

ВОДНАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВ В БАСЕЙНАХ КРУПНЕЙШИХ РЕК СИБИРИ

© 2022 г. А. С. Цыпленков^a *, С. Р. Чалов^a **, Г. Л. Шинкарева^a ***

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: atsyplenkov@gmail.com

**E-mail: srchalov@gmail.com

***E-mail: galina.shinkareva@gmail.com

Поступила в редакцию 02.06.2022 г.

После доработки 05.07.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

На основе применения модели универсальной эрозии RUSLE рассчитаны параметры дождевой эрозии крупных бассейнов Российской Федерации (Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка, Колыма) на основе цифровой модели рельефа максимально доступного разрешения ($\approx 90 \times 90$ м). Результаты сопоставлены с существующими глобальными оценками и прежними исследованиями для территории России. Сделан вывод о высокой неопределенности мелкомасштабных оценок эрозии, выполненных в субконтинентальном масштабе, что объясняется высокой чувствительностью RUSLE к параметризации длины и крутизны склонов. В субмеридиональном направлении для всех бассейнов отмечается увеличение эрозии с севера на юг, соответствующее общему усилению сельскохозяйственного использования земель и повышения расчлененности рельефа. На основе сравнения со стоком наносов в замыкающих створах исследуемых рек сделан вывод об исключительно аккумулирующем режиме рассматриваемых водосборов: более 90% продуктов эрозионного смыва не достигает устьевых створов рек.

Ключевые слова: эрозия почв, универсальное уравнение эрозии, Арктика, сток наносов

DOI: 10.31857/S0869607122050093

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почв и формирование стока наносов подчиняется зональным гидролого-географическим закономерностям [15]. Современные оценки, выполненные в разрешении 250×250 м, свидетельствуют о продолжающемся глобальном увеличении интенсивности эрозии в мире [38], связанным с расширением площадей выращивания сельскохозяйственных культур. В период с 2001 по 2013 отмечается увеличение на 13% объемов выращивания наиболее распространенных зерновых культур [31], что отвечает потребностям увеличивающегося населения Земли и достигается исключительно за счет совершенств технологий и системы применения удобрений. Увеличение площадей сельскохозяйственных земель на 16–17% (279 млн га) за период с 1985 по 2013 [38, 52] полностью нивелируется потерями земель от эрозии, которые оценивают в 400 млрд долларов США в год [28]. Наиболее серьезная деградация земель наблюдается в прилегающих к Сахаре частях Африки, Южной Америки и Юго-Восточной Азии.

Изменения экономики землепользования в Российской Федерации, произошедшие после распада СССР, привели к трансформации эрозионно-руслowych систем [89]. Продолжающееся развитие горнодобывающей деятельности, особенно на севе-

ро-востоке страны, и трансформация пашни в другие виды сельскохозяйственных угодий или перевод ее в земли других категорий (несельскохозяйственного использования) в пределах целого ряда территорий является наиболее мощным фактором изменения интенсивности эрозионных процессов. В это же время существенно усилилась динамика природных факторов, прежде всего, климатических, что не могло не сказаться на развитии эрозии на склонах и на взаимосвязях этих факторов с русловым звеном речного бассейна. Наиболее значительные изменения почвенно-климатических условий талой эрозии, вызвавшие существенное снижение интенсивности смыва, особенно в лесостепной и степной зонах [8], отмечаются на Европейской территории России. Основной причиной уменьшения темпов смыва черноземов явилось сокращение стока воды со склонов в период снеготаяния, дополненное возможной сменой в структуре севооборота в сторону некоторого увеличения доли многолетних трав, а также противоэрозионными мероприятиями [9]. При этом во многих системах нарушения на водосборе проявляются неоднозначно: речных долинах, нарушенных россыпными месторождениями, основным фактором поступления материала является активизация русловых деформаций и сбросы сточных вод [22, 72].

Большинство существующих моделей водной эрозии были разработаны для сельскохозяйственных земель, расположенных в средних широтах Северной Америки и Европы, где природные условия (в первую очередь климат, рельеф и почвы) и степень антропогенного пресса существенно отличаются от тех, что типичны для горных регионов. Предыдущие исследования влияния крутизны склона на процессы эрозии показали, что уравнения, используемые в эмпирических моделях, особенно основанных на универсальном уравнении эрозии почв (RUSLE) [75], неприменимы для мелкомасштабных оценок эрозии [58]. В областях со сложным рельефом, которые встречаются в верховьях речных водосборов, основная проблема заключается в выделении склоновых сегментов, для которых необходимо вести расчет. Интеграция моделей в геоинформационные системы (ГИС) частично решила эту проблему за счет возможности использовать алгоритмы расчета линий тока по цифровым моделям рельефа (ЦМР). Таким образом, за счет “устранения региональных ограничений” возможно использовать RUSLE для различных ландшафтно-климатических условий [32].

На данный момент RUSLE является наиболее широко используемой моделью эрозии почв [16, 63], причем для различных пространственных масштабов: от стоковых площадок [86] и речных бассейнов [35, 40, 50] до континентов [39]. Фактическая невозможность сравнения результатов расчетов для крупных территорий с фактическими наблюдениями, определяет необходимость использования результатов калибровки параметров модели, полученных по экспериментальным данным. В то же время чувствительность модели к разным входным данным, сопоставимость расчетов с оценками стока наносов для замыкающих створов речных бассейнов — актуальная задача, решение которой стало возможно в настоящее время. Отработка параметров эрозионных моделей [16, 89] позволяет выполнить оценку эрозионных процессов для крупных речных бассейнов на основе использования ГИС-технологий.

Процессы эрозии почв и последующего транспорта наносов в данной работе рассматривались в пределах эрозионно-русловых систем (ЭРС), представляющих совокупность форм рельефа и процессов, обусловленных воздействием водных потоков на поверхность Земли [32, с. 13].

В качестве модельных бассейнов выбраны крупнейшие реки Сибири (рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма). Существующие оценки эрозии почв для этих территорий выполнены либо относительно давно и в мелком масштабе [15, 19, 89], либо используют другие модели водной эрозии [26]. Целью данной работы является актуальная оценка эрозии для крупных речных бассейнов Сибири на основе ЦМР высокого разрешения (90 м). Частными задачами работы стала верификация результатов расчета на основе вариации входных данных разного разрешения, анализ простран-

ственной изменчивости темпов эрозии и объемов потенциального смыва, а также определение соотношений последних и стока наносов исследуемых рек.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Модель водной эрозии. Для расчета потенциальной эрозии от дождевых осадков за счет плоскостной и ручейковой эрозии на территории исследуемого бассейна использовалось универсальное уравнение эрозии почв (*RUSLE*) [74]:

$$Y = R \times K \times LS \times C \times P, \quad (1)$$

где Y — смыв почвы с единицы площади в $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$; R — фактор осадков, представляющий собой среднемноголетнее значение эрозионного потенциала осадков (*ЭПО*), характеризующего эрозионную способность дождей, $\text{МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$; K — фактор эродуемости (смываемости) почвы, численно равный модулю смыва с площадки длиной 22.1 м и уклоном 9%, содержащейся по бессменному пару и отнесенный к величине эрозионного потенциала осадков, $\text{т} \cdot \text{час} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$; L — фактор длины склонов, представляющий собой отношение смыва со склона некоторой длины к смыву со склона длиной 22.1 м при прочих равных условиях, безразмерный; S — фактор уклона, представляющий собой отношение смыва со склона некоторой крутизны к смыву со склона уклоном 9% при прочих равных условиях, безразмерный; C — индекс, отражающий влияние землепользования, который зависит от растительного покрова, безразмерный; P — фактор эффективности противоэрозионных мер, представляющий собой отношение смыва с поля, на котором применяются противоэрозионные меры к смыву с поля, на котором противоэрозионные меры не применяются, а обработка почвы и посев ведутся вдоль склона, безразмерный.

Результаты оценки эрозии подразделялись по степени опасности на 5 классов согласно ГОСТ 17.4.4.03-86: неопасные (интенсивность смыва менее $0.5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, слабоопасные ($0.5\text{--}11 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), среднеопасные ($1\text{--}5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), сильноопасные ($5\text{--}10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ и чрезвычайно опасные (более $10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) территории.

Рельеф. В качестве исходной цифровой модели рельефа использовалась модель составленная Дж. де Ферранти [48] путем синтеза глобальных ЦМР SRTM, ASTER GDEM и российских военных топографических карт на основе аэро- и геодезических съемок, проведенных в 1952 году. ЦМР доступна на сайте www.viewfinderpanoramas.org. Данная модель имеет пространственное разрешение примерно 90 м, качество модели подтвердилось многими исследователями [59, 80], а для условий Российской Арктики данная модель даже предпочтительнее нежели ASTER [59].

Орографические и морфометрические особенности рельефа местности оказывают наибольшее влияние на перераспределение продуктов плоскостного смыва и ручейковой эрозии. Влияние рельефа на процессы эрозии определяется его воздействием на формирование и перераспределение атмосферных осадков, распространение почвенного и растительного покрова, характер землепользования [89]. Формирование стока наносов зависит от средней высоты и уклона склонов, их длины, расчлененности территории [10, 16, 25]. В общем виде влияние рельефа на процессы эрозии на водосборе учитывает фактор рельефа, численно равный произведению LS в уравнении (1) [74]. Длина склона L при этом равна расстоянию от зоны поступления материала (верхняя часть склона) до зоны отложения переносимого материала (или первого принимающего водотока). Для оценки воздействия рельефа местности на водную эрозию последние исследования [67] рекомендуют использовать метод расчета, реализованный в ГИС *SAGA* [43] по уравнению [45]:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{U}{L_0} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{S_0} \right)^n, \quad (2)$$

Таблица 1. Значения фактора C для различных типов землепользования и подстилающей поверхности [36, 68]. Типы подстилающей поверхности определены по ESA GlobCover 2009 [37]. В скобках указана доля покрытия пикселя типом растительности

Table 1. C factors for specific types of land cover compiled from previous studies [36, 68]. Land cover types are defined with ESA GlobCover 2009 [37]

Тип подстилающей поверхности	C^{**}
Сельскохозяйственные земли (пашня)	0.15
Лес (лиственный, широколиственный, хвойный и смешанный)	0.003
Луговая растительность (50–70%)/кустарниковая (20–50%)	0.1
Редкая луговая и кустарниковая растительность (<15%)	0.1
Подтопляемые широколиственные леса	0.001
Городская застройка (урбанизировано >50% территории)	0.03
Оголенные земли	0.1
Водные объекты	0
Снег и лед	0
Нет данных	0

** Фактор C из уравнения $RUSLE$ (1)

где LS – фактор длины и крутизны склона из уравнения (1), безразмерный; U – вышележащая водосборная площадь, отнесенная к ширине потока, $m^2 \cdot m^{-1}$; L_0 , S_0 – длина и крутизна стандартной стоковой площадки Уишмейера-Смита [86] (22.1 м и 0.09°); β – крутизна склона, $^\circ$; m (0.4–0.6) и n (1.0–1.3) – эмпирические параметры, зависящие от доминирующего типа эрозии (плоскостной или речевой).

