC = ktcRK(LS_{2D} - 4.1S^{0.8}), \quad (3)$$

где TC — транспортирующая способность ($\text{кг} \times \text{м}^{-2} / \text{год}^{-1}$); ktc — коэффициент транспортирующей способности, м; S — значение уклона.

На третьем этапе количество смываемой почвы сравнивается с транспортирующей способностью. При этом для каждой ячейки количество поступивших со склонов выше наносов добавляется к количеству наносов, произведенных эрозией в этой ячейке. Если сумма поступивших в расчетную ячейку наносов и наносов, сформированных за счет развития эрозии в пределах данной ячейки ниже, чем транспортирующая способность потока, то все наносы направляются дальше вниз по склону. Если эта сумма превышает транспортирующую способность потока, то сток наносов из ячейки ограничивается транспортирующей способностью потока.

Эрозионные потери почвы от стока талых вод были выполнены с использованием зависимости (Ларионов, 1993):

$$E_T = f(K, h, L, I, C), \quad (4)$$

где h — средний слой стока за период снеготаяния, мм; I — уклон склона; L — длина склона, м; C — почвозащитный коэффициент растительности; K — смываемость почвы.

К сожалению, модифицированная Г.А. Ларионовым методика Государственного гидрологического института (ГГИ) не оценивает аккумуляцию части смываемой почвы на водосборе, поэтому мы в статье принимаем, что весь смытый при талом стоке материал доходит до водных объектов. Данное предположение может подтверждаться тем, что концентрация твердого вещества в внешних водах довольно низка, а скорость высока, что способствует его переносу на большие расстояния (Голозов, 2006).

Для расчетов были использованы следующие картографические модели: рельефа, смываемости почвы (K -фактор); землепользования; эрозионного индекса дождевых осадков (R -фактор); запасов воды в снеге (h); модель почвозащитного коэффициента растительности от стока талых и дождевых

вод (C -фактор). Среднегоголетняя интенсивность стока наносов сопоставлялась с расходом взвешенных наносов либо на ближайшем гидрологическом посту, либо на замыкающем для исследуемого водосбора. Для сравнительного анализа были использованы следующие гидрологические посты: для участка “Якутск” — пост на Табагинском мысе (далее — пост “Табага”); для водосбора р. Б. Черепанихи — пост в пос. Бом. Для работы использовалась растровая модель пространственных данных и шаг сетки 100 м. Результаты по одному из водосборов (р. Б. Черепаниха) были сопоставлены с результатами, полученными на сетке шагом 30 м.

2.3. Рельеф

В настоящее время существуют несколько общедоступных глобальных цифровых моделей рельефа (ГЦМР) в свободном доступе имеющих различное разрешение: 1" — SRTM C-SIR, SRTM X-SAR (Farr et al., 2007), ASTER GDEM v.2 (Reuter et al., 2009), ASTER GDEM v.3, ALOS3D30 (Tadono et al., 2014), 3" — MERIT v.1 (Yamazaki et al., 2017), Viewfinder Panoramas (Melkonian et al., 2016), TanDEM-x90 (Wessel, 2018); 7.5 угловых секунд — GMTED2010 (Ермолаев и др., 2017) и др. Среди всего этого разнообразия для работы было решено использовать ГЦМР, имеющие пространственное разрешение 3" (около 90–100 м). Из трех ГЦМР с пространственным разрешением 3" выбрана модель Viewfinder Panoramas, доступная на сайте <http://viewfinderpanoramas.org>. Модель создана на основе данных нескольких источников, в том числе с использованием информации о рельефе, оцифрованной с топографических карт масштаба 1:100000 для исследуемых водосборов. Данный факт является преимуществом по сравнению с другими глобальными ЦМР аналогичного разрешения, полученными с использованием данных дистанционного зондирования Земли и имеющими погрешности, обусловленные растительным покровом, что особенно важно для территории нашего исследования.

Отдельно стоит аргументировать использование ГЦМР не самого высокого пространственного разрешения из существующих в свободном доступе в настоящий момент. В будущем планируется использовать аналогичное пространственное разрешение (3") для оценок эрозионно-аккумулятивного баланса водосбора и стока наносов с него всего бассейна р. Лены, а 25–30-метровое разрешение вызовет серьезные вычислительные сложности из-за большого объема растровых моделей факторов эрозии. Для сравнительного анализа влияния шага сетки задействована модель ALOS3D30. Для расчета эрозионного потенциала рельефа использовалась методика М.А. Nearing (Nearing et al., 1997).

2.4. Эродируемость почв

Для создания пространственной модели смываемости (*K*-factor) использовались пространственные и атрибутивные данные Единого государственного реестра почвенных ресурсов России, представленные на сайте <http://egrpr.esoil.ru/>. Данный реестр был в первую очередь создан на основе почвенной карты В. М. Фридланда масштаба 1:2500 000. Альтернативным источником пространственных данных о почве для данной территории являются Harmonized World Soil Database (Nachtergaele, et al., 2012), а также данные проекта SoilGrids (Hengl et al., 2017), которые по совокупности причин являются менее точными.

Для оценки смываемости использовалась формула, рассчитывающая смываемость в единицах СИ:

$$K = \left(\frac{(2.1(d(100 - e))^{1.14})0.0001 \times \times (12 - a) + 3.25(b - 2) + + 2.5(c - 3)}{100} \right) \times 0.1317, \quad (5)$$

где *a* — содержание органического вещества, %; *d* — содержание частиц размером 0.002–0.1 мм, %; *e* — содержание частиц размером <0.002 мм, %; *b* — класс структуры и *c* — класс проницаемости. Более детальное описание расчета смываемости дано в описании к моделям USLE, RUSLE, RUSLE2.

Смываемость почв в пределах участка “Якутск” характеризуется следующими значениями: палевые осолоделые — 63, палевые карбонатные — 49, боровые пески — 48, черноземы обыкновенные — 29, луговые — 41 и пойменные кислые — 25 кг ч МДж^{−1} мм^{−1}.

Смываемость почв в пределах водосбора Б. Черепаниха характеризуется следующими значениями: дерново-подзолистые остаточно-карбонатные — 63, палевые типичные — 35, палевые оподзоленные — 65 и дерново-карбонатные — 49 кг ч МДж^{−1} мм^{−1}.

2.5. Землепользование и *C*-фактор

Для оценки современной структуры землепользования в пределах обоих водосборов за основу взята модель земного покрова Global land cover and land use 2019, разработанная группой исследователей из университета Мерилэнд (Hansen et al., 2022).

Землепользование за период 1985–1990 гг. (Б. Черепаниха) и 2003–2007 гг. (“Якутск”) распознавалось по снимкам Landsat 5. Предварительная обработка заключалась в создании многоканальных композитов в качестве входных данных. Для наиболее точного распознавания, помимо использования исходных спектральных каналов, было решено провести преобразование размерно-

сти методом главных компонент, а также был рассчитан вегетационный индекс NDVI по каждому из снимков. Распознавание типов землепользования проводилось в модуле EnMap Box для QGIS с применением алгоритма Random Forest отдельно по каждому снимку. При этом 80% обучающей выборки использовалось для обучения модели и 20% — для оценки точности распознавания. Достоверность распознавания для всех классов превысила 89%.

Модели были переклассифицированы, т.е. выделены пять основных классов землепользования: лесопокрываемые территории, травянистая растительность (луга), используемые пахотные земли, водные объекты, антропогенные объекты. Полученные модели приведены к одному разрешению. Примеры полученных моделей показаны на рис. 2.

На основе полученной пространственной модели землепользования, а также данных о величинах *C*-фактора для каждого типа землепользования, взятых из опубликованных источников, получены пространственные модели *C*-фактора для каждого временного интервала. Значения *C*-фактора для территорий, покрытых лесами, и лугов были взяты из публикации (Panagos et al., 2015): хвойные леса — 0.0011, луга — 0.043.

Согласно открытым данным федеральной службы государственной статистики за период с 2007 по 2024 гг. (<https://rosstat.gov.ru>) в пределах муниципальных районов, где расположен участок “Якутск”, структура основных групп сельскохозяйственных культур изменилась мало. Так, посевы зерновых и зернобобовых культур сократилась с 39 до 29%, площадь картофеля увеличилась с 12 до 14%, при этом площадь кормовых культур возросла с 44 до 52%. Учитывая, что площадь пашни здесь не превышает 0.5% площади исследуемого участка, эти изменения очень слабо влияют на величины *C*-фактора за два временных периода. О слабой изменчивости севооборотов и величине *C*-фактора в пределах пахотных угодий азиатской части России говорят и другие исследования (Литвин и др., 2021).

Учитывая *C*-фактор каждой группы культур (Ларионов, 1993) в пределах пахотных угодий, можно сказать, что среднее значение для ливневого стока для обоих участков будет 0.34, а для талого стока 0.66.

