

СОВРЕМЕННАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ И ПРОЦЕССНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.4.042

ФАКТОРЫ ЭРОЗИИ ПОЧВ В БАССЕЙНОВЫХ ГЕОСИСТЕМАХ АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2025 г. О. П. Ермолаев¹, С. С. Мухарамова¹, А. Р. Полякова¹, *, А. А. Савельев¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: zakieva.alika@mail.ru

Поступила в редакцию 30.06.2025 г.

После доработки 10.08.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

По эрозионным моделям проведена количественная оценка факторов и интенсивности почвенной эрозии в макрорегионе азиатской части России южнее 60° с.ш. за период 2015–2021 гг. с пространственным разрешением 100 м и последующим обобщением результатов на более чем 100 тыс. бассейнов малых рек. Дождевая (ливневая) эрозия почв оценивалась с использованием модели USLE/RUSLE. Оценка талого смыва выполнена по методике научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ имени М.В. Ломоносова. Для макрорегиона впервые реализованы новые подходы оценки факторов эрозии: эрозионного потенциала дождевых осадков (R-фактор) и фактора растительности (C-фактор). Оценка R-фактора проводилась на основе разработанных статистических моделей с использованием внутрисуточных данных об осадках на метеостанциях Росгидромета и пространственных ковариат, полученных по данным дистанционного зондирования Земли. Оценка C-фактора выполнялась ежемесячно на основе многовременных данных дистанционного зондирования, предоставляющих информацию о типах земного покрова, плотности растительности, спектральных вегетационных индексах и фенологических метриках (продукты CGLSLC, Fcover, MOD13Q1, MYD13Q1, VNP22Q2). Впервые для макрорегиона получена современная оценка фактора талой эрозии — максимальных (предвесенних) запасов воды в снеге. Оценка выполнялась с использованием продукта CGLS SWE, получаемого по спутниковым данным. Годовая (талая и дождевая) интенсивность почвенной эрозии в целом по территории в среднем 3.1 т/га в год, при этом медиана 0.045 т/га в год. На пахотных землях темпы эрозии в среднем составляют 1.8 т/га в год, медиана 0.54 т/га в год.

Ключевые слова: запасы воды в снеге, эродированность, ливневой смыл, талый смыл, USLE/RUSLE, C-фактор, R-фактор, дистанционное зондирование

DOI: 10.7868/S2658697525060059

ВВЕДЕНИЕ

Процессы эрозии в гумидных и семигумидных областях Земли выступают одним из основных компонентов денудации, уменьшая мощность гумусового горизонта приводят к деградации почвенного покрова, изменению гидрологического режима рек и водоемов. Еще одной особенностью эрозионных процессов в сравнении с другими экзогенными процессами рельефообразования является их практически сплошное проявление на склоновых землях.

Макрорегион исследования — азиатская часть России (АЧР) — чрезвычайно разнообразен

по набору ландшафтно-климатических условий и степени антропогенной (в первую очередь, сельскохозяйственной) освоенности. Несмотря на то, что сельскохозяйственное освоение земель в АЧР началось несколько позже, чем в европейской (Танасиенко и др., 1999), почвы данной территории обладают низкой противозерозной устойчивостью, а степная растительность имеет слабую почвозащитную способность (Баженова и др., 1997). Специфической особенностью Западной и Восточной Сибири является ливневый режим выпадения осадков во второй половине лета, когда наблюдается низкая водопроницаемость грунтов (0.2–0.4 мм/мин)

(Баженова и др., 1997). В целом наблюдается увеличение эрозионной опасности ливневых осадков (Баженова и др., 2023; Bazhenova et al., 2022b), как и на территории европейской части России (Chizhikova et al., 2022). Кроме того, отличительной чертой территории исследования является формирование устойчивого снежного покрова со значительными максимальными запасами воды в снеге (от 56 до 220 мм), а также высокой активностью весенних процессов (Танасиенко и др., 1999). Активное развитие эрозионных процессов на степных склонах и сельскохозяйственных землях подтверждают данные многолетних экспериментальных наблюдений за смывом, полученных в ходе круглогодичных, сезонных, стационарных и экспедиционных наблюдений за период 1975–2015 гг. в степных районах Сибири (Баженова, 2018). Имеются предпосылки возникновения склонового смыва в естественных условиях даже без антропогенного вмешательства (Баженова и др., 1997).

Оценка факторов и интенсивности дождевой и талой эрозии на территории АЧР также приводится в ряде статей (Баженова и др., 1997; Литвин и др., 2021; Танасиенко, 2009; Хмелев, Bazhenova et al., 2022a). Важно отметить существующие требования к актуальности и реалистичности данных, используемых в модельных расчетах факторов эрозии. На это особо обращают внимание исследователи, заново публикуя на один и тот же макрорегион мира обновленные результаты, как по факторам эрозии, так и по ее интенсивности, совершенствуя при этом методы оценки и прогноза факторов (Литвин, 2002; Литвин и др., 2017; Borrelli et al., 2017; Das et al., 2024; Golosov et al., 2021; Matthews et al., 2025; Panagos et al., 2015a, б, 2023).

В данной работе представлены современные оценки факторов эрозии почв, а также темпов ливневой и талой эрозии почв для макрорегиона азиатской части России южнее 60-й параллели с использованием бассейнового подхода.

Ранее подобные исследования были завершены нами по европейской территории России и опубликованы в соответствующей статье (Ермолаев и др., 2025). Поэтому мы постарались изложить результаты исследований в той же структуре и стилистике.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования. Объектом исследования являлся почвенный покров, а предметом исследования — факторы и интенсивность эрозии почв от ливневого и талого стока в обозначенном макрорегионе АЧР. Интенсивность почвенной эрозии оценивалась по эрозионным моделям. Предварительно получены оценки

факторов почвенной эрозии, входящих в используемые эрозионные модели. Результаты оценок факторов существенно зависят от качества исходных данных, методик их получения, пространственной и временной детальности. Проведенные оценки с учетом размеров территории базируются на максимально высоком уровне пространственной детальности: значения определяются в ячейках раstra с шагом 100 м с последующим обобщением результатов на бассейны малых рек. Наиболее объемная с технологической и сложная с методической точки зрения задача в рамках исследования — это получение современных количественных оценок эрозионного потенциала осадков (R-фактор) и хозяйственно-агрономического фактора (C-фактор).

Территория исследования. Особенности региона исследования являются значительные размеры (около 6 млн км²), большая протяженность в западно-восточном направлении и крайне высокое разнообразие ландшафтно-климатических условий. Ограничение территории 60-й параллелью обусловлено возможностями и перспективами ведения здесь сельского хозяйства. По агроклиматическому районированию (Географический ..., 1982) южнее этой параллели годовая сумма температур воздуха более +10°C превышает 1000°C, что потенциально позволяет выращивать ранние и среднеранние культуры (серые хлеба, пшеницу, зернобобовые, картофель и др.). Вечная мерзлота здесь имеет лишь островное или прерывистое распространение (Национальный ..., 2004). Исследование почвенной эрозии к северу от 60-й параллели менее актуально по причине ее ареального проявления. Здесь она согласно “Схеме районирования по опасности эрозионной деградации почв России” очень локализована и привязана к районам лесопромышленной или пастбищно-оленоводческой деятельности (Литвин, 2002).