Землепользование. Пространственное распространение различных типов землепользования и растительного покрова было взято с карты ESA GlobCover 2009. Данная база данных была создана на основе изображений спектрометра $MEDium$ разрешения 300 м ($MERIS$) на борту спутника $ENVISAT$, собранных с января по декабрь 2009 года [37].

Значения фактора C используемые в моделях, основанных на $RUSLE$, зачастую определяются по таблицам [36]. Мы использовали данные собранные в [36, 68] для определения почвозащитного коэффициента подстилающей поверхности (табл. 1).

Почвенные ресурсы. Пространственное распределение почвенных ресурсов взято с карты масштаба 1 : 5000000 Harmonized World Soil Database v 1.2 [61]. Почвенная карта представлена в Приложении 1. Расчет коэффициента эродруемости почвы K производился при помощи следующих уравнений [84]:

$$K_{USLE} = f_{csand} f_{cl-si} f_{orgc} f_{hisand}, \quad (3)$$

$$f_{csand} = (0.2 + 0.3 \exp(-0.256 m_s (1 - \frac{m_{silt}}{100}))), \quad (4)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}, \quad (5)$$

Таблица 2. Исходные материалы и данные, используемые для расчета RUSLE в данной работе
Table 2. Summary of data sources used for RUSLE model

	Пространственное разрешение	Источник
Рельеф	3" × 3" (≈90 × 90 м)	ViewFinderPanoramas [48]
ЭПО**	30" × 30" (≈1 × 1 км)	Global Rainfall Erosivity [66]
Почвы	30" × 30" (≈1 × 1 км)	Harmonized World Soil Database v 1.2 [61]
Растительность	300 м × 300 м	ESA GlobCover 2009 [37]
Гидрография	—	HydroBASINS Version 1.0 [57]

** Эрозионный потенциал осадков (МДж · мм · ч⁻¹ · га⁻¹ · год⁻¹).

$$f_{orgc} = \left(1 - 0.0256 \times \frac{orgC}{orgC + \exp\left(-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right)} \right), \quad (6)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp\left(-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right)} \right), \quad (7)$$

где m_s — содержание песка, %; m_{silt} — содержание илистых частиц, %; m_c — содержание глины, %; $orgC$ — содержание органического углерода, %. Эти данные были получены из Harmonized World Soil Database v 1.2 [61].

Эрозионный потенциал осадков. В данной работе распределение ЭПО по исследуемым бассейнам было построено при помощи глобальной базы данных ЭПО, построенной [66] по 30-мин данным об осадках с 1961 по 1983 гг.

Расчет модели. Все операции с пространственными данными выполнялись в ГИС QGIS 3.14, постобработка результатов и статистический анализ производился в R [73]. Поскольку алгоритм RUSLE состоит в последовательном перемножении растровых слоев и не зависит на этапе расчета от структуры гидрографической сети, расчет велся отдельно для каждой зоны UTM для более рационального использования вычислительных мощностей. Территории исследуемых водосборов располагаются в 20 зонах UTM (от 40N до 59N), для каждой из которых был произведен расчет водной эрозии, т.е. подготовлены растровые слои рельефа, ЭПО и землепользования. Площади речных бассейнов исследуемых рек и их притоков определены по HydroBASINS Version 1.0 [57].

Все исходные данные (табл. 2) приводились к разрешению используемой в данном исследовании ЦМР, т.е. к 3" × 3". Таким образом, полученные в ходе исследования карты интенсивности смыва почв имеют пространственное разрешение 3" × 3".

Результаты расчетов, представленных в данной работе (*модель 1*), сравнивались с другими оценками исследуемых территорий, полученных на основе отличных исходных данных:

Модель 2 [42, 81] построенная ранее авторами на основе GMTED2010 [44], с размером ячейки сетки матрицы 7.5 × 7.5 сек, что эквивалентно пространственному разрешению 250 × 250 м. Фактор C (землепользование) определялся по эмпирическим зависимостям от нормализованного индекса растительности ($NDVI$), предложенного Fu et al. [49]. В качестве исходных данных о пространственном распространении типов почв и их физи-

ческих характеристиках использовалась “Почвенная карта России”, созданная почвенным институтом им. В.В. Докучаева и вошедшая в Европейскую географическую почвенную базу данных [29].

Модель 3 была рассчитана только для бассейна р. Лена [26] на основе ЦМР с разрешением на основе ЦМР 250×250 м GMTED2010 [44]. Для пространственной оценки распространения типов земного покрова авторы использовали собственную карту, построенную по спутниковым данным MODIS Terra, используя методику пост-обработки предложенную Барталевым с соавторами [3].

Модель 4 (GLOSEM). Глобальная модель [38] построенная на ЦМР ASTER и SRTM, с разрешением пониженным до ≈ 250 м. Данные о растительном покрове использовались из MOD44B Vegetation Continuous Fields product, почвенном покрове — ISRIC SoilGrids [53].

Для каждой из этих моделей n определялось отклонение расчета от модели 1 по формуле:

$$\Delta Y = \frac{Y_1 - Y_n}{Y_1}, \quad (8)$$

где Y_1 — смыл почвы с единицы площади в $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ по модели 1 (данная работа), Y_n — смыл почвы с единицы площади в $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ по модели n (см. описание выше).

Для пространственных оценок эрозии почв использовался суммарный модуль смыла почв (y , $\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), рассчитанный как соотношение суммарной эрозии на водосборе (ΣY , $\text{т} \cdot \text{год}^{-1}$) к площади водосбора (A , км^2):

$$y = \frac{\Sigma Y}{A}. \quad (9)$$

Соотношение эрозии почв и стока наносов. Эрозия на водосборе является одной из важнейшей составляющей стока наносов [1]. Соотношение формирования и итогового потока наносов в замыкающем створе бассейна характеризуют масштабные коэффициенты, или коэффициенты редукции стока наносов, которые представляют собой соотношение объемов перемещаемого грунта в пределах водосбора в результате разных природных и антропогенных процессов [32]. Сток взвешенных W_R и влекомых W_G веществ оказывается меньше, чем объемы грунта, перемещаемого в пределах бассейна техническими средствами $W_{\text{техн}}$; в результате эрозии на водосборе и в руслах рек соответственно $W_{\text{эр}}$ и $W_{\text{русл}}$; за счет эоловых $W_{\text{эол}}$, процессов и деятельности ледников $W_{\text{ледн}}$. Таким образом, мы предполагаем, что для каждой эрозионно-русловой системы верно следующее:

$$k = \frac{W_{\text{техн}} + W_{\text{эр}} + W_{\text{русл}} + W_{\text{эол}} + W_{\text{ледн}} + W_{\text{неучт}}}{W_R + W_G}, \quad (10)$$

где k — масштабный коэффициент эрозионно-русловых систем, $W_{\text{неучт}}$ — эрозия за счет неучтенных факторов. Перемещение материала на водосборе $W_{\text{эр}}$ связано с совокупной деятельностью склоновой и овражной эрозии, овражных и оползневых процессов, крипа. Роль того или иного процесса в формировании стока наносов в первую очередь определяется ландшафтно-климатическими условиями на водосборе, рельефом территории, литологией горных пород, а также степенью антропогенной нагрузки [10, 27, 79, 83].

В этой связи коэффициент $K_{\text{эр}} = \frac{W_{\text{эр}}}{W_R + W_G}$ характеризует объем наносов, задержива-

емых на водосборе или в пределах русловой сети. Его обратная величина $\frac{1}{K_{\text{эр}}}$, часто

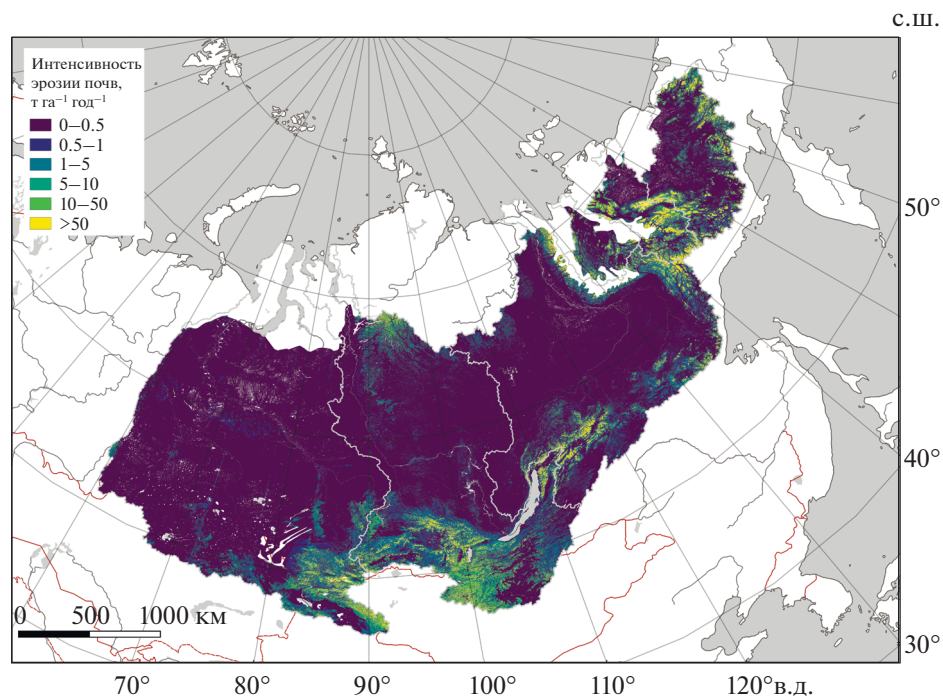


Рис. 1. Потенциальные среднегодовые потери почв в бассейнах рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма.

Fig. 1. Potential average annual soil losses in the Ob, Yenisei, Lena, Yana, Indigirka and Kolyma basins.

рассматриваемая в качестве доли наносов бассейнового происхождения, достигающая рек (коэффициент доставки наносов, КДН), на самом деле таковой не является в силу погрешности масштабирования оценок и несоответствия измеряемого и фактического стока наносов — $W_{\text{неучт}}$ [55, 70, 71]. Всегда в пределах ЭРС справедливо соотношение $W_{\text{неучт}} \neq \text{КДН} \times W_{\text{эр}}$ в связи с существованием других, не связанных с процессами на водосборе, источников поступления наносов в реки, даже при учете только взвешенных наносов. В этой связи нами проводилось сопоставление суммарных объемов для характеристики минимальной доли наносов бассейнового происхождения, задерживаемого в речных бассейнах.