2.6. Осадки и эрозионный потенциал дождевых осадков (*R*-фактор)

В данной работе в качестве основы применялась пространственная модель эрозионного индекса дождевых осадков, полученная в (Panagos et al., 2017). В ней для территории России использованы исходные данные по интенсивности дождевых

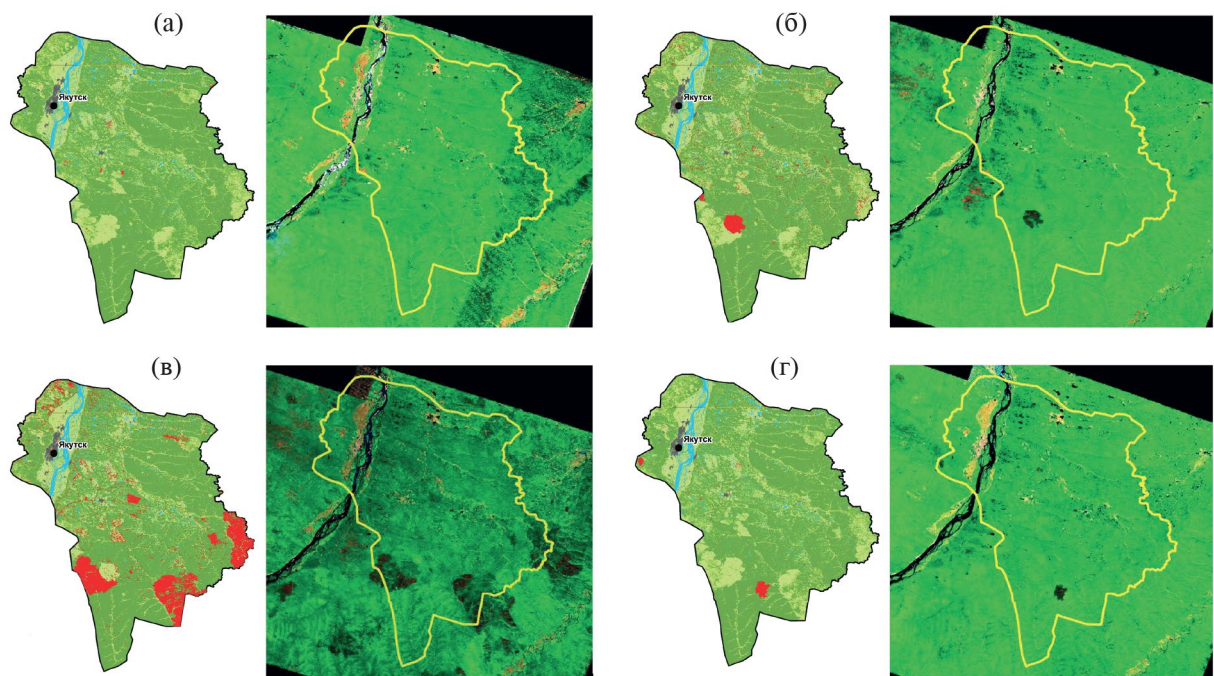


Рис. 2. Примеры территорий, затронутых лесными пожарами в разные годы на участке “Якутск” по данным модели Global Forest Change (слева – красным цветом) и их изображение на композитах снимков Landsat (справа): (а) – 2000–2001 гг., (б) – 2009 г., (в) – 2011–2012 гг., (г) – 2019 г.

Fig. 2. Examples of areas covered by forest fires over different years in the Yakutsk area according to the Global Forest Change model (on the left – in red), and their image on composites of Landsat images (on the right): (a) – 2000–2001, (б) – 2009, (в) – 2011–2012, (г) – 2019.

осадков за период с 1961–1984 гг., полученные сотрудниками МГУ.

С учетом отмечаемых изменений количества осадков и характера их выпадения в Арктике и в бассейне Лены. В частности, проведен анализ изменения количества выпадающих осадков в пределах исследуемых водосборов (Lappalainen et al., 2016). Анализ изменения выпадения осадков был выполнен на основе данных ВНИГМИ МЦД (meteo.ru).

На участке “Якутск” такой же анализ осуществлен по данным одноименной метеостанции. Полученные результаты показывают отсутствие

изменений в указанных выше временных интервалах как среднемноголетних, так и жидких осадков. Так средняя многолетняя сумма осадков за 1985–2000 гг. составляет 241 мм, а за 2001–2019 гг. – 240 мм. Величина жидких осадков составляет 162 и 163 мм соответственно. Величина твердых осадков 79 и 77 мм.

В непосредственной близости от границы водосбора р. Б. Черепанихи расположены две метеостанции (табл. 1), данные которых были использованы. В табл. 1 показано небольшое уменьшение среднемноголетней суммы годовых осадков на посту “Килиер”, с 316 мм до 292 мм. При этом дан-

Таблица 1. Изменение выпадения осадков

Table 1. Changes in precipitation

№, станция	Осадки (период), мм					
	Жидкие (1985–2000)	Жидкие (2001–2019)	Твердые (1985–2000)	Твердые (2001–2019)	Годовые (1985–2000)	Годовые (2001–2019)
24933, Килиер	207	192	108	100	316	292
24944, Олекминск	219	222	113	109	333	332

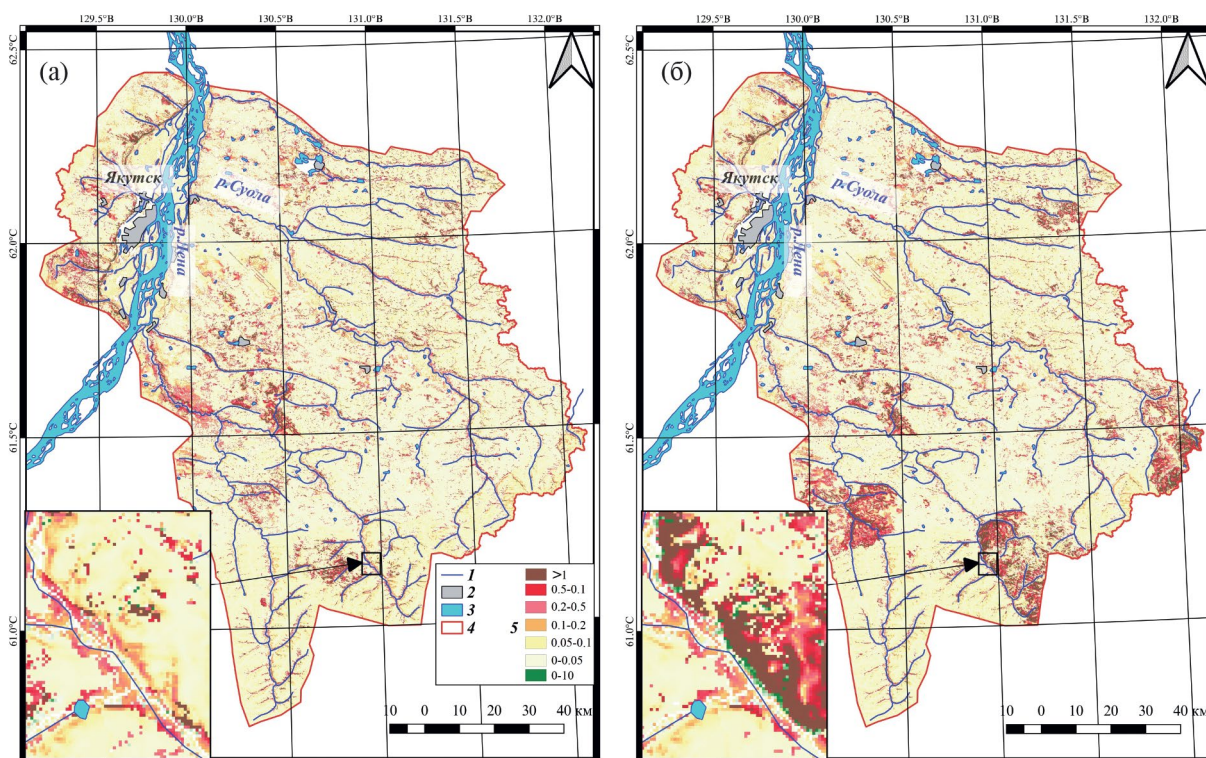


Рис. 3. Карта темпов дождевого смыва и аккумуляции почв участка “Якутск”.

(а) – “исторический” период (2003–2007 гг.); (б) – современный период (2015–2019 гг.).

1 – реки; 2 – населенные пункты; 3 – водоемы; 4 – граница водосбора; 5 – темпы дождевого смыва и аккумуляции почв, т×га/год.

Fig. 3. Map of rates of rainfall soil erosion and accumulation in the “Yakutsk” area.

(a) – “historical” period (2003–2007); (b) – modern period (2015–2019).

1 – rivers; 2 – settlements; 3 – water bodies; 4 – catchment boundary; 5 – rates of rain washout and soil accumulation, t×ha per year.