Подходы к моделированию. Оценка интенсивности эрозии почвы выполнялась по эмпирическим математическим моделям. Для периода дождевого (ливневого) поверхностного стока — это универсальное уравнение потерь почвы (USLE/RUSLE) (Wischmeier, Smith, 1978) в виде:

$$W_r = R \cdot K \cdot LS \cdot C, \quad (1)$$

где W_r — интенсивность ливневого смыва почвы (т/га в год); R — фактор ливневых осадков (МДж·мм/(га·час)); K — фактор эродированности почвы ((т·га·час)/(МДж·га·мм)); LS — фактор рельефа (безразмерный); C — хозяйственно-агрономический фактор (безразмерный). Для

периода таяния снега — модель НИЛЭПиРП МГУ имени М.В. Ломоносова (Ларионов, 1993):

$$W_s = f_1(L, K, H) \cdot C_s \cdot f_2(S), \quad (2)$$

где W_s — интенсивность талого смыва почвы (т/га в год); L — длина склона (м); K — фактор эродированности почвы (т/га/ед. эрозионного потенциала осадков); C_s — фактор растительности в период снеготаяния (безразмерный); S — уклон склона (тангенс угла наклона); H — слой поверхностного склонового стока во время снеготаяния (мм), определяемый величинами максимальных (предвесенних) запасов воды в снеге (H_s , мм) и коэффициентом стока в период снеготаяния (k_s , безразмерный) как $H = H_s \cdot k_s$. Годовая интенсивность почвенной эрозии $\bar{W}$ (т/га в год) рассчитывалась суммированием темпов смыва почв при ливневом и при талом стоке:

$$W = W_r + W_s. \quad (3)$$

В рамках моделей факторы рельефа и K -фактор приняты неизменными во времени, а факторы R , C , H рассматривались как динамические и оценивались как среднесноголетние за современный период 2015–2021 гг. Оценки факторов и темпов эрозии проводились на растрах с размером ячеек (пикселей) 100 м средствами авторского программного обеспечения, разработанного на Python (Van Rossum, Drake, 2009) и в статистической среде R¹. Основные методические аспекты подходов к оценке факторов эрозии опубликованы нами ранее (Ермолаев и др., 2025) в контексте исследования темпов почвенной эрозии на европейской территории страны. Для АЧР эти подходы были доработаны с целью адаптации к географическим условиям макрорегиона и в связи с особенностями получения исходных данных.

R -фактор. Согласно модели USLE/RUSLE R -фактор определяется как сумма эрозионной активности дождей, выпавших за некоторый период (обычно год). Требуемые для расчетов этой активности данные с высоким временным разрешением (данные плювиографов, данные об осадках с частотой не реже 1–30 мин) труднодоступны, имеют короткие периоды наблюдений и их сложно получать в большом масштабе. Поэтому большинство исследований с широким пространственным охватом используют методы приближенной оценки R -фактора по более доступным данным с грубым

временным разрешением — обычно по годовым осадкам. Такие аппроксимирующие уравнения, разработанные для конкретных регионов, плохо применимы в других условиях. Кроме этого, они не отражают влияние на R экстремальных событий — наиболее эрозионно-опасных ливней высокой интенсивности. Примененный нами подход развивает метод приближенной оценки R -фактора с использованием внутрисуточных данных об осадках, которые могут быть лучшей альтернативой для оценки R по сравнению с годовыми, месячными и суточными данными. Подход основан на создании эмпирических моделей и реализовывался в три этапа.

На первом этапе по доступным данным автоматических метеостанций с высоким временным разрешением рассчитывалась эрозионная активность наблюдаемых дождей по формулам USLE/RUSLE — как произведение кинетической энергии дождя на максимальную 30-минутную интенсивность: $r_s = E \cdot I_{30}$. Далее строилась статистическая модель (обозначим GAM1) зависимости эрозионной активности дождя от внешних факторов (характеристик дождя, места и времени его выпадения) с использованием метода обобщенно-аддитивных моделей (Hastie, Tibshirani, 1986).

На следующем шаге построенная модель GAM1 применялась на метеостанциях, обеспеченных внутрисуточными данными об осадках (до 4-х наблюдений в сутки). На них в заданный интервал лет выделялись “модельные” дожди — непрерывная последовательность сроков наблюдения, в каждом из которых зафиксированы дождевые осадки (аппроксимация плювиограмм). Для каждого “модельного” дождя по GAM1 рассчитывалась оценка его эрозионной активности r_s в зависимости от значений предикторов модели. Суммированием r_s ливней (дождей со слоем осадков >10 мм) рассчитывались помесечные и годовые оценки R -фактора на каждой метеостанции для всех лет наблюдений. Далее выполнялись среднесноголетние обобщения за заданный период (2015–2021 гг.) — среднесноголетние помесечные оценки и среднесноголетняя годовая оценка R -фактора на метеостанциях.

На заключительном этапе моделировалось пространственное распределение R -фактора по всему макрорегиону. Примененный метод моделирования использовал не только географическую близость тех или иных метеостанций к точке интерполяции, но и достоверные пространственные ковариаты. Строилась статистическая модель (обозначим GAM2) зависимости среднесноголетних помесечных оценок R -фактора на метеостанциях от потенциальных

¹ R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2021.

ковариат, получаемых по данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). Модель комбинировалась из двух нелинейных моделей: биномиальной модели вероятности наличия эрозионных дождей в тот или иной месяц и логнормальной модели R -фактора при условии ненулевой вероятности эрозионных дождей в соответствующем месяце. По построенной GAM2 на основе значимых ковариат рассчитывались помесечные пространственные тренды R . Далее в соответствии с принципами геостатистики, тренд вычитался из значений R на метеостанциях, и проводилась пространственная интерполяция остатков (разницы) методом МВА (Lee et al., 1997). Результирующая оценка R -фактора для каждого месяца в произвольной точке исследуемой территории получалась с учетом интерполированной поправки. Растр годового R -фактора рассчитывался как сумма растров помесечных R .

Для реализации заявленного подхода в нашем распоряжении имелись данные об осадках с высоким временным разрешением (с шагом по времени 10 мин), полученные на автоматических метеостанциях (предоставлены производителем контрольно-измерительных устройств для метеомониторинга компанией ГК “Эскаорт”). На их основе выделены около 4000 событий-дождей, наблюдаемых на АЧР в 64 локациях в 2017–2022 гг. Как внутрисуточные данные об осадках использовались срочные данные о количестве осадков на метеостанциях Росгидромета, загруженные из открытого цифрового архива ВНИИГМИ-МЦД² (Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных). В изучаемом макрорегионе АЧР расположено 193 метеостанций, ведущих такие наблюдения с 1966 г. Всего на них за обеспеченные годы было выделено 380725 модельных дождей; из них 123800 эрозионных дождей (со слоем осадков >10 мм).

С-фактор. Оценка C -фактора при ливневом стоке проводилась на основе анализа данных ДЗЗ. Применялся подход, разработанный и реализованный нами для европейской России (Ермолаев и др., 2025; Mukharamova et al., 2021) и адаптированный к АЧР. Подход предполагает помесечную оценку C для заданного диапазона лет и разные методы оценки на пахотных и на всех других видах земель (непахотных). Разделение земель (пикселей) на пахотные и непахотные проводилось по ежегодным рас-

трам Copernicus Global Land Service Land Cover (CGLSLC, разрешение 100 м)³.

На непахотных землях при оценке C -фактора влияние растительности учитывалось по биофизической переменной F_{cover} ⁴ (плотность растительности от 0 до 1), получаемой по спутниковым данным PROBA-V с частотой 10 дней и разрешением 300 м. В i -й “теплый” месяц (т.е. месяц, когда выпадают жидкие осадки) j -ого года значение C в “непахотном” пикселе оценивалось как (Panagos et al., 20156):

$$C(i, j) = C_{\max} + (C_{\min} - C_{\max}) \cdot F_{cover}(i, j), \quad (4)$$

где диапазон значений $(C_{\min}, C_{\max})$ для каждого типа непахотного земного покрова берется в соответствии с наиболее цитируемыми литературными данными (Mukharamova et al., 2021).