Для расчета $K_{\text{эр}}$ использованы оценки стока наносов, полученные на замыкающих постах с использованием либо мониторинговых данных МГУ (Обь, Енисей, Колыма) [14], либо сетевых данных по постам УГМС (Лена, Яна, Индигирка), обобщенных в работе [18] дополненных сведениями о стоке влекомых наносов по Н.И. Алексеевскому [1], а для р. Яна и Индигирка — исходя из соотношения стока влекомых наносов к общему стоку в 30%, как среднее для рек данного региона и масштаба [82].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании эмпирической модели эрозии почв RUSLE для шести водосборов рек бассейна Северного Ледовитого Океана (рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма) была посчитана среднеголетняя интенсивность эрозии почв. Она оцени-

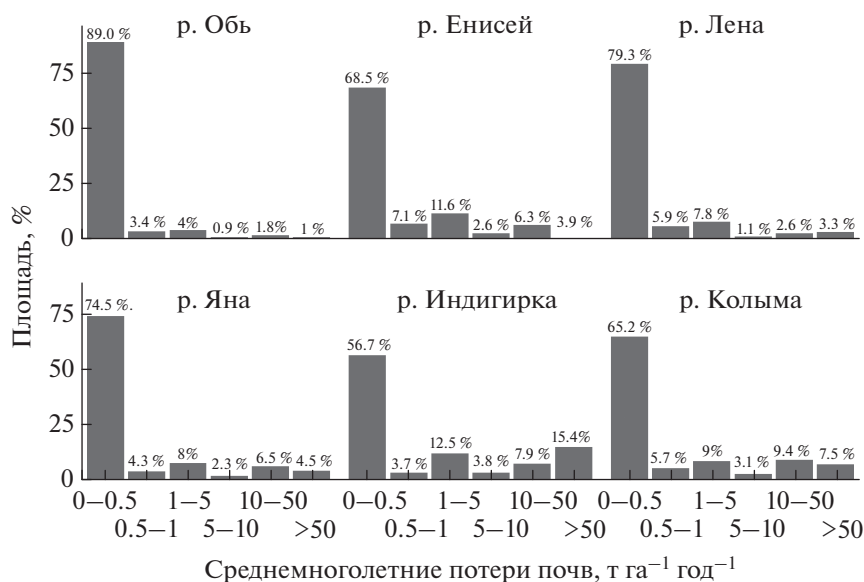


Рис. 2. Распределение потенциального смыва почв ($\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) по площадям исследуемых бассейнов. Классы опасности соответствуют классам ГОСТ 17.4.4.03–86.

Fig. 2. Distribution of potential soil loss by area within studied basins ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$). Hazard classes correspond to those of GOST 17.4.4.03–86.

вается величиной $6888 \times 10^6 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$. Наименьшие средние темпы эрозии наблюдаются на территории водосбора рр. Лена ($5.27 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) и Обь ($1.98 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$). Самые высокие региональные темпы эрозии характерны в бассейне р. Лена — в Казачинско-Ленском районе Иркутской области ($218 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) и Муйском районе Бурятской республики ($158 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$). Наибольшие средние темпы эрозии на территории бассейна р. Енисей наблюдаются в Окинском районе Бурятской республики ($191 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$). Преимущественно вся юго-западная часть территории бассейна

Таблица 3. Показатели описательной статистики среднемноголетней интенсивности эрозии почв ($\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) в бассейнах исследуемых рек

Table 3. Summary statistics of mean annual soil erosion rates ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$) averaged by watersheds

	Среднее	Станд. отклон.	Cv	Медиана	Первый квартиль	Третий квартиль
Обь	1.98	12.2	16.2	0.21	0.007	0.29
Енисей	6.37	24.6	25.9	0.15	0.008	0.94
Лена	5.27	27.2	19.4	0.02	0.004	0.31
Яна	11.2	35.1	31.8	0.33	0.01	2.37
Индигирка	33.3	76.5	43.6	0.57	0.05	15.1
Колыма	11.4	33.4	34.1	0.12	0.004	1.96

р. Енисей характеризуется очень высокой интенсивностью эрозии почв (рис. 1), на долю которых приходится 11.6% территории бассейна.

Для большинства бассейнов рек характерно логнормальное распределение интенсивности эрозии внутри водосбора (за исключением Индигирки) — подавляющие площади относятся к 1-му классу (ГОСТ 17.4.4.03–86) опасности (рис. 2), где интенсивность эрозии не превышает $0.5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

Как видно из гистограмм среднееголетней интенсивности (рис. 2), распределение этих величин схоже для всех водосборов. Помимо пика малых значений, на всех водосборах наблюдается увеличение площадей занятых 3 классом ($1\text{--}5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) и для некоторых водосборов так же 5 и 6 классами (например, р. Индигирка). Безусловно, бимодальность распределения сказывается и на показателях описательной статистики, которые для бассейна р. Индигирка являются наибольшими (табл. 3).

Верификация результатов модели эрозии почв и методические ограничения ее использования. Валидация и верификация моделей эрозии почв — сложная и трудновыполнимая задача, требующая многолетних наблюдений на стоковых площадках [16]. На бассейновом уровне обычно проводят визуальное и количественное сравнение со спутниковыми снимками, картами эрозии и другими моделями эрозии [38, 39]. Традиционно модели эрозии разрабатывались для практически субгоризонтальных площадок с короткими склонами и небольшими уклонами, в то время как количество исследований на склонах с уклоном более 50% очень мало [58, 62]. Однако, модельный подход, реализованный в данной статье основан на данных с высоким разрешением. Согласно предыдущим исследованиям [56, 64, 76], качество входных данных является предпосылкой для получения надежных и устойчивых характеристик модели RUSLE.

Разница расчетов по моделям 1 и 2 (табл. 4) достигает 100%, причем если для бассейна Лены оценки по модели 2 выше, чем по 1, то для бассейнов Енисея и Оби они, наоборот, ниже. Среднее значение потенциального суммарного смыва по модели 3 [26] для бассейна р. Лена более чем на 300% ($\Delta = -389\%$) превосходит полученную нами оценку. Отличия оценки глобальной среднееголетней интенсивности эрозии почв *Borrelli et al.* [38], выполненной с пространственным разрешением $250 \times 250 \text{ м}$ (модель 4, GLOSEM), занижает средние величины интенсивности эрозии в пределах 100%. Это свидетельствует о неопределенности расчетов эрозии на мелкомасштабных ЦМР (модели 2–4). Экспериментальные исследования чувствительности эрозионных моделей свидетельствуют о том, что при уменьшении пространственного разрешения ЦМР увеличивается интенсивность смоделированной эрозии за счет более точного расчета фактора LS. При сравнении моделей эрозии, рассчитанных на основании 250 м и 90 м разрешения, следует ожидать увеличение темпов смыва в 1.7–1.8 раза [87]. При этом, согласно предыдущим исследованиям [46, 88], длина и уклон склона являются важнейшими факторами эрозии.

Стоит отметить, что различия в медианных величинах, при меньшей изменчивости интенсивности для GLOSEM, не столь очевидны (рис. 3). Похожая закономерность наблюдается и для моделей, сравниваемых в настоящем исследовании. Например, средние значения темпов смыва модели GLOSEM ниже в 6.7 раз, тогда как медианные значения ниже в 2 раза. Завышение средних величин может быть вызвано неестественно высокими показателями LS для горных территорий и районов с крутыми склонами ($>26.6^\circ$ [51, 85]). Учитывая асимметричность распределения величин смыва почвы по бассейну, присущую эмпирическим моделям на основе RUSLE [69], репрезентативнее сравнивать медианные величины смыва почв, соотношение между которыми (превышение в 2 раза над GLOSEM) авторам кажется естественным.

Для анализа достоверности полученных результатов было также произведено сравнение их с оценками Л.Ф. Литвина [89] (табл. 4). Поскольку Л.Ф. Литвин проводил оценки интенсивности только для с/х земель, то для бассейнов рр. Лена и Енисей, их корректнее сравнивать с темпами эрозии только с/х освоенных земель, которые пре-

Таблица 4. Сравнительный анализ осредненных оценок эрозии крупных бассейнов рек РФ
Table 4. Summary of different studies that previously assessed soil erosion in Siberian basins

Исходные данные и результаты оценки для бассейна		Модель 1 (данная работа)	Модель 2 [42, 81]	Модель 3 [26]	Модель 4 [38]	Литвин и др., 2002 [89]**
ЦМР		ViewFinderPanoramas [48]	GMTED2010 [44]		SRTM 3, ASTER GDEM v2	—
Растительность		ESA GlobCover 2009 [37]	На основе NDVI, рассчитанных по снимкам Landsat [49]	Данные MODIS, обработанные [3]	MOD44B Vegetation Continuous Fields product	—
Почвы		Harmonized World Soil Database v 1.2 [61]	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [29]		ISRIC Soil-Grids [53]	—
Среднего-голетняя интенсивность эрозии почв, $t \cdot ga^{-1} \cdot год^{-1}$	Бассейн р. Енисей	6.37 (14.52)*	0.11 (1.04)*	—	1	(1)*
	Бассейн р. Лена	5.27 (5.7)*	7.6 (3)*	42.3	1.1	(5.87)*
	Бассейн р. Яна	11.2	0.73	—	4.2	—
Отклонение от модели 1, %	Бассейн р. Енисей	—	98.3	—	92	93
	Бассейн р. Лена	—	—44.2	—389.6	79	—3
	Бассейн р. Яна	—	93.5	—	63	—

* (в скобках значения только для с/х угодий), ** только для с/х земель.

имущественно заключены между 40° и 50° с.ш. Тем не менее, к данному сравнению следует относиться аккуратно, так как оценки эрозии почв проведены для различных временных диапазонов: в данной работе мы учитывали эрозию почв в современных условиях, в то время как Л.Ф. Литвин рассматривал более ранние исторические периоды. Кроме того, следует учитывать, что с конца XX века для территории Российской Федерации было характерно повсеместное сокращение посевных площадей в 2–3 раза [17, 23]. Однако, результаты наших расчетов соответствуют экспериментальным наблюдениям за эрозией на сходных типах земель (многолетние травы, луга и пашня) по наблюдениям на опытно-производственном стационаре при Алтайском НИИСХ и Усть-Каменского лесостепного противоэрозионного стационара, который располагается в водосборе Оби недалеко от Барнаула [6]. Различия экспериментальных значений с расчетными не превышают 30%, что также может быть объяснено не учетом талой эрозии в универсальном уравнении эрозии (1). Кроме того, результаты нашего исследования сопоставимы с действительной расчетной эрозией на пашне подтайги Западной Сибири, рассчитанной на основе модели USLE [19], и изменяющейся в пределах $0.001–15.4 t \cdot ga^{-1} \cdot год^{-1}$ (наибольшие значения получены для апреля и октября, наименьшие — для августа).