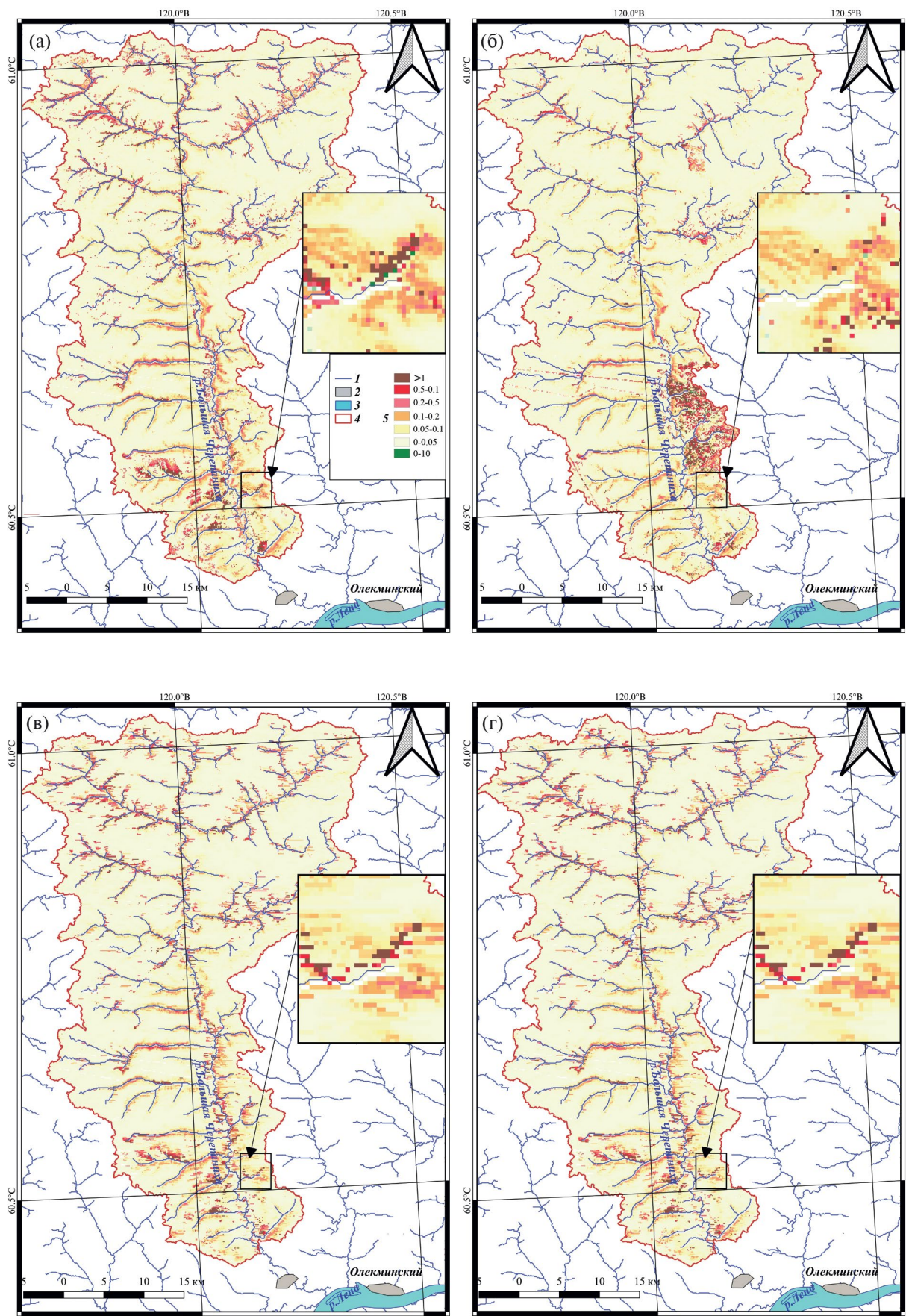
ное уменьшение происходит за счет снижения как жидких, так и твердых осадков. Можно также констатировать отсутствие изменений на посту “Олекминский”. Таким образом, на изучаемых водосборах значимых изменений количества выпадающих за год дождевых осадков в 1985–2019 гг. не выявлено.

В настоящее время в свободном доступе имеются данные реанализа ECMWF Re-Analysis 5 (ERA5). Существующие публикации как в мировой литературе (Hersbach et al., 2020), так и отечественные исследования (Григорьев и др., 2022) показывают, что в них присутствуют ошибки, которые в пределах территорий с небольшим количеством осадков могут достигать десятков процентов. Эти ошибки характерны как для определения сумм осадков, так и для определения случаев их выпадения. В пределах России особенно большие ошибки характерны для территории арктического побережья и Восточной Сибири в весенне-летний период. По этой причине в настоящей работе не были исполь-

зованы данные реанализа ERA5. Исследованиями (Литвин и др., 2021) установлено отсутствие значимой динамики *R*-фактора в исследуемом регионе. Стационарность *R*-фактора во времени дает основание использовать в расчетах карту *R*-фактора (Panagos и др., 2017).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Участок “Якутск” характеризуется очень слабой интенсивностью почвенной эрозии, показатели которой незначительно изменились между рассмотренными периодами: дождевой смыв почв изменился с 0.032 до 0.03 т/га в год, а талый смыв с 0.015 до 0.019 т/га в год. Эти оценки получены с учетом аккумуляции части смытого дождевыми водами материала на водосборе. Высокие значения эрозии на водосборе, как правило, отмечаются на крутом левом борту долины р. Лены и на правых берегах притоков р. Лены. Также относительно высокие потери почвы характерны для участков,



затронутых в прошлом пожарами (рис. 3б). Для сравнения, средние темпы эрозии почв в пределах Белгородской области составляют 3.5 т/га (Буряк и др., 2023), а в пределах Республики Татарстан – 6.1 т/га в год (Мальцев, Ермолаев, 2019).

Для современного периода (2015–2019 гг.) наибольшей интенсивностью дождевого смыва (0.18 т/га в год) характеризуются территории, покрытые черноземами обыкновенными (Voronich Chernozems Pachic), а наименьшей интенсивностью (0.01 т/га в год) палевые типичные (Haplic Cambisols Eutric).

Бассейн р. Б. Черепанихи также характеризуется очень низкими темпами как талой, так и дождевой эрозии почв. Дождевой смыв снизился с 0.04 (1985–1990 гг.) до 0.036 (2015–2019 гг.) т/га в год, а талый – с 0.031 до 0.029 т/га в год. Наибольшей интенсивностью дождевого смыва (0.1 т/га в год) характеризуются участки палевых оподзоленных почв (Haplic Cambisols Dystric), наименьшей (0.01 т/га в год) – палевых типичных (Haplic Cambisols Eutric). Относительно высокие темпы эрозии отмечаются на крутых прибрежных участках притоков и основного русла р. Б. Черепанихи (рис. 4а, б). Пространственное распределение интенсивности талой эрозии почв идентично дождевой (рис. 4в, г).

Анализируя полученные карты, а также данные табл. 2, можно сказать, что большую часть площади рассмотренных водосборов занимают территории, характеризующиеся смывом не более 0.05 т/га в год. Динамика стока взвешенных наносов на рассмотренных водосборах разнонаправлена (табл. 3). В бассейне р. Б. Черепанихи значительное превышение расчетного стока наносов, формирующегося в результате бассейновой эрозии, над фактически наблюдающимся здесь стоком наносов, свидетельствует об исключительной роли наносов бассейнового происхождения. При этом отличия в полученных величинах частично можно объяснить необходимостью калибровки транспортирующей способности потока, однако, общий вывод о реализации стока наносов за счет смыва с водосбора сохраняется. При этом сравнения с данными

Таблица 2. Распределение площадей по интенсивности ливневого смыва и аккумуляции за современный отрезок времени (2015–2019)

Table 2. Distribution of areas by intensity of storm erosion and accumulation over the modern period of time (2015–2019)

Т/га в год	Б. Черепаниха, км ²	“Якутск”, км ²
>1	15.8	187
0.5–1	17.4	129
0.2–0.5	29.9	586
0.1–0.2	44.7	1470
0.05–0.1	98.5	2430
0–0.05	1450	10700
Аккумуляция	11.6	349

сетевых наблюдений на р. Лене в районе участка “Якутск”, а также с результатами полевых исследований, свидетельствуют о значительно меньшей роли наносов бассейнового происхождения на большой реке. Так, поступление наносов с участка у г. Якутска оказывается значительно ниже стока наносов (почти в два раза) свидетельствует о преобладающем вкладе русловой эрозии в сток наносов. Сопоставление этих расчетов с величинами русловой составляющей стока наносов на прилегающем участке Лены по данным (Chalov, Ivanov, 2023) подтверждает эти выводы. По нашим оценкам, русловая эрозия на прилегающем 50-километровом участке р. Лены в 1993–2021 гг. поставляет в русло около 4.8 Мт/год материала, что значительно выше бассейновой (2015–2019 гг. – 77912 т/год) составляющей стока наносов. Поэтому в большую часть года для р. Лены при относительно малых объемах бассейновой составляющей характерно продольное увеличение стока наносов, что подтверждается как данными обработки космических снимков (Chalov, Prokoreva, 2022), так и полевыми измерениями.

Рис. 4. Карта темпов эрозии и аккумуляции почв водосбора Б. Черепанихи.

(а) – дождевой смыв за “исторический” период (1985–1989 гг.); (б) – дождевой смыв за современный период (2015–2019 гг.); (в) – талый смыв за “исторический” период (1985–1989 гг.); (г) – талый смыв за современный период (2015–2019 гг.).

1 – реки; 2 – населенные пункты; 3 – водоемы; 4 – граница водосбора; 5 – темпы смыва и аккумуляции почв, т×га/год.