На пахотных землях C -фактор оценивался в два этапа. На первом выполнялось автоматизированное распознавание с/х культур, присутствующих на пахотных землях в заданном году (Ivanov et al., 2021). Для распознавания анализировался временной ряд растров спектральных вегетационных индексов NDVI и EVI (получаемых по данным космосъемки MODIS со спутников Terra и Aqua, продукты MOD13Q1, MYD13Q1) за вегетационный сезон заданного года (шаг 8 дней). Обучающая выборка задавалась как набор временных рядов сезонной динамики NDVI и EVI, построенным по эталонным пикселям распознаваемых культур. В качестве метода распознавания использован один из современных методов машинного обучения — рекуррентные нейронные сети с долгосрочной и краткосрочной памятью (LSTM) (Hochreiter, Schmidhuber, 1997), показавший наилучшие результаты в сравнении с рядом других опробованных методов. Обученный алгоритм LSTM применялся для пахотных земель изучаемой территории для каждого года заданного периода (2015–2021 гг.).

На втором этапе выполнялся переход от растров распознанных с/х культур к растрам C -фактора (в пикселях пахотных земель). Предварительно на основе табличных данных об эрозионных индексах различных с/х культур (Чалов и др., 2017; Panagos et al., 20156, 2016) выполнялась математическая аппроксимация (с использованием сигмоида $a / (1 + e^{(b-x)/c})$) зависимости

³ Global Dynamic Land Cover. European Union’s Copernicus Land Monitoring Service information. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3938963>.

⁴ Fraction of Green Vegetation Cover 1999–2020 (raster 1 km), global, 10-daily — version 1. European Union’s Copernicus Land Monitoring Service information. <https://doi.org/10.2909/f8bb2439-9e0d-4bed-bda5-f7469c94999e>.

² Архив всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. <http://meteo.ru/data/> (дата обращения 22.06.2025).

эрозионных индексов от проективного покрытия в периоды от сева до уборки. Далее в каждом пикселе пахотных земель для заданного года: (I) определялись даты начала и окончания вегетации по фенологическим метрикам продукта VNP22Q2 (получаемого по данным космосъемки VIIRS со спутника Suomi NPP); (II) оценивалось значение C -фактора в i -й месяц этого года как взвешенное среднее, учитывающее пересечение этого месяца с периодом вегетации:

$$C(i, j) = w(i, j) \cdot \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{b - F_{cover}(i, j)}{c}\right)} + (1 - w(i, j)) \cdot C1. \quad (5)$$

Здесь вес $w(i, j)$ — это доля дней i -го месяца j -ого года, принадлежащих периоду вегетации (например, в некотором пикселе в апреле эта доля составляет 0; в мае может составлять 80%; в июне 100% и т.д.). С этим весом значение C вычислялось по сигмоиду в зависимости от усредненного за эти дни значения F_{cover} (плотности растительности) в пикселе. Параметры сигмоида (a , b , c) берем соответствующими культуре в пикселе. Вес $1 - w(i, j)$ — это доля дней i -го месяца до начала вегетации и/или после ее окончания. С этим весом задаем C как значение эрозионного индекса, соответствующего условиям от основной обработки почвы до сева ($C1$) (в предположении отвальной вспашки вскоре после уборки — в силу отсутствия информации о сроках основной обработки почвы и в рамках “пессимистичного” сценария).

На заключительном шаге растры C -фактора пахотных и непахотных земель совмещались в единые помесечные мозаики для каждого года и рассчитывались обобщения для заданного периода (2015–2021 гг.) — среднемноголетние помесечные оценки и среднемноголетняя годовая оценка C -фактора при ливневом стоке. C -фактор для периода снеготаяния оценивался в зависимости от типа земного покрова в пикселе как $C_s = C_{max}$.

К-фактор. Пространственное распределение эродируемости почв оценивалось с привлечением цифровых геоданных о характеристиках почвенного покрова из “Единого государственного реестра почвенных ресурсов России”⁵ (ЕГРПР). Всего для территории исследования в БД ЕГРПР представлена информация о 9097 почвенных контурах и 421 почвенном разрезе. В качестве модели для оценки K -фактора за основу взята

математическая аппроксимация номограммы модели USLE/RUSLE, которая использует для оценки эродируемости пять параметров почвы (Renard et al., 1997, 2011; Wischmeier, Smith, 1978). Первоначально значение K -фактора оценивалось в точках почвенных разрезов, где параметры номограммы определялись на основе описания разреза в БД ЕГРПР. Далее моделировалось пространственное распределение K -фактора. Если коротко, то полигону почвенной карты присваивалось значение K , обобщенное по значениям K на ближайших почвенных разрезах с тем же типом почвы с построением диаграмм Вороного. Для части почвенных контуров с учетом их местоположения на склонах (с торфяными болотными, пойменными, глеевыми типами почв) значение K принималось равным нулю, поскольку на таких участках эрозия почв не проявляется, доминируют процессы аккумуляции.

Характеристики рельефа и LS -фактор. Оценка эрозионного потенциала рельефа (LS -фактора), а также параметров рельефа для модели талого смыва (уклон, экспозиция, длина склонов) проводилась на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) MERIT v. 1 (пространственная детальность 100 м), достоинством которой является учет погрешностей, обуславливаемых лесной растительностью (Yamazaki et al., 2017). Этот аспект важен, учитывая обширные площади лесов на АЧР. После всестороннего анализа методических аспектов — результатов расчетов разными методами (Ларионов, 1993; Desmet, Govers, 1996; Moore, Nieber, 1989; Renard et al., 1997; Wischmeier, Smith, 1978) на тестовых участках с разными морфометрическими свойствами рельефа, а также с учетом опыта других исследователей по оценке LS для больших территорий (Borrelli et al., 2021), итоговый расчет LS -фактора выполнялся по методике RUSLE (Desmet, Govers, 1996; Renard et al., 1997).

Предвесенние запасы воды в снежном покрове. Для оценки эрозии почвы от талого стока необходимо вычислить слой поверхностного склонового стока во время снеготаяния (мм), определяемый величинами максимальных предвесенних запасов воды в снеге. Оценка максимальных предвесенних запасов воды в снеге проводилась на базе получаемого по спутниковым данным продукта CGLS SWE⁶, разработанного в рамках программы Copernicus Европейского космического агентства. CGLS SWE предоставляет ежедневные данные о запасах воды в снеге (Snow

⁵ Единого государственного реестра почвенных ресурсов России. <http://egrpr.esoil.ru/> (дата обращения 22.06.2025).

⁶ Snow Water Equivalent 2006–2024 (raster 5 km), Northern Hemisphere, daily — version 1. European Union's Copernicus Land Monitoring Service information. <https://doi.org/10.2909/58ca9f01-a526-418d-8862-b4be43ef4738>.

Water Equivalent, SWE) с 2006 г. по настоящее время с разрешением ~ 5 км на территориях суши между 35° и 85° с.ш. (за исключением крупных озер, горных районов и ледников). Алгоритм оценки запасов воды в снеге основан на обработке данных пассивных микроволновых радиометров космического базирования с учетом наземных измерений на метеорологических станциях. Нами для оценки максимальных предвесенних запасов обрабатывались временные ряды ежедневных растров SWE для зимне-весенних сезонов 2015–2021 гг. Для фиксированного года в каждом пикселе территории определялось максимальное значение SWE в предвесеннюю дату, после чего выполнялось обобщение для заданного периода (2015–2021 гг.). Результат — среднееголетняя оценка пространственного распределения максимальных предвесенних запасов воды в снежном покрове исследуемой территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка R -фактора. Модель GAM1, построенная в рамках подхода к оценке R -фактора, объясняет 94.6% изменчивости данных (коэффициент детерминации). Как значимые предикторы эрозионной активности дождя в модель вошли: сумма осадков дождя, характеристики времени и места выпадения дождя (номер дня в году, координаты, высота в рельефе). По этой модели рассчитаны r_s “модельных” дождей и оценки R -фактора на 193-х метеостанциях с внутрисуточными данными об осадках. Чтобы проанализировать адекватность полученных результатов, выполнено сравнение наших оценок годового R -фактора (усредненного за 1966–1985 гг.)