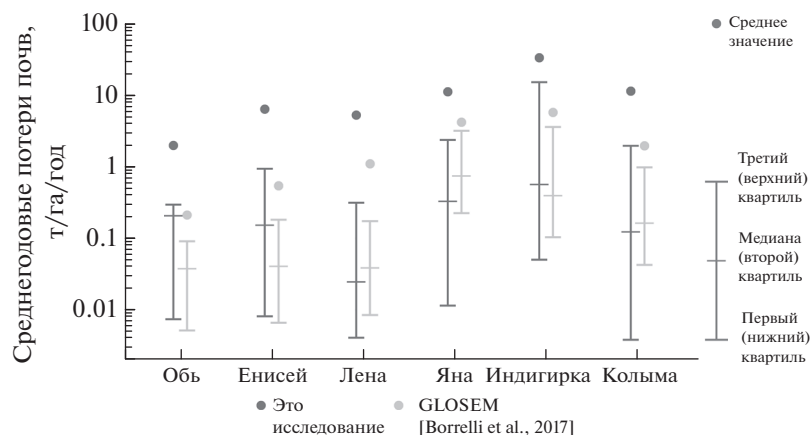


Рис. 3. Основные характеристики интенсивности эрозии почв, оцененные в рамках данного исследования и по результатам модели GLOSEM [38]. Ось ординат логарифмическая.

Fig. 3. Main characteristics of soil erosion intensity assessed in this study and by the GLOSEM model [23]. The ordinate axis is logarithmic.

Несмотря на то, что уравнение RUSLE и его модификации успешно применяются для моделирования эрозии почв во всем мире [34, 36], опыт его применения для условий арктических рек ограничен [47]. Предыдущие оценки эрозии почв указывают на удовлетворительную адаптацию модифицированного универсального уравнения эрозии почв к арктическим условиям [47, 78]. Одна из причин популярности моделирования (R)USLE, заключается в том, что это хороший компромисс между доступностью с точки зрения требуемых исходных данных и относительно хорошей надежностью получаемых оценок потерь почвы [33].

Полученные результаты характеризуют исключительно роль дождевой эрозии в балансе наносов исследованных речных бассейнов. Моделирование талой эрозии не проводилось из-за меньшей проработанности этого вопроса, хотя известно, что в Западной Сибири снеготалые воды являются одним из ведущих факторов эрозии почв [24]. Значительная трансформация ландшафтов Российской Арктики в Антропоцене (преимущественно через развитие горнодобывающей деятельности и дорожной сети) [4] привела к активизации процессов термокарста и термоэрозии, а так же обвалов, осыпей [5] и криогенных склоновых процессов [30]. Авторы допустили, что вклад данных процессов в сток наносов в масштабах крупных речных бассейнов на фоне русловой и дождевой эрозии невелик, учитывая предыдущие наработки по это теме [41].

Некоторые исследователи обобщают, что для крупных речных бассейнов влияние талого стока намного больше дождевого, так как при снеготаянии увеличивается единовременный охват территории [89]. Однако, для территорий Арктических рек во время снеготаяния наибольшая интенсивность эрозионных процессов наблюдается в конце снеготаяния, поскольку значительная часть талого стока, проходящего по мерзлой почве, не вызывает существенных величин смыва [20]. Согласно наблюдениям О.И. Баженовой [2], тальми водами сносится около 30% годовой величины твердого стока, аналогичное соотношение установлено для лесостепной части Приангарья. Сравнительный анализ интенсивности талой и дождевой эрозии, выполненный Г.П. Сурмачем [20] по результатам эксперимента, произведенного на территории правобережья Нижней Волги, показал, что при прочих равных условиях, величины смыва почв от ливневых дождей существенно превосходят аналогичные значения от воздей-

ствия талых вод. В целом сходные результаты получены в работах Танасиенко А.А. [21] и Евсеевой Н.С. [11] для условий Сибири. Однако для южной тайги Томь-Яйского междуречья (Западно-Сибирская равнина) установлен достаточно большой разброс значений интенсивности эрозионного смыва: с пашни может выноситься от 0.5–3 до 55–81 м³/га почв за период снеготаяния [12, 13]. Единственная известная нам оценка талой эрозии для крупных речных бассейнов, выполненная А.В. Шынбергеновым [26] с использованием модели дождевой и талой эрозии для бассейна Лены, указывают на соотношение 61 против 39%. С учетом того, что в формировании величины $W_{\text{эр}}$ (см. уравнение 10) ключевую роль играет дождевая эрозия, полученные результаты можно рассматривать как интегральную меру интенсивности эрозионных процессов. Тем не менее, невозможность учета талой эрозии в используемой модели RUSLE накладывает ограничения на использование данной модели на изучаемой территории и может вызывать занижение оценок эрозии, что стоит учитывать в дальнейших исследованиях.

Горный рельеф исследуемой территории также обуславливает ряд сложностей в использовании данной модели, поскольку на крутых склонах активизируются оползневые процессы, обеспечивающие поступление большого количества почвенного материала в речное русло. Однако, опыт использования моделей (R)USLE показывает их применимость для горной местности. Так, использование данной модели для пашни на территории крупного гористого речного бассейна реки Сянси в Китае позволило оценить интенсивность эрозии, связанной с фрагментированным растительным покровом — она составила 120.62 т · га⁻¹ · год⁻¹ [77]. На территории горного перевала Индаги в Турции (абс. высота 1196–1410 м над уровнем моря) на участках пашни интенсивность эрозии, оцененная по модели USLE составила 34.3 т · га⁻¹ · год⁻¹ [65]. В горных регионах Среднего Атласа в Марокко интенсивность эрозии почв в бассейне реки Иккур, оцененная по этой же модели, составила 0.68 т · га⁻¹ · год⁻¹ [54]. Однако, результаты моделирования почвенной эрозии в Альпах (USLE), верифицированные по измеренным значениям эрозии (по методу Cs-137), показали некоторое занижение рассчитанных значений [60], что также следует учитывать при интерпретации и дальнейшем использовании модельных значений.

Еще одним методическим ограничением использования результатов моделирования является малое количество почвенных разрезов на территории Сибири, входящих в базу данных WISE, на которой частично построена используемая в этой статье база данных Harmonized World Soil Database (HWSD). Однако, привлечение дополнительной информации при создании Harmonized World Soil Database v 1.2 позволило построить 3855 почвенных ареалов на территории Европы и Российской Федерации, что на взгляд авторов позволяет считать данные из Harmonized World Soil Database v 1.2 достаточно репрезентативными для нашего исследования. На территорию Российской Федерации альтернативой HWSD может служить Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (ЕГРПР) [29]. Его преимуществом является более детальная проработка почвенной карты (масштаб 1 : 1000000), однако в ЕГРПР отсутствует информация о гранулометрическом составе большинства почв, представленных на территории исследуемых бассейнов. Более того, южные части бассейнов р. Обь и р. Енисей, расположенные в Казахстане, Китае и Монголии, не включены в ЕГРПР.

Пространственные закономерности эрозии почв. Объемы потенциальной эрозии в 6 крупнейших арктических водосборах составляют около 1/6 от величины глобальной эрозии по глобальной модели GLOSEM [38]. Для всех бассейнов отмечается увеличение эрозии в южном направлении, соответствующие общему усилению антропогенного пресса на территорию водосбора. В южной части бассейна р. Енисей смыв почв увеличивается в 15 раз по сравнению с северными, в бассейне р. Обь — почти в 10 раз. В бассейне Енисея это определяется хозяйственно-экономическими причинами — расположением верховьев бассейна р. Енисей в Монголии и КНР. На этом фоне отме-

Таблица 5. Оценка объемов потенциальной эрозии на водосборе и стока наносов рек в замыкающих створах**Table 5.** Summary statistics of total soil loss, and basin sediment yields calculated for the outlet gages

	Широта	Обь	Енисей	Лена	Яна	Инди-гирка	Колыма
Суммарная эрозия почв, млн т · год ⁻¹	45–50	430	425				
	50–55	293	1070	26.1			
	55–60	34.1	146	729			
	60–65	17.6	29.4	606	8.03	796	366
	65–70	4.32	211	266	194	853	338
	70–75			40.5	5.21	0.71	
	ВСЕГО	778	1881	1668	207	1650	704
Сток наносов WR + WG, млн т · год ⁻¹		58.2	32.5	38.6	5.55	16.77	19.9
Масштабный коэффициент $K_{эp}$		13.4	57.9	43.2	37.3	98.4	35.4

чены обратные тенденции внутри бассейна р. Лена, связанные с влиянием фактора рельефа, который может вносить некоторые искажения в расчеты эрозии почв, связанные с большой площадью горных территорий (что обсуждалось выше). Повышенные значения эрозии для бассейна р. Индигирка также связаны с высокой средней высотой водосбора (655 м) и расчлененностью рельефа. При этом, около половины водосбора располагается в Яно-Индигирской низменности. В связи с этим, и распределение среднемноголетней интенсивности и абсолютные величины отличаются от более крупных бассейнов рек Оби, Енисея, Лены и др. (табл. 5).

В Приложении 2 приведены основные показатели описательной статистики рассчитанной в рамках данной работы среднемноголетней интенсивности эрозии почв (среднее, медиана и стандартное отклонение) для основных типов почв, встречающихся на территории исследуемых бассейнов. Исходя из полученных данных, в бассейнах всех исследуемых рек наименьшая величина среднемноголетнего смыва ($0.2–3.3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) установлена для различных торфяных (*Histosols*) и пойменных (*Fluvisols*) почв, обычно встречающихся на относительно ровных задернованных участках рельефа, и кроме того для подзолистых почв (*Podzoluvisols*) в бассейне Енисея, песчаных (*Arenosols*) в бассейне Лены, и глеевых почв (*Gleysols*) в бассейне Оби. Наибольшая интенсивность эрозии (до $87.2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) установлена для встречающихся на территории всех изучаемых бассейнов горных каменистых (*Leptosols*) и арктических (*Regosols*) почв, имеющих слаборазвитый или маломощный профиль и расположенных под плохо сформированным или фрагментарным растительным покровом. Авторы находят, что рассчитанные показатели среднемноголетней интенсивности почв для рр. Яна и Индигирка завышены, так как средние или медианные показатели смыва лептосолов (*Leptosols*) в несколько раз превышают фоновые значения. Вероятно, это вызвано высокими значениями коэффициента LS в горных районах, где преобладают эти почвы, а так же отсутствием точных данных о гранулометрическом составе почв данного региона в использованной базе данных почвенных ресурсов [61].