Fig. 4. Map of soil erosion and accumulation in the Bolshaya Cherepanikha catchment.

(a) – rainfall erosion in “historical” period (1985–1989); (б) – rainfall erosion in modern period (2015–2019); (в) – snowmelt erosion in “historical” period (1985–1989); (г) – snowmelt erosion in modern period (2015–2019).

1 – rivers; 2 – settlements; 3 – water bodies; 4 – catchment boundary; 5 – rates of soil flushing and accumulation, t/ha per year.

Таблица 3. Величины стока взвешенных наносов на исследуемых участках**Table 3.** Values of suspended sediment yield on the studied catchment areas

Временные интервалы	SSY _{mod} [*]				SSY _{obs} ^{**}	
	Ливневой	Талый	Год	Т/год	Т×км²/год	Т/год
	Участок “Якутск”				Гидропост 03042 (Табага)	
2003—2007 гг.	3.18	1.50	4.68	73700	8.76	7.8×10 ⁶
2015—2019 гг.	3.05	1.90	4.95	77900	10.8	8.5×10 ⁶
	Водосбор Б. Черепаниха				Гидропост 03160 (Бом)	
1985—1989 гг.	4.06	3.10	7.16	12200	0.41	700
2015—2019 гг.	3.50	2.90	6.40	10900	0.37	632

Примечание. * SSY_{mod} – модуль стока наносов, рассчитанный по модельным результатам; ** SSY_{obs} – зарегистрированный модуль стока взвешенных наносов.

Так профилирование доплеровскими измерителями показало, что как при низких (8000 м³/с), так и при средних (15000 м³/с) расходах вдоль Якутского разветвления сток взвешенных наносов увеличивается: среднее повышение расхода взвешенных наносов составляет 4 кг/с (2% от расхода в верхней части разветвления) и 6.4 кг/с (3% от поступления наносов со стока Лены) (Chalov, Ivanov, 2023).

Анализ данных моделирования стока наносов с участка “Якутск” показывает небольшое увеличение величины стока наносов, что совпадает с динамикой стока наносов на посту Табага на р. Лене. Среднегодовой сток наносов, поступающих с данного водосбора, за два рассмотренных периода незначительно увеличился с 4.68 до 4.95 т/км² в год. При этом сток наносов на посту Табага равен 8.76 т/км² по данным 2003–2004 гг. и 10.82 т/км² в год по данным 2015–2019 гг.

Таким образом, можно сказать, что сток наносов по данным наблюдения на посту Табага увеличился на 25%, а сток с территории водосбора увеличился на 5–6% (табл. 3). Небольшое увеличение стока наносов с участка “Якутск” вызвано разнонаправленными тенденциями в изменении землепользования на водосборе. С одной стороны, произошло сокращение площади пашни, что привело к сокращению поступления наносов в реки. С другой стороны, сократились площади лесной и увеличились площади луговой растительности, о чем свидетельствуют данные динамики землепользования (табл. 4). В результате величина С-фактора изменилась здесь слабо, оставаясь на уровне 0.013–0.012. Небольшое увеличение (около 2.5%) доли луговой растительности может быть объяснено появлением луговых сообществ на месте про-

шедших здесь лесных пожаров за последние десятилетия (рис. 2).

В то же время на данной территории по данным модели Global Forest Change (Hansen et al., 2013), площадь, затронутая пожарами за период 2000–2019 гг., составляет 10.6%. Роль лесных пожаров в увеличении стока с территории водосборов подтверждается как отечественными, так и зарубежными авторами (Красношеков, 2018; Jumps et al., 2022; Vieira et al., 2023). Результаты воздействия пожаров на поверхностные воды в подавляющем большинстве случаев подтверждены исследованиями, проведенными на относительно небольших водосборах, <10000 км² (Belillas, Rodà, 1993; Gerla, Galloway, 1998; Inbar, Tamir, Wittenberg, 1998; Scott, Versfeld, Lesch, 1998; Earl, Blinn, 2003; Prepas и др., 2003; Lane и др., 2008; Smith и др., 2011). Речные системы высокого порядка собирают воду и материалы из обширных дренажных сетей и ослабляют биогеохимические сигналы от ландшафтов, расположенных выше по течению, за счет разбавления и других процессов в потоке (Temnerud, Bishop, 2005). Следовательно, оценки воздействия лесных пожаров на качество воды в реках, дренирующих водосборы различных размеров, особенно очень крупные, являются редкими. В нескольких исследованиях было описано воздействие лесных пожаров на качество воды на более крупных водосборах (Burke, Prepas, Pinder, 2005; Rhoades, Entwistle, Butler, 2011; Emelko и др., 2016; Emmerton и др., 2020). Воздействие лесных пожаров на качество воды в крупных реках с пологим рельефом было заметно ниже, чем на небольших водосборах с горным рельефом, тем не менее данное воздействие наблюдалось в целом ряде очень крупных речных

Таблица 4. Динамика структуры землепользования участка “Якутск” и водосбора Б. Черепаниха
Table 4. Dynamics of the land use structure of the Yakutsk and Bolshaya Cherepanikha catchments

Тип землепользования	Площадь, км²	Доля от площади водосбора, %	Площадь, км²	Доля от площади водосбора, %
Участок “Якутск”				
	2003—2007 гг.		2015—2019 гг.	
Леса	11000	69.7	10900	68.6
Луга	3770	24.0	4190	26.5
Пашня	64.9	0.40	32.2	0.20
Водосбор Б. Черепаниха				
	1985—1990 гг.		2015—2019 гг.	
Леса	1600	89.8	1680	93.8
Луга	178	9.97	108	6.05
Пашня	1.51	0.08	0.02	0.00

бассейнов. Например, такое отмечено в бассейне р. Атабаски (Западная Канада), где ряд природно-климатических характеристик идентичен характеристикам бассейна р. Лены (Emmertson и др., 2020).

После пожаров растительный покров достаточно быстро восстанавливается, поэтому по состоянию на 2019 г. из 10.6% лесных территорий, затронутых пожарами с 2000 г., только 2.5% остается под лугами. На исследуемом участке “Якутск” в период с 2003–2007 по 2015–2019 гг. наиболее интенсивные пожары произошли в 2011–2012 гг. (рис. 2), по всей видимости, как отклик на засушливое лето 2010 г. К 2014–2019 гг. произошло уже значительное зарастание гарей луговой растительностью. Поэтому на данном участке пожары оказали заметное влияние лишь на рост талого смыва, который увеличился с 1.5 до 1.9 т/км², тогда как ливневой смыв остался почти неизменным, немного сократившись с 3.18 до 3.05 т/км².

Анализ данных моделирования показывает уменьшение стока наносов с водосбора р. Б. Черепанихи, что соответствует данным динамики стока наносов на посту Бом. За два рассматриваемых периода сток наносов сократился здесь с 0.41 до 0.37 т/км² в год, т.е. на 11%, а сток наносов с водосбора — на 14% (табл. 3). Уменьшение стока наносов объясняется, на наш взгляд, динамикой землепользования — увеличением площади лесов, сокращением естественной луговой растительности и почти полным исчезновением пахотных угодий (см. табл. 4). Увеличение площади лесов могло

произойти здесь за счет распространения на север таких лиственных пород как береза и ольха, как на Приполярном Урале данные виды активно распространяются на север, в первую очередь вдоль свободных от леса участков, в том числе вдоль русел рек (Григорьев, 2011). В результате значение величины *C*-фактора на этом водосборе сократилось с 0.0055 до 0.0037.

Таким образом, впервые для лесной зоны проведен расчет эрозии почв и стока наносов с помощью модели WaTEM/SEDEM. Для верификации результаты расчетов валовые значения дождевого смыва были сопоставлены с более ранними оценками дождевого смыва на территории бассейна Лены (табл. 5). В то время как для бассейна р. Б. Черепанихи были получены близкие оценки ливневой эрозии, для участка “Якутск” они отличаются от предыдущих в 2.5–3 раза. Эта разница может быть объяснена различиями в масштабах исследований.

Работа выполнена с применением растровой модели с шагом сетки 100 м, а исследование авторов (Шынбергенов, Ермолаев, 2017) выполнено на сетке с шагом 250 м. Там же (Шынбергенов, Ермолаев, 2017) используется модель НИЛЭПиРП (Ларионов, 1993) вместо модели RUSLE. Различие между оценками, полученными в нашей работе и исследовании (Chalov et al., 2023), может быть объяснено использованием различных методик расчета *LS*-фактора. Так, в нашем случае применялась методика М.А. Nearing, а в работе (Chalov et al., 2023) — методика НИЛЭПиРП (Ларионов,

Таблица 5. Среднее значение валовой ливневой эрозии ($t \times km^2/год$) за современный период (2015–2019 гг.)