с оценками R , сделанными еще в советское время, по рядам плювиографических наблюдений 60-х–80-х годов на 107 метеостанциях и использованными при построении карты ЭПО на территорию России (Ларионов, 1993). И наши, и референсные оценки берутся для одинаковых периодов обобщения. Сравнение показало вполне приемлемое качество согласия — коэффициент корреляции 0.75.

Построенная модель GAM2 — модель зависимости помесечных оценок R -фактора от потенциальных ковариат — объясняет 89% изменчивости данных. В нее в качестве значимых предикторов вошли четыре пространственные переменные, полученные по данным ДЗЗ. Это месячная сумма осадков, их среднемесячная интенсивность, доля дождливых дней в месяце по спутниковым данным продукта SM2RAIN-ASCAT⁷ и содержание водяного пара в атмосфере по данным продукта NASA NEO water vapour-MODIS⁸.

Современная (по данным 2015–2021 гг.) оценка пространственного распределения среднееголетних помесечных и среднееголетней годовой оценки R -фактора ливневой эрозии в исследуемом макрорегионе, полученная с использованием разработанных моделей GAM1 и GAM2, представлена на растровом слое (рис. 1). Значения годового R -фактора варьируются в интервале 28–6180 (МДж·мм)/(га·час) в год, при этом 99% квантиль равен 2160, а 90%

⁷ SM2RAIN-ASCAT (2007–2022): global daily satellite rainfall from ASCAT soil moisture. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2591214>.

⁸ Water Vapor (8 day — Terra/MODIS). https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_E_SKY_WV&date=2024-11-01 (дата обращения 22.06.2025).

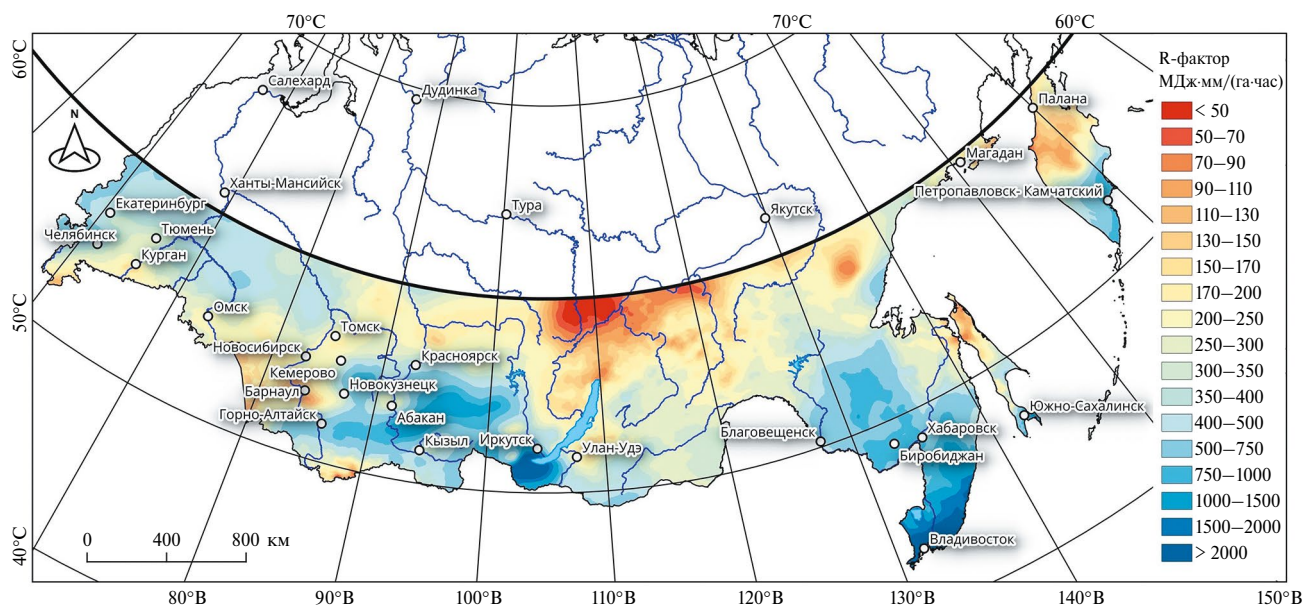


Рис. 1. Современная оценка пространственного распределения среднееголетнего годового R -фактора.

значений в интервале 120–960, среднее значение 407, медиана 300 (МДж·мм)/(га·час) в год.

Отметим, что предложенный и реализованный подход к оценке *R*-фактора является новым как в плане метода оценки *R* на метеостанциях, так и применяемого метода интерполяции, и впервые опробуется для исследуемой территории.

Оценка С-фактора. Разработанный подход к оценке С-фактора на основе многовременных данных ДЗЗ был реализован для 2015–2021 гг. Список распознаваемых с/х культур включал 18 культур (яровые и озимые злаки, зернобобовые, кукуруза и т.д.), занимающих согласно данным Росстата основную часть посевных площадей макрорегиона. Алгоритм автоматизированного распознавания LSTM был отлажен как нейронная сеть из пяти слоев с 32, 64, 64, 64 и 64 элементами. На вход ему для обучения подавались ряды NDVI и EVI MODIS за вегетационный сезон в эталонных пикселях. Перед обучением на каждой эпохе из них генерировалась случайная выборка с повтором с примерно одинаковым числом пикселей каждого класса. После 150 эпох обучения результат стабилизировался и был использован как финальный. Точность распознавания, оцененная кросс-валидацией как процент правильно распознанных пикселей, дает: 92% на обучающей выборке и 82% на контрольной. Метод хорошо распознавал как широко представленные на территории с/х культуры, так и мало представленные. Обученный алгоритм LSTM был применен для пахотных земель территории исследования для каждого года с 2015 по 2021 г. На вход для классификации подавались наборы растров

с NDVI, EVI MODIS на изучаемую территорию за вегетационный сезон года. Результатом стали семь растровых слоев, где в пикселях пахотных земель представлены коды с/х культур в соответствующий год. Чтобы оценить качество распознавания выполнено сравнение площадей под теми или иными с/х культурами в муниципальных районах макрорегиона, рассчитанных по результатам распознавания, с площадями, взятыми из открытых данных Росстата⁹. Корреляция наших результатов с данными Росстата достаточно высокая (коэффициент корреляции от 0.4 до 0.9 в зависимости от культуры), медианы и средние значения разностей площадей близки к нулю. Согласие в целом можно оценить как вполне приемлемое для наших целей.

Современная (по данным 2015–2021 гг.) оценка пространственного распределения С-фактора ливневой эрозии выполнена с учетом сезонных изменений (среднемноголетние помесечные оценки, среднемноголетняя годовая оценка) и с пространственной детальностью 100 м (рис. 2). Значения годового С-фактора для эродируемых земель макрорегиона варьируются в интервале (0.0004–0.74), 99% квантиль равен 0.56, 90% значений в интервале (0.001–0.38), среднее значение 0.08, медиана 0.0016. Для агроценозов значения этих статистик: (0.05–0.74), 0.64, (0.36–0.61), 0.50, 0.51 соответственно.