Соотношение эрозии и стока наносов. Выполненные оценки масштабного коэффициента $K_{эp}$ (см. уравнение 10) указывают на исключительно аккумулирующий режим эрозионно-русловых систем крупных рек (см. табл. 5). Во всех случаях $K_{эp} > 10$, т.е. более 90% продуктов эрозионного смыва не достигает устьевых створов рек.

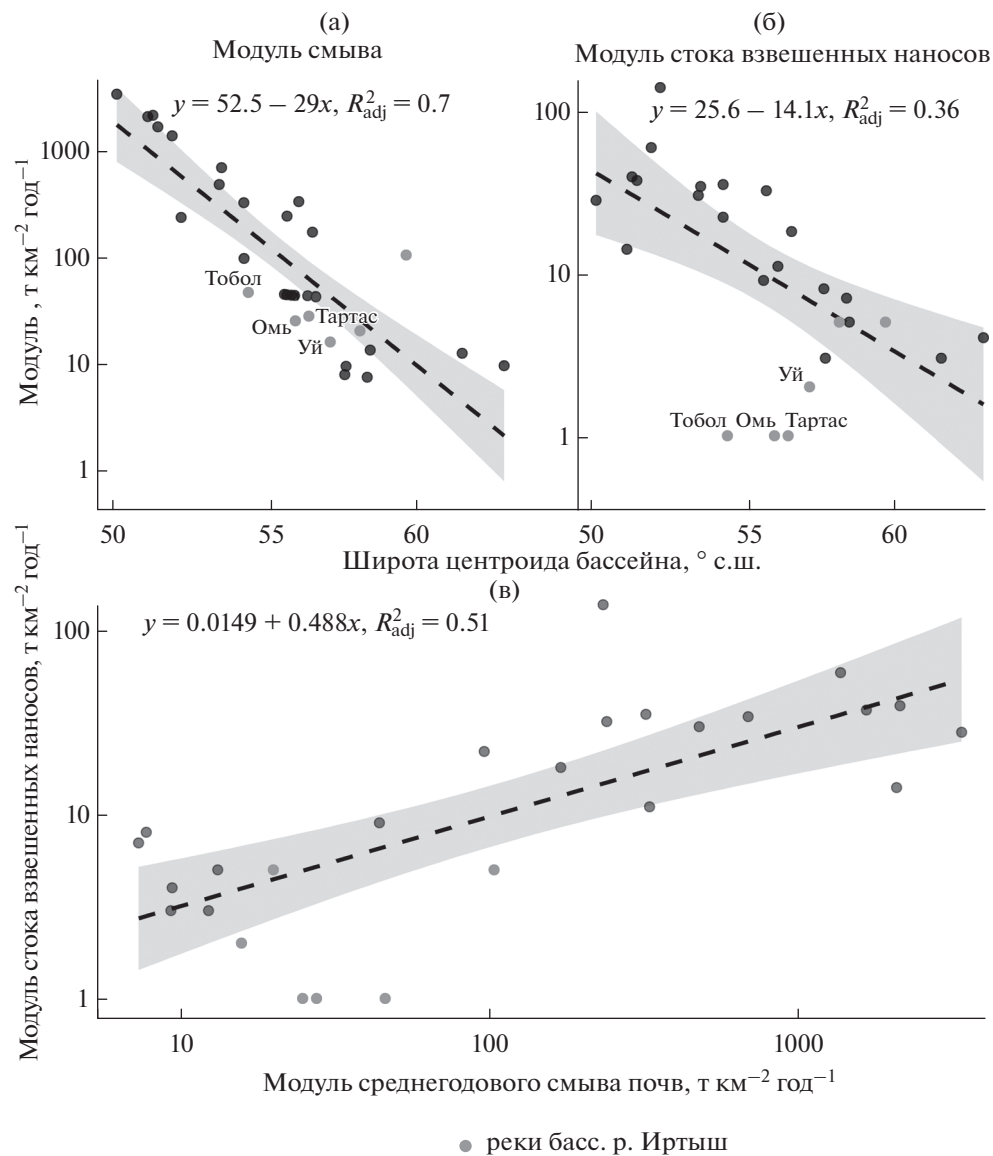


Рис. 4. Связь модуля стока взвешенных наносов (а) и модуля смыва (б, уравнение 10) с географической широтой бассейна. Отношение модулей стока взвешенных наносов к модулю среднегодового смыва почв (в) для рек бассейна Оби. Красным выделены реки бассейна р. Иртыш.

Fig. 4. Relationship between suspended sediment yield (a) or soil loss yield (б, equation 10) and basin's centroid latitude. suspended sediment yield—soil loss yield relationship (в) for the rivers of the Ob basin. Rivers in the Irtysh River basin are highlighted in red.

Для Оби было произведено более детальное сравнение среднесуточной интенсивности эрозии почв со стоком наносов на основании данных с 26 гидрометрических постов со средней продолжительностью наблюдений 56 лет. Для каждого водосборного бассейна определялся суммарный среднесуточный объем эрозии почв (тонн).

Эта величина, отнесенная к площади водосбора, обозначает среднегоголетний модуль смыва ($\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Для рек бассейна Оби существует слабая положительная связь ($R^2 = 0.51$) модуля стока наносов с суммарным смывом почвы на водосборе (рис. 4). Увеличение модуля смыва на 10% приводит к увеличению стока наносов на 5%. Это характеризует увеличение $K_{\text{эп}}$ по мере роста водосбора, что соответствует ранее отмечавшимся тенденциям [7] для бассейнов с/х освоенных территорий (р. Дон, р. Ока). Невысокий коэффициент аппроксимации регрессионной модели, в первую очередь определен условиями формирования стока наносов на водосборах рр. Уй, Омь и Тартас (бассейн р. Иртыш). При средних размерах водосборов для них характерны низкие величины среднегодовых расходов наносов (0.2–0.5 кг/с), практически неизменные за период наблюдений ($C_v = 0.47–0.65$).

Данные реки протекают на северной границе зоны возделывания зерновых культур (преимущественно пшеница и яровая пшеница) в Западно-Сибирском лесостепном сельскохозяйственном районе. Несмотря на большое количество возделываемых земель, пастбищ и пашен, лишь незначительная часть наносов поступает в водотоки. Столь азонально низкие величины стока наносов определяются высокой заболоченностью территории — все эти реки берут начало из Большого Васюганского болота. Так же важную роль оказывает пологий рельеф территории (средняя высота водосборов 120–140 м): длинные и пологие склоны захватывают большую часть (90%) эродируемого материала.

Характерное для бассейнов Сибири увеличение среднегоголетней интенсивности эрозии почв с юга на север, определенное по результатам моделирования, подтверждается соотношением широты (центроида бассейна, т.е. его географического центра) и модулем стока наносов (рис. 4). Каждый градус модуль смыва понижается примерно на 7%, тогда как модуль стока наносов — на 2.5%. Различие в качестве аппроксимации линейной модели между стоком наносов и модулем смыва существенное и вызвано не только наличием выбросов (реки бассейна Иртыша), но и активизацией русловых процессов в среднем и нижнем течении реки.

Модуль стока наносов неравномерно уменьшается по длине реки Обь: на участке между Барнаулом и Камнем-на-Оби происходит его повышение в 1.5 раза. В тоже время, такая продольная изменчивость нехарактерна для модуля смыва (рис. 5) — его величины равномерно уменьшаются по длине реки. Это косвенно указывает на наличие дополнительных источников наносов (русовая эрозия) на участке Барнаул — Камень-на-Оби. Последующее падение величин модуля стока наносов связано с перехватывающим эффектом водохранилищ: из-за Новосибирского водохранилища сток наносов в Колпашево уменьшается в 2.7 раз, при этом модуль смыва уменьшается в 14 раз. На участке Колпашево-Белогорье сток наносов уменьшается 2.2 раза, а модуль смыва в 2.4 раза за счет совместного эффекта Каратомарского водохранилища и вдхр. Зайсан на территории Казахстана. При этом прогнозные значения модуля смыва указывают, что дальнейшего изменения показателей эрозии по мере увеличения площади не происходит. К замыкающему створу в Салехарде модуль смыва уменьшается всего лишь на 5% до $42.1 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, а модуль стока наносов от Белогорья до Салехарда понижается на 45% до $5 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [18]. Такая разница между относительным снижением бассейновой эрозии и стока наносов указывает на исключительно аккумулярующий режим Нижней Оби. Это подтверждается натурными данными: при измерениях экспедиции МГУ на пике половодья в 2019 года (общий расход воды $25000 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) на Малой Оби (правый рукав) в верхней ее части преобладали значения более $50 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, в нижней — от 30–40 $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$, на Горной Оби (левый рукав) — от 40 до 30 $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$.

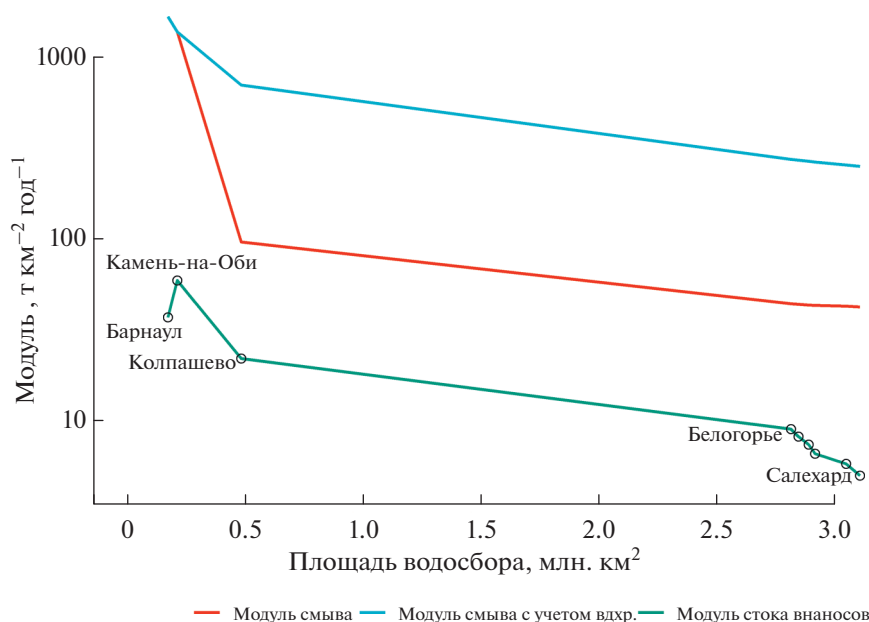


Рис. 5. Изменение модуля смыва и модуля стока наносов по длине р. Обь.