Table 5. Average value of rainfall gross erosion (t/km^2 per year) for the modern period (2015–2019)

Оценка интенсивности эрозии	Водосбор	
	“Якутск”	Б. Черепаниха
WaTEM/SEDEM	10.0	4.90
По (Шынбергенов, Ермолаев, 2017)	4.70	4.80
По (Chalov et al., 2021)	3.00	5.00
По (Borrelli et al., 2017)	0–100	0–100

Таблица 6. Модельные величины стока взвешенных наносов в реки от стока дождевых вод, полученные в бассейне р. Б. Черепанихи при использовании разного шага сетки

Table 6. Model values of suspended sediment yield into rivers from rainwater runoff obtained in the Bolshaya Cherepanikha River basin using different grid spacing

Шаг сетки, м	Сток взвешенных наносов, $t \times km^2/год$	
	1985–1990 гг.	2015–2019 гг.
30	3.02	2.60
100	4.06	3.50

1993). Отличия могут быть связаны также с использованием различных исходных данных по смываемости почв.

Сопоставлены также различия в оценках стока наносов, полученных с помощью модели WaTEM/SEDEM с разным шагом сетки (30 и 100 м) (табл. 6). На сетке с шагом 100 м происходит увеличение модельной оценки стока взвешенных наносов, однако, оно не превышает 25%, что сопоставимо с погрешностью измерения стока взвешенных наносов полевыми методами. Аналогичные данные, показывающие изменение модельной оценки стока наносов с изменением пространственного разрешения модели, приведены в статье авторов методики WaTEM/SEDEM (Van Rompaey et al., 2001). Однако при сравнении результатов, полученных с помощью сетки шагом 20 м и 100 м, различия еще сильнее и составляют около 40%. Схожие показатели были получены и другими учеными (Gao, 1998; Brasington, Richards 1998, Zhang et al., 1999).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов с помощью физико-статистической модели WaTEM/SEDEM, а также модифицированной модели ГГИ были получены карты эрозии и аккумуляции почв от дождевого смыва, а также карты эрозии почв от талого смыва. Анализ карт темпов смыва показывает, что более 90% территории рассмотренных водосборов подвержено эрозии, а процессы аккумуляции сосредоточены на менее чем 10% площади. Среднемноголетнее значение интенсивности почвенной эрозии за два рассмотренных периода (2003–2007 и 2015–2019 гг.) в пределах водосбора в районе г. Якутска немного возросло с 0.047 до 0.049 т/га в год, прежде всего за счет роста талого смыва, а в пределах водосбора р. Б. Черепанихи сократилось с 0.072 (1985–1990 гг.) до 0.064 т/га в год (2015–2019 гг.). Снижение темпов смыва почв на залесенном водосборе р. Б. Черепанихи может быть объяснено сокращением лугов и ростом площади лесов за счет замены прибрежной травянистой растительности распространяющимися на север мелколиственными породами деревьев.

Результаты моделирования смыва на водосборах сопоставлены с данными измерений стока взвешенных наносов в реках. Замеренный сток наносов р. Б. Черепанихи демонстрирует ту же тенденцию к снижению, что и эрозия почв на водосборе. При этом превышение модельных значений модуля стока наносов над измеренными на гидропостах говорит о необходимости калибровки коэффициентов транспортирующей способности модели WaTEM/SEDEM для максимально залесенных водосборов. На участке в районе г. Якутска смоделированный вынос продуктов эрозии в реку несколько увеличился, что также соответствует направленности изменения стока наносов на гидропостах. Однако вклад стока наносов с участка “Якутск” в общий сток наносов р. Лены по-прежнему невелик.

В рассмотренных водосборах уменьшение шага расчетной сетки со 100 до 25 м меняет оценку стока наносов на 25%, что соответствует точности его определения на постах. В то же время необходимо отметить, что приведенные изменения в расчетных значениях эрозии и стока наносов имеют очень небольшие значения и могут быть обусловлены погрешностью применяемой методики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью за-

шиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан “Научно-технологическое развитие Республики Татарстан”.

Подбор данных о стоке наносов выполнен при поддержке Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (“Приоритет-2030”), а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-614).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк Ж.А., Нарожная А.Г., Маринина О.А. (2023) Эрозионная опасность пахотных земель Белгородской области. *Региональные геосистемы*. Т. 47. № 1. С. 101–115.
<https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115>
- Голосов В.Н. (2006) Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС. 296 с.
- Григорьев А.А. (2011) Формирование древостоев лиственницы и березы в высокогорьях Приполярного Урала в условиях современного изменения климата. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет. 23 с.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. (2022) Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. Т. 86. № 3. С. 435–446.
<https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
- Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С. и др. (2017) Картографическая модель речных бассейнов европейской России. *География и природные ресурсы*. № 2. С. 27–36.
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-2\(27-36\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(27-36))
- Жидкин А.П., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. и др. (2021) Цифровое моделирование строения и степени эродированности почвенного покрова (Прохоровский район Белгородской области). *Почвоведение*. № 1. С. 17–30.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21010159>
- Краснощеков Ю.Н. (2018) Почвы горных лесов Прибайкалья и их трансформация под влиянием пожаров. *Почвоведение*. № 4. С. 387–401.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X18040019>
- Ларионов Г.А. (1993) Эрозия и дефляция почв. М: Изд-во МГУ. 200 с.
- Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф. и др. (2021) География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и Дальнего Востока. *Почвоведение*. № 1. С. 136–148.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2101007X>
- Магрицкий Д.В. (2022) Новые данные о распределении нормы стока воды на Северо-Востоке России и притоке речных вод в арктические моря. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. № 6. С. 70–85.
https://doi.org/10.35567/19994508_2022_6_5
- Магрицкий Д.В., Банщикова Л.С. (2021) Реакция стока наносов в бассейне р. Лены на изменения климата и хозяйственную деятельность. В сб.: Динамика и взаимодействие геосфер земли. *Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле*. В 3 т. Т. II. Науки о Земле. С. 61–65.
- Магрицкий Д.В., Чалов С.Р., Гармаев Е.Ж. и др. (2023) Новые данные о трансформации стока воды и наносов в дельте реки Лены по итогам экспедиционных измерений в августе 2022 г. *Пробл. Аркт. Антаркт.* Т. 69. № 2. С. 171–190.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190>
- Мальцев К.А., Ермолаев О.П. (2019) Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях европейской части России. *Почвоведение*. № 12. С. 1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104>
- Рыжов Ю.В. (2009) Эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейнах малых рек юга Восточной Сибири. *География и природные ресурсы*. № 3. С. 94–101.
- Цыпленков А.С., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. (2022) Водная эрозия почв в бассейнах крупнейших рек Сибири. *Известия Русского географического общества*. Т. 154. № 5–6. С. 86–111.
- Шынбергенов Е.А., Ермолаев О.П. (2017) Потенциальная эрозия почв бассейна р. Лены. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. Т. 27. № 4. С. 513–528.
- Baartman J.E.M., Masselink R., Keesstra S.D. et al. (2013) Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. *Earth Surf. Processes Landforms*. Vol. 38. Iss. 12. P. 1457–1471.
<https://doi.org/10.1002/esp.3434>
- Belillas C.M., Rodà F. (1993) The effects of fire on water quality, dissolved nutrient losses and the export of particulate matter from dry heathland catchments. *J. Hydrol.* Vol. 150. Iss. 1. P. 1–17.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90153-z](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90153-z)
- Bhattarai R., Dutta D. (2008) A comparative analysis of sediment yield simulation by empirical and process-oriented models in Thailand (Une analyse comparative de simulations de l'exportation sédimentaire en Thaïlande à l'aide de modèles empiriques et de processus). *Hydrol. Sci. J.* Vol. 53. Iss. 6. P. 1253–1269.
<https://doi.org/10.1623/hysj.53.6.1253>
- Boomer K.B., Weller D.E., Jordan T.E. (2008) Empirical models based on the universal soil loss equation fail to predict sediment discharges from Chesapeake Bay