Преимущество наших оценок С-фактора — в высокой детальности исходных данных о растительном покрове, как в географическом пространстве, так и во времени, что позволяет учесть изменение растительного покрова от года

⁹ Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst/> (дата обращения 22.06.2025).

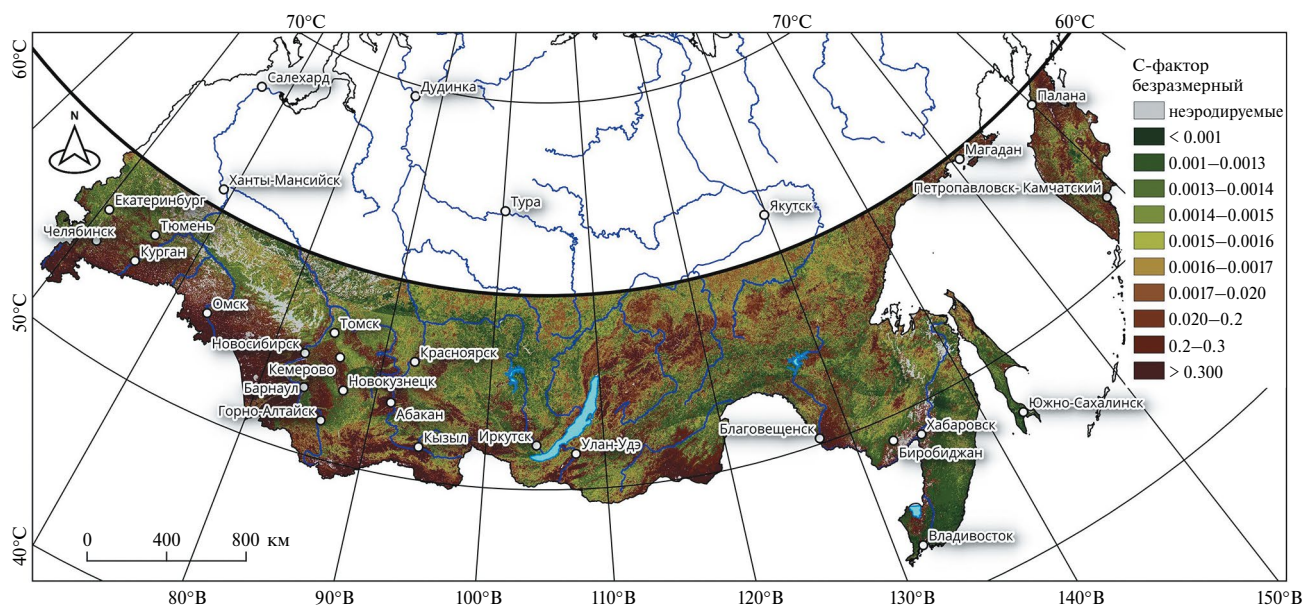


Рис. 2. Современная оценка пространственного распределения среднемноголетнего годового С-фактора.

к году (для пашен это севооборот), а также его сезонную динамику (в частности фазы вегетации с/х культур).

Оценка К-фактора. Для исследуемого макро-региона (АЧР южнее 60-й параллели) значения полученной оценки К-фактора варьируются в интервале от 0 до 0.084, среднее значение 0.035 т·га·час/МДж·га·мм (или от 0 до 4.94, среднее 2.09 т·га·мин/0.01·(т·м)·га·мм). Для эродируемых почв оценки от 0.007 до 0.084, среднее значение 0.046 т·га·час/МДж·га·мм (или от 0.44 до 4.94, среднее 2.70 т·га·мин/0.01·(т·м)·га·мм). Усредненные по изучаемой территории оценки К для основных типов почв следующие: подзолистые 3.61, дерново-подзолистые 3.24, буро-таежные 2.75, серые лесные 2.47, черноземы выщелоченные 1.86, черноземы обыкновенные 1.87, черноземы южные 2.46, каштановые 3.28 т·га·мин/0.01·(т·м)·га·мм. Значения эродируемости уменьшаются от подзолистых и дерново-подзолистых почв к серым лесным и далее к черноземным почвам, а затем увеличиваются от черноземов к каштановым почвам. Адекватность результатов может быть установлена только в самом общем виде. Наши оценки К в целом вполне согласуются (как по величинам, так и по ранжированию типов почв по К) с данными, приводимыми другими исследователями — значениями К, обобщенными для разных типов почв либо по территории всей России, либо для ее европейской части (Лисецкий и др., 2012а, б; Литвин, 2002; Чалов и др., 2017), а также для пахотных земель Восточной Сибири (Баженова и др., 1997).

Оценка LS-фактора. Полученная на основе ЦМР MERIT v. 1 оценка пространственного распределения LS-фактора рельефа характеризуется следующими статистиками: среднее значение LS составляет около 3.5, при этом медиана 1.1, а 99%-й квантиль равен 23. Для сравнения среднее значение LS для территории Европейского Союза составляет 1.63 (Panagos et al., 2015a), а для территории европейской части России среднее около 1, медиана 0.3, 99% квантиль равен 16 (Ермолаев и др., 2025).

Оценка максимальных предвесенних запасов воды в снеге по данным продукта CGLS SWE (среднемноголетняя за 2015–2021 гг.) варьирует на исследуемой территории (за исключением горных районов, где отсутствуют данные CGLS SWE) в интервале от 0 до 300 мм, 99% квантиль равен 220 мм, 90% значений варьируются в интервале от 51 до 192 мм, среднее значение 122 мм, медиана 121 мм.

Оценка интенсивности эрозии почв. С использованием полученных оценок факторов эрозии проведены расчеты по соответствующим моделям смыва от стока ливневых осадков, от стока талых вод и общей годовой интенсивности эрозии с разрешением 100 м (рис. 3) — формулы (1), (2) и (3).

Для территории исследования (без учета участков горной местности, где нет данных SWE) значения полученной оценки среднемноголетней годовой интенсивности почвенной эрозии обобщенно характеризуются следующими величинами: среднее значение 3.1 т/га в год, медиана 0.045 т/га в год, 95%-й квантиль