Fig. 5. Changes in suspended sediment yield or soil loss yield along the length of the Ob River.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые приведена крупномасштабная (90×90 м) оценка эрозионной опасности почв крупнейших речных систем Сибири и Дальнего Востока. В суб-меридиональном направлении для всех бассейнов отмечается увеличение эрозии с севера на юг, соответствующее общему усилению сельскохозяйственного использования земель и повышению расчлененности рельефа. Фактор рельефа оказался определяющим в формировании эрозии почв на водосборах Яны, Индигирки и Колымы, тогда как более крупные бассейны (Лена, Енисей и Обь), практически одинаково подвержены влиянию всех факторов.

Наименьшие среднегодовые темпы эрозии на исследуемой территории характерны для торфяных (*Histosols*) и пойменных (*Fluvisols*) почв, расположенных на относительно выровненных и задернованных участках рельефа, в то время как наибольшие — для горных каменистых (*Leptosols*) и арктических (*Regosols*) почв крутых склонов с фрагментарным растительным покровом.

Сравнение созданной модели с прежними более мелкомасштабными оценками эрозии почв показало как увеличение оценок среднегодовых темпов эрозии в среднем в 2–10 раз, так и их уменьшение в 10 раз. Мы предполагаем, что увеличение показателей эрозии связано в первую очередь с увеличением детальности ЦМР, что привело к более точной оценке длины и крутизны склонов. Наибольшая разница оценок (в 10 раз) наблюдается при сравнении с моделями, основанными на 250 м ЦМР *GMTED2010*, наименьшая (в 2 раза) — при сравнении с SRTM, уменьшенной до 250 м.

Выполненные оценки масштабного коэффициента Кэр на основе использования данных о стоке взвешенных и влекомых наносов указывают на исключительно аккумулирующий режим эрозионно-русловых систем крупных рек. Во всех случаях $K_{эр} > 10$, т.е. более 90% продуктов эрозионного смыва не достигает устьевых створов рек. Это подтвер-

ждается и более детальным сравнением модельных данных с натурными для рек бассейна р. Обь.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено по госзаданию НИЛ эрозии почв и русловых процессов географического ф-та МГУ, номер АААА-А16-116032810084-0. Анализ русловых процессов выполнен в рамках проекта РНФ 18-17-00086. Полевые работы и разработка модели эрозии проводились в рамках проекта РНФ 21-17-00181.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. Москва: Географический факультет МГУ Москва, 1998. 202 с.
2. *Баженова О.И.* Закономерности движения рыхлого материала на лесостепных склонах в Назаровской впадине (по результатам стационарных наблюдений) // География и природные ресурсы. 1988. С. 53–73.
3. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спутника MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. вып. 4. С. 285–302.
4. *Беляев Ю.Р., Харченко С.В., Романенко Ф.А., Еременко Е.А., Матлахова Е.Ю.* Антропогенная трансформация рельефа Арктической зоны России: хронология, география, интенсивность // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. ВНИИОкеангеология/АНИИ Санкт-Петербург, 2020. С. 18–23. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10702>
5. *Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Болысов С.И., Фузеева Ю.Н.* Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. вып. 1. С. 42–56.
6. *Вольнов В.В., Бойко А.В., Чичкарев А.С.* Опыт использования противоэрозионных гидротехнических сооружений в борьбе со стоком талых вод и смывом пахотных почв на склоновых землях Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017.
7. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. ГЕОС Москва, 2006.
8. *Голосов В.Н., Ларионов Г.А., Сидорчук А.Ю.* Исторический этап в освоении эрозионно-русловых систем // Эрозионно-русловые системы / ред. Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю. М., 2017. С. 702.
9. *Гусаров А.В.* Определение минимальной продолжительности ряда наблюдений за стоком взвешенных наносов с целью корректной оценки пространственно-временной изменчивости интенсивности эрозии в их бассейнах // Геоморфология. 2017. вып. 1. С. 19–29. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-19-29>
10. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Издательство Казанского Университета, 1984. 264 с.
11. *Евсеева Н.С.* Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 484 с.
12. *Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Осинцева Н.В., Алеев В.В.* Количественная оценка смыва почв в агроландшафтах южной тайги // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ. Томск: НИ ТГУ, 2015. С. 185–189.
13. *Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Людкевич Е.И.* Эрозионные процессы в природно-антропогенных геосистемах южной тайги Западно-Сибирской равнины и их геоэкологические аспекты // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. вып. 5. С. 442–449.
14. *Иванов В.В., Чалов С.Р.* Оценка стока и состава наносов р. Обь // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием. М., 2019. С. 219–222.
15. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. Москва: Издательство Московского Университета, 1993. 200 с.

16. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения / ред. Светличный А.А. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
17. Лысанова Г.И., Сороковой А.А. Потенциал земельных ресурсов регионов Сибири // География И Природные Ресурсы. 2015. вып. 2. С. 149–155.
18. Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. вып. 6. С. 17–24.
19. Савельева Д.А., Каличкин В.К. Внутрисезонный мониторинг водной эрозии почв пашни в подтайге Западной Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. вып. 5. С. 15–21. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10502>
20. Сурмач Г.П. Водная эрозия и борьба с ней. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 254 с.
21. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 176 с.
22. Чалов С.Р., Школьный Д.И., Промахова Е.В., Леман В.Н., Романченко А.О. Формирование стока наносов в районах разработок россыпных месторождений // География И Природные Ресурсы. 2015. вып. 2. С. 22–30.
23. Чебокаков Е.Я., Муртаев В.Н. Современное состояние использования пахотных земель в хозяйствах разных форм собственности приенисейской Сибири // Вестник КрасГАУ. 2021. Т. 2. вып. 167. С. 10–16.
24. Чумбаев А.С., Танасиенко А.А. Измерение и оценка эрозии почв в результате снеготаяния // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири / ред. Сычев В.Г., Мюллер Л. Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. С. 224–228. <https://doi.org/10.25680/7597.2018.78.77.145>
25. Швец Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 184 с.
26. Шынбергенов Е.А., Ермолаев О.П. Потенциальная эрозия почв бассейна Р. Лена // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2017. Т. 27. вып. 4. С. 513–528.
27. Щеглова О.П. Формирование стока взвешенных наносов и смыл с горной части Средней Азии // Тр. СреднеазиатНИГМИ. 1972. вып. 60/75. С. 228.
28. Global Soil Partnership endorses guidelines on sustainable soil management | Global Soil Partnership | Food and Agriculture Organization of the United Nations [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/416516/>.
29. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1sem.html>.
30. Эрозионные процессы центрального Ямала / ред. Сидорчук А.Ю., Баранов А.В. Спб., 1999. 350 с.
31. FAO. Crops Production [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
32. Эрозионно-русловые системы / ред. Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю. М.: ИН-ФРА-М, 2017. 702 с.
33. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // International Soil and Water Conservation Research. 2019. V. 7. № 3. P. 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
34. Alewell C., Meusburger K., Juretzko G., Mabit L., Ketterer M.E. Suitability of $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{137}Cs as tracers for soil erosion assessment in mountain grasslands // Chemosphere. 2014. V. 103. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.016>
35. Atoma H., Suryabhagavan K. V., Balakrishnan M. Soil erosion assessment using RUSLE model and GIS in Huluka watershed, Central Ethiopia // Sustainable Water Resources Management. 2020. V. 6. № 1. P. 12. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00365-z>
36. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates // Hydrology and Earth System Sciences. 2018. V. 22. № 11. P. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
37. GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report. 2011.
38. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K. Van, Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // Nature Communications. 2017. V. 8. № 1. P. 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

39. *Bosco C., Rigo D. De, Dewitte O., Poesen J., Panagos P.* Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. V. 15. № 2. P. 225–245.
<https://doi.org/10.5194/nhess-15-225-2015>
40. *Chadli K.* Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco) // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016. V. 2. № 2. P. 51.
<https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>
41. *Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A.V., Promakhova E. V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N.* Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China // *Environmental Earth Sciences*. 2018. V. 77. № 7. P. 274. :
<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7448-9>
42. *Chalov S.R., Tsyplenkov A.S.* Testing soil erosion model for large river basins: Lena river // 3rd International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers 18–21 April 2017, New Delhi, India. New Delhi, 2017.
43. *Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geoscientific Model Development*. 2015. V. 8. № 7. P. 1991–2007.
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
44. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. 2011. 26 p.
45. *Desmet P., Govers G.* A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. V. 51. № 5. P. 427–433.
46. *Desmet P.J.J., Govers G.* GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information // *Catena*. 1995. V. 25. № 1–4. P. 389–401.
47. *Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Noël G.E., Teisserenc R., Probst J.L., Pérez J.M.S.* Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic ocean: The case of the Yenisei River basin // *Water Research*. 2019. V. 158. P. 118–135.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.018>
48. Viewfinder Panoramas [Электронный ресурс] / Ferranti J. de. Режим доступа: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html>.
49. *Fu B., Liu Y., Lü Y., He C., Zeng Y., Wu B.* Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China // *Ecological Complexity*. 2011. V. 8. № 4. P. 284–293.
<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.07.003>
50. *Gayen A., Saha S., Pourghasemi H.R.* Soil erosion assessment using RUSLE model and its validation by FR probability model // *Geocarto International*. 2020. V. 35. № 15. P. 1750–1768.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1581272>
51. *Griffin M.L., Beasley D.B., Fletcher J.J., Foster G.R.* Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units // *Journal of soil and water conservation*. 1988. V. 43. № 4. P. 326–331.
52. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. № 6160. P. 850–853.
<https://doi.org/10.1126/science.1244693>
53. *Hengl T., Jesus J.M.De, MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M.* Correction: SoilGrids1km – Global Soil Information Based on Automated Mapping // *PLoS ONE*. 2014. V. 9. № 12. P. e114788.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114788>
54. *Jazouli A. El, Barakat A., Ghafiri A., Moutaki S. El, Ettaqy A., Khellouk R.* Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco) // *Geoscience Letters*. 2017. V. 4. № 1. P. 25.
<https://doi.org/10.1186/s40562-017-0091-6>
55. *Kinnell P.I.A.* Discussion: Misrepresentation of the USLE in ‘Is sediment delivery a fallacy?’ // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008. V. 33. № 10. P. 1627–1629.
<https://doi.org/10.1002/esp.1629>
56. Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 19022EN, 1999. 58 p.
57. *Lehner B., Grill G.* Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. V. 27. № 15. P. 2171–2186.
<https://doi.org/10.1002/hyp.9740>