- catchments. *J. Environ. Qual.* Vol. 37. Iss. 1. P. 79–89.
<https://doi.org/10.2134/jeq2007.0094>
- Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. et al. (2021) Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Sci. Total Environ.* Vol. 780. 146494.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. et al. (2017) An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* Vol. 8. No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Borselli L., Cassi P., Torri D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*. Vol. 75. Iss. 3. P. 268–277.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Brasington J., Richards K. (1998) Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL. *Comput. Geosci.* Vol. 24. No. 4. P. 299–314.
- Burke J.M., Prepas E.E., Pinder S. (2005) Runoff and phosphorus export patterns in large forested watersheds on the western Canadian Boreal Plain before and for 4 years after wildfire. *J. Environ. Eng. Sci.* Vol. 4. No. 5. P. 319–325.
<https://doi.org/10.1139/s04-072>
- Chalov S., Ivanov V. (2023). 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*. Vol. 230. 107212.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107212>
- Chalov S., Prokopenko K. (2022) Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel. *Water*. Vol. 14. Iss. 23. 3845.
<https://doi.org/10.3390/w14233845>
- Chalov S., Prokopenko K., Habel M. (2021) North to south variations in the suspended sediment transport budget within large Siberian River deltas revealed by remote sensing data. *Remote Sens.* Vol. 13. Iss. 22. P. 4549.
<https://doi.org/10.3390/rs13224549>
- Cohen S., Kettner A.J., Syvitski J.P.M. et al. (2013) WBM-sed, a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation. *Comput. Geosci.* Vol. 53. P. 80–93.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.011>
- De Vente J., Poesen J., Verstraeten G. et al. (2008) Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change*. Vol. 60. Iss. 3–4. P. 393–415.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.05.002>
- Earl S.R., Blinn D.W. (2003) Effects of wildfire ash on water chemistry and biota in South-Western U.S.A. streams. *Freshwater Biol.* Vol. 48. Iss. 6. P. 1015–1030.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01066.x>
- Emelko M.B., Stone M., Silins U. et al. (2016) Sediment-phosphorus dynamics can shift aquatic ecology and cause downstream legacy effects after wildfire in large river systems. *Global Change Biol.* Vol. 22. Iss. 3. P. 1168–1184.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13073>
- Emmerton C.A., Cooke C.A., Hustins S. et al. (2020) Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Resources*. Vol. 183. 116071.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116071>
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. (2007) The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.* Vol. 45. Iss. 2. RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Ferro V., Porto P. (2000) Sediment delivery distributed (SEDD) Model. *J. of Hydrologic Engineering*. Vol. 5. Iss. 4. P. 411–422.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:4\(411\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:4(411))
- Gao J. (1998) Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid DEMs at a microscale. *Int. J. of Geogr. Inform. Sci.* Vol. 12. Iss. 8. P. 875–890.
<https://doi.org/10.1080/136588198241545>
- Gay A., Cerdan O., Mardhel V. et al. (2016) Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *J. Soils Sediments*. Vol. 16. No. 1. P. 280–293.
<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1235-y>
- Gerla P.J., Galloway J.M. (1998) Water quality of two streams near Yellowstone Park, Wyoming, following the 1988 Clover-Mist wildfire. *Environ. Geol.* Vol. 36. No. 1–2. P. 127–136.
<https://doi.org/10.1007/s002540050328>
- Golosov V., Yermolaev O., Litvin L. et al. (2018) Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain. *Land Degradation & Development*. Vol. 29. Iss. 8. P. 2658–2667.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al. (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. Vol. 342. No. 6160. P. 850–853.
<https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Pickens A.H. et al. (2022) Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data. *Environ. Res. Lett.* Vol. 17. No. 3. P. 034050. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac46ec>
- Hartmann J., Moosdorf N. (2012) The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochem., Geophys., Geosyst.* Vol. 13. Iss. 12. <https://doi.org/10.1029/2012GC004370>
- Heckmann T., Cavalli M., Cerdan O. et al. (2018) Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth-Sci. Rev.* Vol. 187. P. 77–108.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004>
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M. et al. (2017) SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*. Vol. 12. No. 2. e0169748.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* Vol. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Inbar M., Tamir M., Wittenberg L. (1998) Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*. Vol. 24. Iss. 1. P. 17–33.
[https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(97\)00098-6](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(97)00098-6)
- Jumps N., Gray A.B., Guiling J.J. (2022) Wildfire impacts on the persistent suspended sediment dynamics of the Ventura River, California. *J. of Hydrol.: Region. Studies*.

- Vol. 41. 101096.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101096>
- Lane P.N.J., Sheridan G.J., Noske P.J. et al. (2008) Phosphorus and nitrogen exports from SE Australian forests following wildfire. *J. Hydrol.* Vol. 361. No. 1-2. P. 186–198.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.041>
- Lappalainen H.K., Kerminen V., Petäjä T. et al. (2016) Pan-Eurasian Experiment (PEEX): towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the northern Eurasian region. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 16. Iss. 22. P. 14421–14461.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Pakhomova O.M. (2020) Potential Hydrological Restrictions on Water Use in the Basins of Rivers Flowing into Russian Arctic Seas. *GES.* Vol. 13. No. 2. P. 25–34.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-59>
- Maltsev K., Golosov V., Yermolaev O. et al. (2022) Assessment of Net Erosion and Suspended Sediments Yield within River Basins of the Agricultural Belt of Russia. *Water.* Vol. 14. Iss. 18. P. 2781.
<https://doi.org/10.3390/w14182781>
- Melkonian A.K., Willis M.J., Pritchard M.E. et al. (2016) Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya. *Remote Sensing of Environment.* Vol. 174. P. 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.001>
- Nasonova O.N., Gusev Y.M., Kovalev E. (2023) Climate Change Impact on Water Balance Components in Arctic River Basins. *GES.* Vol. 15. No. 4. P. 148–157.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-144>
- Nearing M.A. (1997) A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 61. Iss. 3. P. 917–919.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030029x>
- Nummelin A., Ilicak M., Li C., Smedsrud L.H. (2016) Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic Ocean stratification, circulation, and sea ice cover. *J. Geophys. Res.: Oceans.* Vol. 121. Iss. 1. P. 617–637.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011156>
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. (2017) Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Sci. Rep.* Vol. 7. 4175.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. (2015) Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy.* Vol. 48. P. 38–50.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Park H., Sherstiukov A.B., Fedorov A.N. et al. (2014) An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia. *Environ. Res. Lett.* Vol. 9. No. 6. 064026.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064026>
- Pietroń J., Chalov S.R., Chalova A.S. et al. (2017) Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin. *Catena.* Vol. 152. P. 82–93.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
- Prepas E.E., Burke J.M., Chanasyk D.S. et al. (2003) Impact of wildfire on discharge and phosphorus export from the Sakwatamau watershed in the Swan Hills, Alberta, during the first two years. *J. Environ. Eng. Sci.* Vol. 2. No. S1. P. 63–72. <https://doi.org/10.1139/s03-036>
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. et al. (1997) Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: *Agriculture Handbook*. No. 537. 403 p.
- Reuter H.I., Neison A., Strobl P. et al. (2009) A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters. In: *IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symp.* Cape Town, South Africa: IEEE. P. 240–243.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5417688>
- Rhoades C.C., Entwistle D., Butler D. (2011) The influence of wildfire extent and severity on streamwater chemistry, sediment and temperature following the Hayman Fire, Colorado. *Int. J. Wildland Fire.* Vol. 20. No. 3. P. 430–442.
<https://doi.org/10.1071/WF09086>
- Scott D.F., Versfeld D.B., Lesch W. (1998) Erosion and sediment yield in relation to afforestation and fire in the mountains of the western cape province, south Africa. *South African Geogr. J.* Vol. 80. Iss. 1. P. 52–59.
<https://doi.org/10.1080/03736245.1998.9713644>
- Sheng M., Fang H. (2014) Research progress in WaTEM/SEDEM model and its application prospect. *Progress in geography.* Vol. 33. Iss. 1. P. 85–91.
<https://doi.org/10.11820/dlkxjz.2014.01.010>
- Smith H.G., Sheridan G.J., Lane P.N. et al. (2011) Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *J. Hydrol.* Vol. 396. Iss. 1-2. P. 170–192.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.043>
- Tadono T., Ishida H., Oda F. et al. (2014) Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Inf. Sci.* Vol. II-4. P. 71–76.
<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>
- Temnerud J., Bishop K. (2005) Spatial Variation of Streamwater Chemistry in Two Swedish Boreal Catchments: Implications for Environmental Assessment. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 39. Iss. 6. P. 1463–1469.
<https://doi.org/10.1021/es040045q>
- Van Rompaey A.J.J., Verstraeten G., Van Oost K. et al. (2001) Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surf. Processes Landforms.* Vol. 26. Iss. 11. P. 1221–1236.
<https://doi.org/10.1002/esp.275>
- Van Rompaey A., Bazzoffi P., Jones R.J.A. et al. (2005) Modeling sediment yields in Italian catchments. *Geomorphology.* Vol. 65. Iss. 1-2. P. 157–169.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.006>
- Verstraeten G., Prosser I.P., Fogarty P. (2007) Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia. *J. Hydrol.* Vol. 334. Iss. 3-4. P. 440–454.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.025>

- Vieira D.C.S., Borrelli P., Jahanianfard D. et al. (2023) Wildfires in Europe: Burned soils require attention. *Environ. Res.* Vol. 217. 114936. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114936>
- Vihma T., Uotila P., Sandven S. et al. (2019) Towards an advanced observation system for the marine Arctic in the framework of the Pan-Eurasian Experiment (PEEX). *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 19. Iss. 3. P. 1941–1970. <https://doi.org/10.5194/acp-19-1941-2019>
- Wessel B., Huber M., Wohlfart C. et al. (2018) Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing.* Vol. 139. P. 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.017>
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *U.S. Department of Agricultural HandBook.* No. 537. 67 p.
- Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R. et al. (2017) A high-accuracy map of global terrain elevations: Accurate Global Terrain Elevation map. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 44. Iss. 11. P. 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Zhang X., Drake NA, Wainwright J, Mulligan M. (1999) Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: scaling issues and a fractal method for their solution. *Earth Surf. Processes Landforms.* Vol. 24. Iss. 9. P. 763–779. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199908\)24:9<763::AID-ESP9>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9<763::AID-ESP9>3.0.CO;2-J)
- Zhao G., Gao P., Tian P. et al. (2020) Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China. *Catena.* Vol. 185. 104284. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104284>

DYNAMICS OF EROSION AND SEDIMENT SUPPLY IN NEAR-PRISTINE LOWLAND CATCHMENTS OF CENTRAL SIBERIA DUE TO LAND USE CHANGES AND FOREST FIRES¹