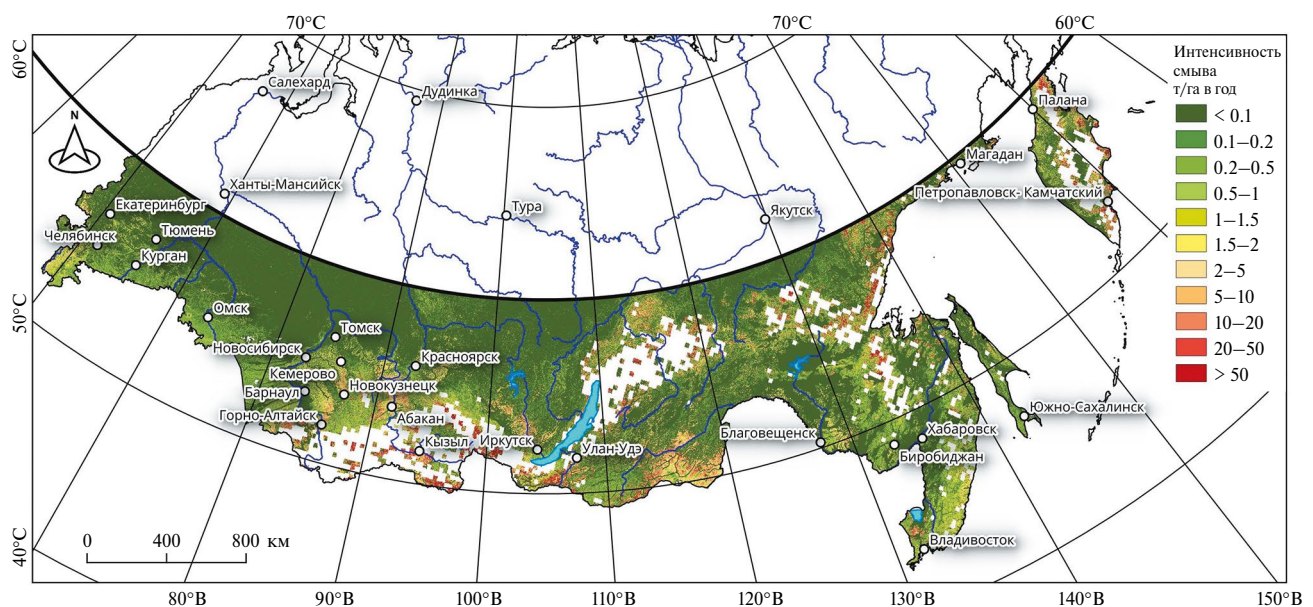


Рис. 3. Пространственное распределение годовой интенсивности смыва почв (среднемноголетней за 2015–2021 гг.) на исследуемой территории, белым цветом обозначена маска горных территорий, где отсутствуют данные SWE.

равен 8.0 т/га в год, а 99%-й 73.8 т/га в год, СКО 23.5 т/га в год. На пахотных землях значения следующие: среднее 1.8 т/га в год, медиана 0.54 т/га в год, 95%-й квантиль равен 6.9 т/га в год, 99%-й 20.3 т/га в год, СКО 8.7 т/га в год. Анализ соотношения между темпами ливневой и талой эрозии почв показал, что интенсивность талой эрозии в среднем по этой территории составляет 16% от годовой интенсивности, причем медиана этой доли меньше 1%. На пашнях интенсивность талой эрозии составляет в среднем 2% от годовой интенсивности, медиана значительно меньше 1%. В целом для всего макрорегиона почвенная эрозия характеризуется низкой интенсивностью.

В настоящее время, как нам представляется, нет и пока не предвидится какого-либо универсального (эталонного) метода, относительно которого можно было бы надежно верифицировать полученные результаты темпов смыва почв на больших территориях. Оценка качества полученных результатов проводилась нами как сравнение с немногочисленными опубликованными данными предшествующих исследований, сопоставимых по времени и основанных на уравнениях USLE/RUSLE. Это данные о темпах смыва с пахотных земель по субъектам РФ на азиатской территории (Литвин и др., 2021), отнесенные авторами к 2012 г. Наша оценка темпов смыва почвы на пашнях в субъектах, как правило, несколько ниже для субъектов с высокими значениями эрозии по Л.Ф. Литвину и несколько выше для тех субъектов, где согласно автору (Литвин и др., 2021) темпы смыва невысоки. При этом ранжирование субъектов по темпам смыва в целом сохраняется. В среднем по территории рассмотренных субъектов темпы смыва с пашни по работе (Литвин и др., 2021) составляют 2.1 т/га в год, наша оценка — 1.3 т/га в год. В работе (Цыпленков и др., 2022; Чалов, 2021) приводится оценка темпов ливневой эрозии в бассейне р. Лены между 55 и 60 широтами — 6.36 т/га в год. Наша оценка на этой территории (среднее значение) — 2.7 т/га в год. Такие различия оценок не выглядят удивительными, если принять во внимание использование в исследованиях разных исходных данных и разных методов для оценки факторов эрозии, различие во временном периоде, но, в первую очередь, различие в пространственной детальности территориальных единиц анализа. С учетом того, что наши оценки сделаны с намного более детальным для макрорегиона пространственным разрешением (100 м) при определении параметров смыва, нам представляется, что они являются более реалистичными.

Все полученные результаты обобщены на бассейны малых рек и размещены на геопортале “Эрозия почв Азиатской части России”¹⁰.

ВЫВОДЫ

Для макрорегиона азиатской части России (южнее 60-й параллели) впервые с высоким пространственным разрешением проведена оценка современной интенсивности почвенной эрозии. Получены величины интенсивности среднемноголетней почвенной эрозии от дождевого и талого стока. Для ливневой эрозии использовалась модель USLE/RUSLE, для оценки талого смыва — методика научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ имени М.В. Ломоносова (модифицированная методика ГГИ). Особое внимание уделено современной оценке динамических параметров эрозионных моделей: фактор растительности (C), эрозионного потенциала дождевых осадков (R) и предвесенних запасов воды в снежном покрове. Для их расчетов разработаны и реализованы новые подходы, включающие анализ и обработку данных ДЗЗ. Исходной геоинформацией для оценки R -фактора являются общедоступные внутрисуточные данные об осадках на метеостанциях Росгидромета и пространственно-распределенные ковариаты, полученные по данным ДЗЗ (SM2RAIN-ASCAT, NASA NEO water vapour-MODIS). Расчеты R -фактора проведены на основе разработанных статистических моделей. Оценка C -фактора выполнена с использованием многовременных данных ДЗЗ (CGLSLC, Fcover, MOD13Q1, MYD13Q1, VNP22Q2), позволяющих с высокой детальностью, как во времени, так и пространстве получать информацию о растительном/земном покрове (о типах покрова, плотности растительности, вегетационных индексах, фенологических метриках). Эта информация дает возможность учесть при расчете C -фактора межгодовую и сезонную изменчивость растительного покрова (севооборот, фазы вегетации). Максимальные (предвесенние) запасы воды в снеге оценены на основе данных продукта CGLS SWE, получаемого по данным ДЗЗ в рамках программы Copernicus.

Результаты оценок факторов и интенсивности эрозии представлены на растрах с разрешением 100 м и обобщены для более чем 100 тыс. бассейнов малых рек. На их основе сформирован комплект тематических карт, который размещен на геопортале с открытым доступом “Эрозия почв Азиатской части России”. Годовая интенсив-

¹⁰ Геопортал “Эрозия почв Азиатской части России”. <https://bassapr.kpfu.ru/> (дата обращения 22.06.2025).