58. *McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K., Meyer L.D.* Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation // *Trans. ASAE*. 1987. V. 30. № 5. P. 1387–1396.
59. *Melkonian A.K., Willis M.J., Pritchard M.E., Stewart A.J.* Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 174. P. 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.001>
60. *Meusburger K., Konz N., Schaub M., Alewell C.* Soil erosion modelled with USLE and PESERA using QuickBird derived vegetation parameters in an alpine catchment // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. V. 12. № 3. P. 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.004>
61. *Nachtergaele F., Velthuisen H. Van, Verelst L.* Harmonized world soil database // *Food and Agriculture ...*. 2008. P. 43.
62. *Nearing M.A.* A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. V. 61. № 3. P. 917–919.
63. *Olorunfemi I.E., Komolafe A.A., Fasinmirin J.T., Olufayo A.A., Akande S.O.* A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models // *CATENA*. 2020. V. 194. P. 104725. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725>
64. *Oost K. Van, Govers G., Cerdan O., Thauré D., Rompaey A. Van, Steegen A., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J.* Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets // *CATENA*. 2005. V. 61. № 2–3. P. 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.001>
65. *Ozcan A.U., Erpul G., Basaran M., Erdogan H.E.* Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Çankırı, Turkey // *Environmental Geology*. 2008. V. 53. № 8. P. 1731–1741. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0779-6>
66. *Panagos P. et al.* Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. № 1. P. 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
67. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K.* A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water // *Geosciences*. 2015. V. 5. P. 117–126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
68. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., Montanarella L.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale // *Land Use Policy*. 2015. V. 48. P. 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
69. *Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C.* The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // *Environmental Science and Policy*. 2015. V. 54. № August. P. 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
70. *Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M.* Is sediment delivery a fallacy? // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2006. V. 31. № 10. P. 1325–1328. <https://doi.org/10.1002/esp.1395>
71. *Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M.* Is sediment delivery a fallacy? Reply // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008. V. 33. № 10. P. 1630–1631. <https://doi.org/10.1002/esp.1627>
72. *Pietroń J., Chalov S.R., Chalova A.S., Alekseenko A.V., Jarsjö J.* Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin // *Catena*. 2017. V. 152. P. 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
73. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020.
74. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) // *Agricultural Handbook* № 703. 1997. P. 404. <https://doi.org/DC0-16-048938-5> 65–100
75. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P.* RUSLE: revised universal soil loss equation // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1991. V. 46. № 1. P. 30–33.
76. Validation of soil erosion risk assessments in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 20676 EN, 2003. 25 p.
77. *Schönbrodt S., Saumer P., Behrens T., Seeber C., Scholten T.* Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China // *Journal of Earth Science*. 2010. V. 21. № 6. P. 835–845. <https://doi.org/10.1007/s12583-010-0135-8>

78. *Shrestha N.K., Wang J.* Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate // *Science of The Total Environment*. 2018. V. 625. P. 1030–1045. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.347>
79. *Syvitski J.P.M., Milliman J.D.* Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean // *Journal of Geology*. 2007. № 115. P. 1–19.
80. *Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S.* Limitations Posed by Free DEMs in Watershed Studies: The Case of River Tanaro in Italy // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. № May. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00141>
81. *Tsyplenkov A.S., Shynbergenov E.A., Chalov S.R., Ermolaev O.P.* Spatio-temporal assessment of soil erosion and sediment yield for a large river basin // *The Second International Young Scientists Forum on Soil and Water Conservation and ICCE symposium 2018 “Climate Change Impacts on Sediment Dynamics: Measurement, Modelling and Management”*. Moscow, 2018.
82. *Turowski J.M., Rickenmann D., Dadson S.J.* The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: A review of empirical data // *Sedimentology*. 2010. V. 57. № 4. P. 1126–1146. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
83. *Vente J. de, Poesen J.* Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models // *Earth-Science Reviews*. 2005. V. 71. № 1–2. P. 95–125. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
84. *Williams J.R.* Chapter 25: The EPIC model. // *Computer models of watershed hydrology* / ed. Singh V.P. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995. P. 909–1000.
85. *Wilson J.P.* Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds // *Journal of soil and water conservation*. 1986. V. 41. № 3. P. 179–184.
86. *Wischmeier W.H., Smith D.D., Uhland R.E.* Evaluation of factors in the soil loss equation // *Agricultural Engineering*. 1958. V. 39. № 8. P. 458–462.
87. *Wu S., Li J., Huang G.* An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models // *Environmental Modeling & Assessment*. 2005. V. 10. № 1. P. 33–42. <https://doi.org/10.1007/s10666-004-6595-4>
88. *Zingg A.W.* Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff // *Agric. Engineering*. 1940. V. 21. P. 59–64.
89. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. Москва: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.

Assessment of Basin-Scale Soil Erosion within the Largest Siberian Rivers

A. S. Tsyplenkov^{1, *}, S. R. Chalov^{1, **}, and G. L. Shinkareva^{1, ***}

¹*Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

**E-mail: atsyplenkov@gmail.com*

***E-mail: srchalov@gmail.com*

****E-mail: galina.shinkareva@gmail.com*

Abstract—In this paper, we assessed soil erosion within the largest river basins of the Russian Federation (Ob, Yenisei, Lena, Yana, Indigirka, Kolyma). Soil losses have been estimated with RUSLE based on the digital elevation model of the maximum available resolution ($\approx 90 \times 90$ m). The results are compared with existing global estimates and previous studies for the Russian territory. The conclusion was made about high uncertainty of small-scale erosion estimates made on a subcontinental scale, which is explained by the high sensitivity of RUSLE to the parameterization of the length and steepness of slopes. In the sublatitudinal direction, for all basins there is an increase in erosion from north to south, corresponding to the general strengthening of agricultural land use. Based on comparison with the suspended sediment yield, the conclusion was made about an exceptionally accumulative regime of the considered watersheds: more than 90% of sediments do not reach the estuaries of the rivers.

Keywords: soil erosion, universal soil loss equation, Arctic, sediment yield

REFERENCES

1. Alekseevskij N.I. Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov. Moskva: Geograficheskij fakul'tet MGU Moskva, 1998. 202 s.
2. Bazhenova O.I. Zakonomernosti dvizhenija ryhlogo materiala na lesostepnyh sklonah v Nazarovskoj vpadine (po rezul'tatam stacionarnyh nabljudenij) // Geografija i prirodnye resursy. 1988. S. 53–73.
3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupjan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometri MODIS // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2011. T. 8. vyp. 4. S. 285–302.
4. Beljaev Ju.R., Harchenko S.V., Romanenko F.A., Eremenko E.A., Matlahova E.Ju. Antropogennaja transformacija rel'efa Arkticheskoj zony Rossii: hronologija, geografija, intensivnost' // Rel'ef i chetvertichnye obrazovanija Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii. Materialy ezhegodnoj konferencii po rezul'tatam jekspedicionnyh issledovanij. VNIIOkeangeologija/AANII Sankt-Peterburg, 2020. S. 18–23.
<https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10702>
5. Bredihin A.V., Eremenko E.A., Harchenko S.V., Beljaev Ju.R., Romanenko F.A., Bolysov S.I., Fuzzeina Ju.N. Rajonirovanie Rossijskoj Arktiki po tipam antropogennogo osvoenija i soputstvujushhej transformacii rel'efa na osnove klasternogo analiza // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5. Geografija. 2020. vyp. 1. S. 42–56.
6. Vol'nov V.V., Bojko A.V., Chichkarev A.S. Opyt ispol'zovanija protivojerozionnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij v bor'be so stokom talyh vod i smyvom pahotnyh pochv na sklonovyh zemljah Altajskogo kraja // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017.
7. Golosov V.N. Jerozionno-akkumulativnye processy v rechnyh bassejnah osvoennyh ravnin. GEOS Moskva, 2006.
8. Golosov V.N., Larionov G.A., Sidorchuk A.Ju. Istoricheskij jetap v osvoenii jerozionno-ruslovyh sistem // Jerozionno-ruslovyje sistemy / red. Chalov R.S., Golosov V.N., Sidorchuk A.Ju. M., 2017. S. 702.
9. Gusarov A.V. Opredelenie minimal'noj prodolzhitel'nosti rjada nabljudenij za stokom vzveshennyh nanosov s cel'ju korrektnoj ocenki prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti intensivnosti jerozii v ih bassejnah // Geomorfologija. 2017. vyp. 1. S. 19–29.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-19-29>
10. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. Jerozija i stok nanosov na Zemle. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo Universiteta, 1984. 264 s.
11. Evseeva N.S. Sovremennij morfolitogenez jugo-vostoka Zapadno-Sibirskoj ravniny. Tomsk: Izd-vo NTL, 2009. 484 s.
12. Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Osinceva N.V., Aleev V.V. Kolichestvennaja ocenka smyva pochv v agrolandschaftah juzhnoj tajgi // Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernyh vzaimodejstvij v pochvah i pochvennom pokrove. sbornik materialov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvjashhennoj 85-letiju kafedry pochvovedenija i jekologii pochv TGU. Tomsk: NI TGU, 2015. S. 185–189.
13. Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Ljudkevich E.I. Jerozionnye processy v prirodno-antropogennyh geosistemah juzhnoj tajgi Zapadno-Sibirskoj ravniny i ih geojekologicheskie aspekty // Geojekologija, inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija. 2014. vyp. 5. S. 442–449.
14. Ivanov V.V., Chalov S.R. Ocenka stoka i sostava nanosov r. Ob' // Zakonomernosti projavlenija jerozionnyh i ruslovyh processov v razlichnyh prirodnyh uslovijah. Materialy V Sserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. M., 2019. S. 219–222.
15. Larionov G.A. Jerozija i defljacija pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye ocenki. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, 1993. 200 s.
16. Liseckij F.N., Svetlichnyj A.A., Chernyj S.G. Sovremennye problemy jeroziovedenija / red. Svetlichnyj A.A. Belgorod: Konstanta, 2012. 456 s.
17. Lysanova G.I., Sorokovoj A.A. Potencial zemel'nyh resursov regionov Sibiri // Geografija i Prirodnye Resursy. 2015. vyp. 2. S. 149–155.
18. Magrickij D.V. Godovoj stok vzveshennyh nanosov rossijskich rek vodosbora Severnogo Ledovitogo okeana i ego antropogennye izmenenija // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija. 2010. vyp. 6. S. 17–24.
19. Savel'eva D.A., Kalichkin V.K. Vnutrizezonnyj monitoring vodnoj jerozii pochv pashni v podtajge Zapadnoj Sibiri // Dostizhenija nauki i tehniki APK. 2021. T. 35. vyp. 5. S. 15–21.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10502>
20. Surmach G.P. Vodnaja jerozija i bor'ba s nej. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 254 s.
21. Tanasienko A.A. Specifika jerozii pochv v Sibiri. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2003. 176 s.