K.A. Maltsev^{a,#}, S.R. Chalov^b, M.A. Ivanov^a, T.S. Maltseva^a, E.A. Fingert^b, and E.V. Petrova^a

^a Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environment, Department of Landscape Ecology, Kazan, Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

[#] E-mail: mlcvkirill@mail.ru

The article examines a quantitative assessment of basin erosion and suspended sediment yield in poorly developed catchments within the Lena River basin. The first catchment (15740 km²) is located in the middle reaches of the Lena River near the city of Yakutsk. The second catchment (1709 km²) is located in the headward portion of the Bolshaya Cherepanikha River basin. The assessment was carried out using the erosion-accumulation model WaTEM/SEDEM, as well as a modified model developed by the State Hydrology Institute (SHI) applied to the forested catchments of the river basin. The amount of soil lost to erosion and suspended sediment yield were obtained for each catchment. The long-term average value of eroded soil within the catchment area near Yakutsk increased from 4.7 (2003–2007) to 4.9 (2015–2019) t/km² per year most likely due to replacement of tree coverage with meadows in the areas effected by wild fires; and decreased from 7.2 (1985–1990) to 6.4 (2015–2019) t/km² per year within the Bolshaya Cherepanikha River catchment likely due to expansion of tree coverage, decrease of meadows, and disappearance of cropland. To verify the models, the modeling results were compared with measured suspended sediment yield at gauging station. It was established that the observed value of sediment yield according to data from the Bom gauging station located within Bolshaya Cherepanikha River catchment also decreased during two studied periods from 0.41 to 0.37 t/km² per year. The decline is explained by a decrease in the intensity of agricultural activity in the catchment, as well as an increase in the area covered by forest and a decrease in meadows. Sediment yield trends within the catchment area near the city of Yakutsk and the Lena River were also compared with each other. Thus, the measured value of suspended sediment yield in Lena at the Tabaga gauging station was characterized by an increasing trend from 8.76 to 10.82 t/km² per year over the same periods. The results showed a significant contribution of basin erosion to sediment yield in smaller rivers (Bolshaya Cherepanikha River), while in the large rivers, like Lena River still remains very small.

Keywords: WaTEM/SEDEM; rainfall soil erosion; snowmelt erosion; deposition; sediment yield; land cover dynamics; Lena River

¹ For citation: Maltsev K.A., Chalov S.R., Ivanov M.A., Maltseva T.S., Fingert E.A., and Petrova E.V. (2025) Dynamics of erosion and sediment supply in near-pristine lowland catchments of Central Siberia due to land use changes and forest fires. *Geomorfologiya i Paleogeografiya.* Vol. 56. No. 2. P. 231–250 (in Russ.); <https://doi.org/10.31857/S2949178925020043>; <https://elibrary.ru/GPTLUQ>

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (post-docs) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan “Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan”.

The collection of data on sediment runoff was carried out with the support of the Strategic Academic Leadership Program of Kazan (Volga Region) Federal University (“Priority-2030”), as well as with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2024-614).

REFERENCES

- Baartman J.E.M., Masselink R., Keesstra S.D. et al. (2013) Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. *Earth Surf. Processes Landforms*. No. 38. Iss. 12. P. 1457–1471. <https://doi.org/10.1002/esp.3434>
- Belillas C.M., Rodà F. (1993) The effects of fire on water quality, dissolved nutrient losses and the export of particulate matter from dry heathland catchments. *J. Hydrol.* Vol. 150. Iss. 1. P. 1–17. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90153-z](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90153-z)
- Bhattarai R., Dutta D. (2008) A comparative analysis of sediment yield simulation by empirical and process-oriented models in Thailand (Une analyse comparative de simulations de l'exportation sédimentaire en Thaïlande à l'aide de modèles empiriques et de processus). *Hydrol. Sci. J.* Vol. 53. Iss. 6. P. 1253–1269. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.6.1253>
- Boomer K.B., Weller D.E., Jordan T.E. (2008) Empirical models based on the universal soil loss equation fail to predict sediment discharges from Chesapeake Bay catchments. *J. Environ. Qual.* Vol. 37. Iss. 1. P. 79–89. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0094>
- Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. et al. (2021) Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Sci. Total Environ.* Vol. 780. 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. et al. (2017) An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* Vol. 8. No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Borselli L., Cassi P., Torri D. (2008) Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*. Vol. 75. Iss. 3. P. 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Brasington J., Richards K. (1998) Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for topmodel. *Comput. Geosci.* Vol. 24. No. 4. P. 299–314.
- Burke J.M., Prepas E.E., Pinder S. (2005) Runoff and phosphorus export patterns in large forested watersheds on the western Canadian Boreal Plain before and for 4 years after wildfire. *J. Environ. Eng. Sci.* Vol. 4. No. 5. P. 319–325. <https://doi.org/10.1139/s04-072>
- Buryak Zh.A., Narozhnyaya A.G., Marinina O.A. (2023) Erosion risk of arable land in the Belgorod oblast. *Regional'nye geosistemy*. Vol. 47. No. 1. P. 101–115 (in Russ). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115>
- Chalov S., Ivanov V. (2023) 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*. Vol. 230. 107212. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107212>
- Chalov S., Prokopenko K. (2022) Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel. *Water*. Vol. 14. Iss. 23. 3845. <https://doi.org/10.3390/w14233845>
- Chalov S., Prokopenko K., Habel M. (2021) North to south variations in the suspended sediment transport budget within large Siberian River deltas revealed by remote sensing data. *Remote Sens.* Vol. 13. Iss. 22. P. 4549. <https://doi.org/10.3390/rs13224549>
- Cohen S., Kettner A.J., Syvitski J.P.M. et al. (2013) WBM-sed, a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation. *Comput. Geosci.* Vol. 53. P. 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.011>
- de Vente J., Poesen J., Verstraeten G. et al. (2008) Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change*. Vol. 60. Iss. 3–4. P. 393–415. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.05.002>
- Earl S.R., Blinn D.W. (2003) Effects of wildfire ash on water chemistry and biota in South-Western U.S.A. streams. *Freshwater Biol.* Vol. 48. Iss. 6. P. 1015–1030. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01066.x>
- Emelko M.B., Stone M., Silins U. et al. (2016) Sediment-phosphorus dynamics can shift aquatic ecology and cause downstream legacy effects after wildfire in large river systems. *Global Change Biol.* Vol. 22. Iss. 3. P. 1168–1184. <https://doi.org/10.1111/gcb.13073>
- Emmerton C.A., Cooke C.A., Hustins S. et al. (2020) Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Resources*. Vol. 183. 116071. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116071>
- Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S. et al. (2017) Cartographic model of river basins of European Russia. *Geografiya i prirodnye resursy*. No. 2. P. 131–138 (in Russ). <https://doi.org/10.1134/S1875372817020032>
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. (2007) The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.* Vol. 45. Iss. 2. RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