ность эрозии почв определена для всей территории макрорегиона за исключением горных участков, где не представлены данные о запасах воды в снеге. Среднее значение по этой территории — 3.1 т/га в год, при этом медианное среднее — 0.045 т/га в год. На пахотных землях интенсивность эрозии в среднем 1.8 т/га в год, медиана 0.54 т/га в год. Пространственная распределенность темпов смыва почв в макрорегионе весьма неоднородна и, учитывая большую протяженность территории, еще требует дополнительного внимания по выявлению пространственных закономерностей развития почвенной эрозии в этом макрорегионе страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженова О.И., Любцова Е.М., Рыжов Ю.В., Макаров С.А. Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1997. 208 с.
- Баженова О.И. Современная денудация предгорных степных равнин Сибири / науч. ред. В.П. Чичагов. Новосибирск: СО РАН, Академическое изд-во "Гео", 2018. 259 с.
<https://doi.org/10.21782/B978-5-6041445-2-7>
- Баженова О.И., Тюменцева Е.М., Черкашина А.А., Голубцов В.А., Тухта С.А. Почвенные ресурсы юга Сибири // География и природные ресурсы. 2023. № 4. С. 37–45.
- Географический атлас мира / отв. ред. В.И. Юрченко. М.: ГУГК, 1982. 252 с.
- Ермолаев О.П., Мухарамова С.С., Мальцев К.А., Полякова А.Р., Савельев А.А. Факторы эрозии почв в макрорегионе Европейской части России: моделирование, геоинформационное картографирование и пространственный анализ // Почвоведение. 2025. № 2. С. 287–300.
- Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 198 с.
- Лисецкий Ф.Н., Половинко В.В. Эрозионные катены на земляных фортификационных сооружениях // Геоморфология. 2012. № 2. С. 65–78.
- Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
- Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. Дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Академкнига, 2002. 256 с.
- Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г. География динамики земледельческой эрозии почв на Европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
- Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Горобец А.В. География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и дальнего востока // Почвоведение. 2021. № 1. С. 136–148.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2101007X>
- Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология / гл. ред. В.М. Котляков, отв. ред. Г.Ф. Кравченко. М.: Роскартография, 2007. 495 с.
- Танасиенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозионных процессов // Экология. Серия аналит. обзоров мировой лит. 1999. Вып. 55. С. 1–91.
- Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 349 с.
- Цыпенков А.С., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. Водная эрозия почв в бассейнах крупнейших рек Сибири // Изв. РГО. 2022. Т. 154. № 5–6. С. 86–111.
- Чалов Р.С., Сидорчук А.Ю., Голосов В.Н. Эрозионно-руслловые системы. М.: ИНФРА-М, 2017. 698 с.
- Чалов С.Р. Речные наносы в эрозионно-руслловых системах. Дис. ... д-ра геогр. наук. М.: МГУ, 2021. 358 с.
<https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2>
- Bazhenova O.I., Cherkashina A.A., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A., Sorokovikova L.M. Ecological consequences of soil degradation and water pollution in the Asian part of Russia (Siberia) / Global Degradation of Soil and Water Resources. Beijing: Springer, 2022a. P. 594–616.
<https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2>
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A. Soil erosion on the agricultural lands of the Asian part of Russia (Siberia): Processes, intensity and areal distribution / Global Degradation of Soil and Water Resources. Beijing: Springer, 2022b. P. 566–593.
<https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2>
- 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.V., Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // Nat. Commun. 2017. Vol. 8. Art. 2013.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 780. Art. 146494.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V. Changes in the Regime of Erosive Precipitation on the European Part of Russia for the Period 1966–2020 // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12. № 7. 279 p.
<https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>
- Das S., Jain M.K., Gupta V., et al. GloRESatE: A dataset for global rainfall erosivity derived from multi-source data // Sci. Data. 2024. Vol. 11. Art. 926.
<https://doi.org/10.1038/s41597-024-03756-5>
- Desmet P.J.J., Govers G.A. GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units // JSWC. 1996. Vol. 51. № 5. P. 427–433.
- Golosov V.N., Collins A.L., Dobrovolskaya N.G., Bazhenova O.I., Ryzhov Yu.V., Sidorchuk A.Y. Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture // Geoderma. 2021. Vol. 381. Art. 114678.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678>

- Hastie T., Tibshirani R. Generalized Additive Models // Statist. Sci. 1986. Vol. 1. № 3. P. 297–310.
https://doi.org/10.1214/ss/1177013604
- Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9. № 8. P. 1735–1780.
- Ivanov M.A., Mukharamova S.S., Yermolaev O.P. Mapping croplands with a long history of crop cultivation using time series of Modis vegetation indices // Uchenye Zapiski Kazanskogo Univ. Ser. Estestvennye Nauki. 2021. Vol. 162. № 2. P. 302–313.
https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.302-313
- Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines // IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics. 1997. Vol. 3. № 3. P. 228–244.
https://doi.org/10.1109/2945.620490
- Matthews F., Borrelli P., Panagos P., Bezak N. Dynamic assessment of rainfall erosivity in Europe: evaluation of EURADCLIM ground-radar data // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2025. (In press).
https://doi.org/10.5194/hess-2024-402
- Moore I.D., Nieber J.L. Landscape Assessment of Soil Erosion and Nonpoint Source Pollution // JMAS. 1989. Vol. 55. № 1. P. 18–25.
- Mukharamova S., Saveliev A., Ivanov M., Gafurov A., Yermolaev O. Estimating the Soil Erosion Cover-Management Factor at the European Part of Russia // IJGI. 2021. Vol. 10. № Art. 645.
https://doi.org/10.3390/ijgi10100645
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., et al. Rainfall erosivity in Europe // Sci. Total Environ. 2015. Vol. 511. P. 801–814.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell Ch., Lugato E., Montanarella L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale // Land Use Policy. 2015. Vol. 48. P. 38–50.
http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021
- Panagos P., Borrelli P., Spinoni J., et al. Monthly Rainfall Erosivity: Conversion Factors for Different Time Resolutions and Regional Assessments // Water. 2016. Vol. 8. № 4. Art. 119.
https://doi.org/10.3390/w8040119
- Panagos P., Hengl T., Wheeler I., et al. Global rainfall erosivity database (GloREDA) and monthly R-factor data at 1 km spatial resolution // Data in Brief. 2023. Vol. 50. Art. 109482.
https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109482
- 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). U.S. Department of Agriculture, 1997. 403 p.
- Renard K.G., Yoder D.C., Lightle D.T., Dabney S.M. Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. In: Handbook of Erosion Modelling / R.P.C. Morgan, M.A. Nearing (Eds.). Wiley, 2011. P. 137–167.
https://doi.org/10.1002/9781444328455.ch8
- van Rossum G., Drake F.L. Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. 242 p.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: US Gov. Print. Office, 1978. 537 p.
- Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R., Yamaguchi T., O'Loughlin F., Neal J.C., Sampson C.C., et al. A high-accuracy map of global terrain elevations // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. № 11. P. 5844–5853.
https://doi.org/10.1002/2017GL072874

Soil Erosion Factors in Basin Geosystems of the Asian Part of Russia

O. P. Yermolaev^a, S. S. Mukharamova^a, A. R. Polyakova^{a, *}, and A. A. Saveliev^a

^aKazan Federal University, Kazan, Russia

*e-mail: zakieva.alika@mail.ru

A quantitative assessment of soil erosion factors and intensity was carried out for the Asian Russia over the 2015–2021 period, with a spatial resolution of 100 meters. The results were subsequently generalized to small river basins. Rainfall erosion was evaluated using the USLE/RUSLE model. Melt runoff was assessed using the methodology of the Soil Erosion and Fluvial Processes Research Laboratory at Moscow State University. New approaches to estimating the erosion factor were implemented for the first time in this macroregion: the erosive potential of rainfall (R-factor) and the vegetation cover factor (C-factor). The R-factor was estimated based on developed statistical models utilizing intra-day precipitation data collected by Roshydromet meteorological stations, as well as spatial covariates derived from remote sensing data. The C-factor was calculated monthly using multi-temporal remote sensing data providing information on land cover types, vegetation density, spectral vegetation indices, and phenological metrics (products from CGLSLC, Fcover, MOD13Q1, MYD13Q1, and VNP22Q2). This is the first time that a modern estimate of the snowmelt erosion factor—the maximum (pre-spring) water reserves in snow—has been obtained in this macroregion. This assessment used the CGLS SWE satellite product, which is derived from remote sensing data. The annual soil erosion intensity across the entire macroregion averaged 3.1 t per ha per year, with a median of 0.045 t per ha per year. On the limited arable lands within the region, erosion rates averaged 1.8 t per ha per year, with a median of 0.54 t per ha per year.