22. Chalov S.R., Shkol'nyj D.I., Promahova E.V., Leman V.N., Romanchenko A.O. Formirovanie stoka nanosov v rajonah razrabotok rossypanyh mestorozhdenij // *Geografija i Prirodnye Resursy*. 2015. vyp. 2. S. 22–30.
23. Chebochakov E.Ja., Murtaev V.N. Sovremennoe sostojanie ispol'zovanija pahotnyh zemel' v hozjajstvax raznyh form sobstvennosti prienisejskoj Sibiri // *Vestnik KrasGAU*. 2021. T. 2. vyp. 167. S. 10–16.
24. Chumbaev A.S., Tanasienko A.A. Izmerenie i ocenka jerozii pochv v rezul'tate snegotajaniya // *Novye metody i rezul'taty issledovanij landshaftov v Evrope, Central'noj Azii i Sibiri* / red. Sychev V.G., Mjuller L. Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut agrohimii imeni D.N. Prjanishnikova, 2018. S. 224–228. doi: 10.25680/7597.2018.78.77.145
25. Shvebs G.I. Formirovanie vodnoj jerozii, stoka nanosov i ih ocenka. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. 184 s.
26. Shynbergenov E.A., Ermolaev O.P. Potencial'naja jerozija pochv bassejna R. Lena // *Vest. Udmurt. un-ta. Ser. Biologija. Nauki o Zemle*. 2017. T. 27. vyp. 4. S. 513–528.
27. Shheglova O.P. Formirovanie stoka vzveshennyh nanosov i smyv s gornoj chasti Srednej Azii // *Tr. Sredneaznigmi*. 1972. vyp. 60/75. S. 228.
28. Global Soil Partnership endorses guidelines on sustainable soil management | Global Soil Partnership | Food and Agriculture Organization of the United Nations [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/416516/>.
29. Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1sem.html>.
30. Jerozionnye processy central'nogo Jamala / red. Sidorchuk A.Ju., Baranov A.V. Spb., 1999. 350 s.
31. FAO. Crops Production [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
32. Jerozionno-ruslovyje sistemy / red. Chalov R.S., Golosov V.N., Sidorchuk A.Ju. M.: INFRA-M, 2017. 702 s.
33. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. Vol. 7. № 3. P. 203–225. doi: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004
34. Alewell C., Meusburger K., Juretzko G., Mabit L., Ketterer M.E. Suitability of ²³⁹⁺²⁴⁰Pu and ¹³⁷Cs as tracers for soil erosion assessment in mountain grasslands // *Chemosphere*. 2014. Vol. 103. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.016>
35. Atoma H., Suryabagavan K. V., Balakrishnan M. Soil erosion assessment using RUSLE model and GIS in Huluka watershed, Central Ethiopia // *Sustainable Water Resources Management*. 2020. Vol. 6. № 1. P. 12. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00365-z>
36. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. № 11. P. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
37. GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report. 2011.
38. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K. Van, Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. № 1. P. 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
39. Bosco C., Rigo D. De, Dewitte O., Poesen J., Panagos P. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. Vol. 15. № 2. P. 225–245. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-225-2015>
40. Chadli K. Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco) // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016. Vol. 2. № 2. P. 51. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>
41. Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A. V., Promakhova E. V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N. Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China // *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77. № 7. P. 274. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7448-9>
42. Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Testing soil erosion model for large river basins: Lena river // 3rd International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers 18–21 April 2017, New Delhi, India. New Delhi, 2017.

43. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. № 7. P. 1991–2007.
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
44. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. 2011. 26 p.
45. Desmet P., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. Vol. 51. № 5. P. 427–433.
46. Desmet P.J.J., Govers G. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information // *Catena*. 1995. Vol. 25. № 1–4. P. 389–401.
47. Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Noël G.E., Teisserenc R., Probst J.L., Pérez J.M.S. Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic ocean: The case of the Yenisei River basin // *Water Research*. 2019. Vol. 158. P. 118–135.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.018>
48. Viewfinder Panoramas [Электронный ресурс] / Ferranti J. de. Режим доступа: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html>.
49. Fu B., Liu Y., Lü Y., He C., Zeng Y., Wu B. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China // *Ecological Complexity*. 2011. Vol. 8. № 4. P. 284–293.
<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.07.003>
50. Gayen A., Saha S., Pourghasemi H.R. Soil erosion assessment using RUSLE model and its validation by FR probability model // *Geocarto International*. 2020. Vol. 35. № 15. P. 1750–1768.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1581272>
51. Griffin M.L., Beasley D.B., Fletcher J.J., Foster G.R. Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units // *Journal of soil and water conservation*. 1988. Vol. 43. № 4. P. 326–331.
52. Hansen M.C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. Vol. 342. № 6160. P. 850–853.
<https://doi.org/10.1126/science.1244693>
53. Hengl T., Jesus J.M. De, MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M. Correction: Soil-Grids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. № 12. P. e114788.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114788>
54. Jazouli A. El, Barakat A., Ghafiri A., Moutaki S. El, Ettayq A., Khellouk R. Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco) // *Geoscience Letters*. 2017. Vol. 4. № 1. P. 25.
<https://doi.org/10.1186/s40562-017-0091-6>
55. Kinnell P.I.A. Discussion: Misrepresentation of the USLE in ‘Is sediment delivery a fallacy?’ // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008. Vol. 33. № 10. P. 1627–1629. doi: 10.1002/esp.1629
56. Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 19022EN, 1999. 58 p.
57. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world’s large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. Vol. 27. № 15. P. 2171–2186.
<https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
58. McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K., Meyer L.D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation // *Trans. ASAE*. 1987. Vol. 30. № 5. P. 1387–1396.
59. Melkonian A.K., Willis M.J., Pritchard M.E., Stewart A.J. Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 174. P. 244–257.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.001>
60. Meusburger K., Konz N., Schaub M., Alewell C. Soil erosion modelled with USLE and PESERA using QuickBird derived vegetation parameters in an alpine catchment // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. Vol. 12. № 3. P. 208–215.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.004>
61. Nachtergaele F., Velthuisen H. Van, Verelst L. Harmonized world soil database // *Food and Agriculture ...*. 2008. P. 43.
62. Nearing M.A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. Vol. 61. № 3. P. 917–919.

63. Olorunfemi I.E., Komolafe A.A., Fasinmirin J.T., Olufayo A.A., Akande S.O. A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models // CATENA. 2020. Vol. 194. P. 104725.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725>
64. Oost K. Van, Govers G., Cerdan O., Thauré D., Rompaey A. Van, Steegen A., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J. Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets // CATENA. 2005. Vol. 61. № 2–3. P. 105–121.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.001>
65. Ozcan A.U., Erpul G., Basaran M., Erdogan H.E. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Çankırı, Turkey // Environmental Geology. 2008. Vol. 53. № 8. P. 1731–1741.
<https://doi.org/10.1007/s00254-007-0779-6>
66. Panagos P. et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. № 1. P. 4175.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
67. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water // Geosciences. 2015. Vol. 5. P. 117–126.
<https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
68. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., Montanarella L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale // Land Use Policy. 2015. Vol. 48. P. 38–50.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
69. Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // Environmental Science and Policy. 2015. Vol. 54. № August. P. 438–447.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
70. Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M. Is sediment delivery a fallacy? // Earth Surface Processes and Landforms. 2006. Vol. 31. N 10. P. 1325–1328.
<https://doi.org/10.1002/esp.1395>
71. Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M. Is sediment delivery a fallacy? Reply // Earth Surface Processes and Landforms. 2008. Vol. 33. № 10. P. 1630–1631.
<https://doi.org/10.1002/esp.1627>
72. Pietroni J., Chalov S.R., Chalova A.S., Alekseenko A.V., Jarsjö J. Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin // Catena. 2017. Vol. 152. P. 82–93.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
73. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020.
74. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) // Agricultural Handbook No. 703. 1997. P. 404.
[https://doi.org/10.1016/0167-6369\(97\)00040-0](https://doi.org/10.1016/0167-6369(97)00040-0)
75. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P. RUSLE: revised universal soil loss equation // Journal of Soil and Water Conservation. 1991. Vol. 46. № 1. P. 30–33.
76. Validation of soil erosion risk assessments in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 20676 EN, 2003. 25 p.
77. Schönbrodt S., Saumer P., Behrens T., Seeber C., Scholten T. Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China // Journal of Earth Science. 2010. Vol. 21. № 6. P. 835–845.
<https://doi.org/10.1007/s12583-010-0135-8>
78. Shrestha N.K., Wang J. Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 625. P. 1030–1045.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.347>
79. Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean // Journal of Geology. 2007. № 115. P. 1–19.
80. Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S. Limitations Posed by Free DEMs in Watershed Studies: The Case of River Tanaro in Italy // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. № May.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00141>
81. Tsyplenkov A.S., Shynbergenov E.A., Chalov S.R., Ermolaev O.P. Spatio-temporal assessment of soil erosion and sediment yield for a large river basin // The Second International Young Scientists Forum on Soil and Water Conservation and ICCE symposium 2018 “Climate Change Impacts on Sediment Dynamics: Measurement, Modelling and Management”. Moscow, 2018.

-
82. Turowski J.M., Rickenmann D., Dadson S.J. The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: A review of empirical data // *Sedimentology*. 2010. Vol. 57. N 4. P. 1126–1146.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
 83. Vente J. de, Poesen J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models // *Earth-Science Reviews*. 2005. Vol. 71. № 1–2. P. 95–125.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
 84. Williams J.R. Chapter 25: The EPIC model. // *Computer models of watershed hydrology* / ed. Singh V.P. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995. P. 909–1000.
 85. Wilson J.P. Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds // *Journal of soil and water conservation*. 1986. Vol. 41. № 3. P. 179–184.
 86. Wischmeier W.H., Smith D.D., Uhland R.E. Evaluation of factors in the soil loss equation // *Agricultural Engineering*. 1958. Vol. 39. № 8. P. 458–462.
 87. Wu S., Li J., Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models // *Environmental Modeling & Assessment*. 2005. Vol. 10. № 1. P. 33–42.
<https://doi.org/10.1007/s10666-004-6595-4>
 88. Zingg A.W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff // *Agric. Engineering*. 1940. Vol. 21. P. 59–64.
 89. Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skoxozyajstvennyh zemel' Rossii*. Moskva: IKC "Akademkniga", 2002. 255 s.