- Ferro V., Porto P. (2000) Sediment delivery distributed (SEDD) Model. *J. of Hydrol. Engineering*. Vol. 5. Iss. 4. P. 411–422.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:4\(411\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:4(411))
- Gao J. (1998) Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid DEMs at a microscale. *Int. J. of Geogr. Information Sci.* Vol. 12. Iss. 8. P. 875–890. <https://doi.org/10.1080/136588198241545>
- Gay A., Cerdan O., Mardhel V. et al. (2016) Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *J. Soils Sediments*. Vol. 16. No. 1. P. 280–293.
<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1235-y>
- Gerla P.J., Galloway J.M. (1998) Water quality of two streams near Yellowstone Park, Wyoming, following the 1988 Clover-Mist wildfire. *Environ. Geol.* Vol. 36. No. 1-2. P. 127–136.
<https://doi.org/10.1007/s002540050328>
- Golosov V. (2006) Eroзионно-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin (Erosion and accumulation processes in river basins of developed plains). Moscow: GEOS (Publ.). 296 p. (in Russ).
- Golosov V., Yermolaev O., Litvin L. et al. (2018) Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain. *Land Degradation & Development*. Vol. 29. Iss. 8. P. 2658–2667.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
- Grigoriev A.A. (2011) Formirovanie drevostoev listvennitsy i berezy v vysokogor'yakh Pripolyarnogo Urala v usloviyakh sovremennogo izmeneniya klimata (Formation of larch and birch stands in the highlands of the Subpolar Urals under conditions of modern climate change). PhD thesis. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet. 23 p. (in Russ).
- Grigoriev V. Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M. (2022) Spatial and Temporal Variability of ERA5 Precipitation Accuracy over Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya geograficheskaya*. Vol. 86. No. 3. P. 435–446 (in Russ).
<https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al. (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. Vol. 342. No. 6160. P. 850–853.
<https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Pickens A.H. et al. (2022) Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data. *Environ. Res. Lett.* Vol. 17. No. 3. P. 034050. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac46ec>
- Hartmann J., Moosdorf N. (2012) The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochem., Geophys., Geosyst.* Vol. 13. Iss. 12.
<https://doi.org/10.1029/2012GC004370>
- Heckmann T., Cavalli M., Cerdan O. et al. (2018) Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth-Sci. Rev.* Vol. 187. P. 77–108.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004>
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M. et al. (2017) SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*. Vol. 12. No. 2. e0169748.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* Vol. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Inbar M., Tamir M., Wittenberg L. (1998) Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*. Vol. 24. Iss. 1. P. 17–33.
[https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(97\)00098-6](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(97)00098-6)
- Jumps N., Gray A.B., Guilinger J.J. (2022) Wildfire impacts on the persistent suspended sediment dynamics of the Ventura River, California. *J. of Hydrol.: Region. Studies*. Vol. 41. 101096.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101096>
- Krasnoshchekov Y.N. (2018) Soils of mountainous forests and their transformation under the impact of fires in Baikal region. *Eurasian Soil Sci.* Vol. 51. No. 4. P. 371–384.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X18040019>
- Lane P.N.J., Sheridan G.J., Noske P.J. et al. (2008) Phosphorus and nitrogen exports from SE Australian forests following wildfire. *J. Hydrol.* Vol. 361. No. 1-2. P. 186–198.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.041>
- Lappalainen H.K., Kerminen V., Petäjä T. et al. (2016) Pan-Eurasian Experiment (PEEX): towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the northern Eurasian region. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 16. Iss. 22. P. 14421–14461.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>
- Larionov G.A. (1993) Eroziya i deflyatsiya pochv (Erosion and soil deflation). Moscow: MGU (Publ.). 200 p. (in Russ).
- Litvin L.F., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F. et al. (2021) Dynamics of agricultural soil erosion in Siberia and Far East. *Eurasian Soil Sci.* No. 1. P. 136–148 (in Russ).
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2101007X>
- Magritsky D.V. (2022) New data on the distribution of water flow rates in the North-East of Russia and the influx of river waters into the Arctic seas. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problema, tekhnologii, upravlenie*. No. 6. P. 70–85 (in Russ).
https://doi.org/10.35567/19994508_2022_6_5
- Magritsky D.V., Banshchikova L.S. (2021) Sediment yield response in the river basin. Lena on climate change and economic activity. In: *Dinamika i vzaimodeistvie geosfer zemli. Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 100-letiyu podgotovki v Tomskom gosudarstvennom universitete spetsialistov v oblasti nauk o Zemle*. V 3 t. Tom II. Nauki o Zemle. P. 61–65 (in Russ).
- Magritsky D.V., Chalov S.R., Garmaev E. Zh. et al. (2023) New data on the transformation of water and sediment flow in the Lena River delta based on the results of expeditionary measurements in August 2022. *Probl. Arkt. Antarkt.* Vol. 69. No. 2. P. 171–190.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190>
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Pakhomova O.M. (2020) Potential Hydrological Restrictions on Water Use in the Basins of Rivers Flowing into Russian Arctic Seas. *GES*.

- Vol. 13. No. 2. P. 25–34.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-59>
- Maltsev K., Golosov V., Yermolaev O. et al. (2022) Assessment of Net Erosion and Suspended Sediments Yield within River Basins of the Agricultural Belt of Russia. *Water*. Vol. 14. Iss. 18. P. 2781.
<https://doi.org/10.3390/w14182781>
- Maltsev K.A., Yermolaev O.P. (2019) Potential soil loss from erosion on arable lands in the European part of Russia. *Eurasian Soil Sci.* Vol. 52. No. 12. P. 1588–1597.
<https://doi.org/10.1134/S106422931912010X>
- Melkonian A.K., Willis M.J., Pritchard M.E. et al. (2016) Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 174. P. 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.001>.
- Nasonova O.N., Gusev Y.M., Kovalev E. (2023) Climate Change Impact on Water Balance Components in Arctic River Basins. *GES*. Vol. 15. No. 4. P. 148–157.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-144>
- Nearing M.A. (1997) A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 61. Iss. 3. P. 917–919.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030029x>
- Nummelin A., Ilicak M., Li C., Smedsrud L.H. (2016) Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic Ocean stratification, circulation, and sea ice cover. *J. Geophys. Res.: Oceans*. Vol. 121. Iss. 1. P. 617–637.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011156>
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. (2015) Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*. Vol. 48. P. 38–50.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. (2017) Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Sci. Rep.* Vol. 7. 4175.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Park H., Sherstiukov A.B., Fedorov A.N. et al. (2014) An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia. *Environ. Res. Lett.* Vol. 9. No. 6. 064026.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064026>
- Pietroń J., Chalov S.R., Chalova A.S. et al. (2017) Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin. *Catena*. Vol. 152. P. 82–93.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
- Prepas E.E., Burke J.M., Chanasyk D.S. et al. (2003) Impact of wildfire on discharge and phosphorus export from the Sakwatamau watershed in the Swan Hills, Alberta, during the first two years. *J. Environ. Eng. Sci.* Vol. 2. No. S1. P. 63–72. <https://doi.org/10.1139/s03-036>
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. et al. (1997) Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: *Agriculture Handbook*. No. 537. 403 p.
- Reuter H.I., Neison A., Strobl P. et al. (2009) A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters. In: *IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symp.* Cape Town, South Africa: IEEE. P. 240–243.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5417688>
- Rhoades C.C., Entwistle D., Butler D. (2011) The influence of wildfire extent and severity on streamwater chemistry, sediment and temperature following the Hayman Fire, Colorado. *Int. J. Wildland Fire*. Vol. 20. No. 3. P. 430–442.
<https://doi.org/10.1071/WF09086>
- Ryzhov Yu.V. (2009) The erosion-accumulative processes within the basins of small rivers of southern East Siberia. *Geografiya i prirodnye resursy*. Vol. 30. No. 3. P. 265–271 (in Russ). <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2009.09.011>
- Scott D.F., Versfeld D.B., Lesch W. (1998) Erosion and sediment yield in relation to afforestation and fire in the mountains of the western cape province, south Africa. *South African Geogr. J.* Vol. 80. Iss. 1. P. 52–59.
<https://doi.org/10.1080/03736245.1998.9713644>
- Sheng M., Fang H. (2014) Research progress in WaTEM/SEDEM model and its application prospect. *Progress in geography*. Vol. 33. Iss. 1. P. 85–91.
<https://doi.org/10.11820/dlkxjz.2014.01.010>
- Shynbergenov E.A., Ermolaev O.P. (2017) Potential soil erosion in the river basin. Lena. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*. Vol. 27. No. 4. P. 513–528 (in Russ).
- Smith H.G., Sheridan G.J., Lane P.N. et al. (2011) Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *J. Hydrol.* Vol. 396. Iss. 1–2. P. 170–192.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.043>
- Tadono T., Ishida H., Oda F. et al. (2014) Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Inf. Sci.* Vol. II-4. P. 71–76.
<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>
- Temnerud J., Bishop K. (2005) Spatial Variation of Streamwater Chemistry in Two Swedish Boreal Catchments: Implications for Environmental Assessment. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 39. Iss. 6. P. 1463–1469.
<https://doi.org/10.1021/es040045q>
- Tsyplenkov A.S., Chalov S.R., Shinkareva G.L. (2022) Water erosion of soils in the basins of the largest rivers in Siberia. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. Vol. 154. No. 5–6. P. 86–111 (in Russ).
- Van Rompaey A., Bazzoffi P., Jones R.J.A. et al. (2005) Modeling sediment yields in Italian catchments. *Geomorphology*. Vol. 65. Iss. 1–2. P. 157–169.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.006>
- Van Rompaey A.J.J., Verstraeten G., Van Oost K. et al. (2001) Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surf. Processes Landforms*. Vol. 26. Iss. 11. P. 1221–1236.
<https://doi.org/10.1002/esp.275>
- Verstraeten G., Prosser I.P., Fogarty P. (2007) Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia. *J. Hydrol.* Vol. 334. Iss. 3–4. P. 440–454.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.025>

- Vieira D.C.S., Borrelli P., Jahanianfard D. et al. (2023) Wildfires in Europe: Burned soils require attention. *Environ. Res.* Vol. 217. 114936.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114936>
- Vihma T., Uotila P., Sandven S. et al. (2019) Towards an advanced observation system for the marine Arctic in the framework of the Pan-Eurasian Experiment (PEEX). *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 19. Iss. 3. P. 1941–1970.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-1941-2019>
- Wessel B., Huber M., Wohlfart C. et al. (2018) Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing.* Vol. 139. P. 171–182.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.017>
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *U.S. Department of Agricultural Handbook*. No. 537. 67 p.
- Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R. et al. (2017) A high-accuracy map of global terrain elevations: Accurate Global Terrain Elevation map. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 44. Iss. 11. P. 5844–5853.
<https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Zhang X., Drake NA, Wainwright J, Mulligan M. (1999) Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: scaling issues and a fractal method for their solution. *Earth Surf. Processes Landforms.* Vol. 24. Iss. 9. P. 763–779.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199908\)24:9<763::AID-ESP9>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9<763::AID-ESP9>3.0.CO;2-J)
- Zhao G., Gao P., Tian P. et al. (2020) Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China. *Catena.* Vol. 185. 104284.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104284>
- Zhidkin A.P., Smirnova M.A., Lozbenov N.I. et al. (2021) Digital mapping of soil associations and eroded soils (Prokhorovskii district, Belgorod oblast). *Eurasian Soil Sci.* Vol. 54. No. 1. P. 13–24.
<https://doi.org/10.1134/S1064229321010154>