Keywords: snow water equivalent, erodibility, rain runoff, melt runoff, USLE/RUSLE, C-factor, R-factor, remote sensing

REFERENCES

- Bazhenova O.I. *Sovremennaya denudatsiya predgornyykh stepnykh ravnin Sibiri* [Modern Denudation of the Foothill Steppe Plains of Siberia]. Chichagov V.P., Ed. Novosibirsk: Akadem. Izd-vo "Geo", 2018. 259 p. <https://doi.org/10.21782/B978-5-6041445-2-7>
- Bazhenova O.I., Lyubtsova E.M., Ryzhov Yu.V., Makarov S.A. *Prostranstvenno-vremennoi analiz dinamiki erozionnykh protsessov na yuge Vostochnoi Sibiri* [Spatio-Temporal Analysis of the Dynamics of Erosion Processes in the South of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1997. 202 p.
- Bazhenova O.I., Cherkashina A.A., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A., Sorokovikova L.M. Ecological consequences of soil degradation and water pollution in the Asian part of Russia (Siberia). In *Global degradation of soil and water resources*. Li R., Napier T.L., El-Swaify S.A., Sabir M., Rienzi E., Eds. Beijing: Springer, 2022a, pp. 594–616. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2>
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A. Soil erosion on the agricultural lands of the Asian part of Russia (Siberia): Processes, intensity and areal distribution. In *Global degradation of soil and water resources*. Li R., Napier T.L., El-Swaify S.A., Sabir M., Rienzi E., Eds. Beijing: Springer, 2022b, pp. 566–593. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2>
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Cherkashina A.A., Golubtsov V.A., Tuhta S.A. Soil resources of southern Siberia. *Geogr. Nat. Resour.*, 2023, vol. 44, pp. 325–332. <https://doi.org/10.1134/S1875372823040030>
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8, art. 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 780, art. 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Chalov S.R. River sediments in erosion-channel systems. *Dr. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2021. 358 p.
- Chizhikova N.A., Yermolaev O.P., Golosov V.N. Changes in the Regime of Erosive Precipitation on the European Part of Russia for the Period 1966–2020. *Geosci.*, 2022, vol. 12, no. 7, art. 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>
- Das S., Jain M.K., Gupta V. et al. GloRESatE: A dataset for global rainfall erosivity derived from multi-source data. *Sci. Data*, 2024, vol. 11, art. 926. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03756-5>
- Desmet P.J.J., Govers G.A. GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *JSWC*, 1996, vol. 51, no. 5, pp. 427–433.
- Eroziionno-ruslovyie sistemy* [Erosion-Channel Systems]. Chalov S.R., Sidorchuk A.Yu., Golosov V.N., Eds. Moscow: INFRA-M Publ., 2017. 695 p.
- Geograficheskii atlas mira* [Geographical Atlas of the World]. Yurchenko V.I., Ed. Moscow: GUGK Publ., 1982. 252 p.
- Golosov V.N., Collins A.L., Dobrovolskaya N.G., Bazhenova O.I. et al. Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture. *Geoderma*, 2021, vol. 381, art. 114678. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678>
- Hastie T., Tibshirani R. Generalized additive models. *Statist. Sci.*, 1986, vol. 1, no. 3, pp. 297–310. <https://doi.org/10.1214/ss/1177013604>
- Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural. Comput.*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780.
- Ivanov M.A., Mukharamova S.S., Ermolaev O.P. Mapping croplands with a long history of crop cultivation using time series of Modis vegetation indices. *Uch. Zap. Kazan. Univ., Ser. Estestv. Nauki*, 2021, vol. 162, no. 2, pp. 302–313. (In Russ.). <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.302-313>
- Khmelev V.A., Tanasienko A.A. *Zemel'nye resursy Novosibirskoi oblasti i puti ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Land Resources of the Novosibirsk Region and Ways of Their Rational Use]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009. 349 p.
- Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki* [Soil Erosion and Deflation: Basic Patterns and Quantitative Assessments]. Moscow: Izd-vo MGU, 1993. 198 p.
- Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines. *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics*, 1997, vol. 3, no. 3, pp. 228–244. <https://doi.org/10.1109/2945.620490>
- Lisetskii F.N., Polovinko V.V. Erosion catenas on earthen fortifications. *Geomorfol.*, 2012, vol. 2, pp. 65–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2012-2-65-77>
- Lisetskii F.N., Svetlitchnyi A.A., Chornyi S.G. *Sovremennye problemy eroziovedeniya* [Recent Developments in Erosion Science]. Belgorod: Konstanta Publ., 2012. 456 p. <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>
- Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii* [Geography of Soil Erosion in Agricultural Lands In Russia]. Moscow: Akademkniga Publ., 2002. 255 p.
- Litvin L.F., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Dobrovolskaya N.G. Dynamics of agricultural soil erosion in European Russia. *Eurasian Soil Sci.*, 2017, vol. 11, pp. 1343–1352. <https://doi.org/10.1134/S1064229317110084>

- Litvin L.F., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Dobrovolskaya N.G., Gorobets A.V. Dynamics of agricultural soil erosion in Siberia and Far East. *Eurasian Soil Sci.*, 2021, vol. 54, pp. 150–160.
<https://doi.org/10.1134/S1064229321010075>
- Matthews F., Borrelli P., Panagos P., Bezak N. Dynamic assessment of rainfall erosivity in Europe: evaluation of EURADCLIM ground-radar data. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2025. (In press).
<https://doi.org/10.5194/hess-2024-402>
- Moore I.D., Nieber J.L. Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution. *JMAS*, 1989, vol. 55, no. 1, pp. 18–25.
- Mukharamova S.S., Saveliev A.A., Ivanov M.A., Gafurov A.M., Yermolaev O.P. Estimating the Soil Erosion Cover-Management Factor at the European Part of Russia. *IJGI*, 2021, vol. 10, no. 10, art. 645.
<https://doi.org/10.3390/ijgi10100645>
- Natsional'nyi atlas Rossii. Tom. 2. Priroda. Ekologiya* [National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology]. Kotlyakov V.M., Kravchenko G.F., Eds. Moscow: Roskartografiya Publ., 2007. 495 p.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P. et al. Rainfall erosivity in Europe. *Sci. Total Environ.*, 2015a, vol. 511, pp. 801–814.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell Ch., Lugato E., Montanarella L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 2015b, vol. 48, pp. 38–50.
<http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Panagos P., Borrelli P., Spinoni J. et al. Monthly rainfall erosivity: Conversion factors for different time resolutions and regional assessments. *Water*, 2016, vol. 8, no. 4, art. 119.
<https://doi.org/10.3390/w8040119>
- Panagos P., Hengl T., Wheeler I. et al. Global rainfall erosivity database (GloREDa) and monthly R-factor data at 1 km spatial resolution. *Data Brief*, 2023, vol. 50, art. 109482.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109482>
- 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)*. Handbook No. 703. U.S. Department of Agriculture, 1997. 384 p.
- Renard K.G., Yoder D.C., Lightle D.T., Dabney S.M. Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. In *Handbook of Erosion Modelling*. Morgan R.P.C., Nearing M.A., Eds. Wiley, 2011, pp. 137–167.
<https://doi.org/10.1002/9781444328455.ch8>
- Tanasienko A.A., Putilin A.F., Artamonova V.S. Ecological aspects of erosion processes. *Ekol., Ser. Analit. Obzor. Mir. Lit.*, 1999, no. 55, pp. 1–91. (In Russ.).
- Tsyplenkov A.S., Chalov S.R., Shinkareva G.L. Water erosion of soils in the basins of the largest rivers of Siberia. *Izv. RGO*, 2022, vol. 154, no. 5–6, pp. 86–111. (In Russ.).
- van Rossum G., Drake F.L. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, California: CreateSpace, 2009. 242 p.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Washington: US Gov. Print. Office, 1978. 537 p.
- Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R., Yamaguchi T. et al. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, no. 11, pp. 5844–5853.
<https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A., Polyakova A.R., Saveliev A.A. Soil Erosion Factors in the European Russia Macroregion: Modeling, Geo-information Mapping, and Spatial Analysis. *Eurasian Soil Sci.*, 2025, vol. 58, art. 30.
<https://doi.org/10.1134/S1064229324603561>