

УДК 551.4.042
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-538-554
EDN FJMKEO

Оценка эрозионного потенциала осадков для азиатской части России

Полякова А.Р., Мухарамова С.С., Ермолаев О.П., Савельев А.А.

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлёвская, 18

zakieva.alika@mail.ru, smukhara@gmail.com, oyermol57@mail.ru, anatology.saveliev.aka.saa@gmail.com

Аннотация. Эрозионный потенциал осадков (R -фактор) является одним из ключевых параметров в эрозионных моделях *USLE/RUSLE*, определяя интенсивность дождевого (ливневого) смыва почв. Его количественная оценка затруднена по причине отсутствия массового количественного материала по интенсивности осадков на метеостанциях, особенно это характерно для территории азиатской части России на фоне происходящих климатических изменений. Исследования направлены на разработку методики расчета R -фактора для азиатского макрорегиона России на основе данных срочных наблюдений за осадками. В основе методологии лежит комбинация расчетов эрозионной активности дождевых событий (R_s) по данным автоматических метеостанций с 10-минутным разрешением и применения обобщенно-аддитивных моделей (*GAM*) для прогнозирования R_s на метеостанциях Росгидромета. Разработанная *GAM*-модель объясняет 94,6 % изменчивости логарифма R_s и позволяет восстановить временные ряды R -фактора с 1966 по 2021 гг. для 328 метеостанций этого макрорегиона страны. Установлено, что среднемноголетние значения R -фактора за период 1966–1985 гг. хорошо согласуются с ранее полученными референсными данными Г.А. Ларионова. Анализ временной динамики на 85 % метеостанций не выявил статистически значимых трендов R -фактора за выбранный 56-летний период по всему макрорегиону, а наблюдаемые изменения не превышают 1 % от средних значений. Разработанная методика позволяет получать современные помесечные и годовые оценки R -фактора на метеостанциях для всех лет наблюдений, а также выполнять среднемноголетние обобщения за заданный период.

Ключевые слова: метеостанции, плювиограммы, эрозионная активность дождей, временная динамика, *USLE/RUSLE*, *GAM*-модель, эрозия почв, ливневой смыв

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания КФУ (проект № FZSM-2026-0017).

Для цитирования: Полякова А.Р., Мухарамова С.С., Ермолаев О.П., Савельев А.А. 2026. Оценка эрозионного потенциала осадков для азиатской части России. Региональные геосистемы, 50(3): 538–554. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-538-554 EDN: FJMKEO

Estimation of the R-Factor for the Asian Part of Russia

Alika R. Polyakova, Svetlana S. Mukharamova, Oleg P. Yermolaev, Anatoly A. Saveliev

Kazan (Volga Region) Federal University

18 Kremlyovskaya St., Kazan 420008, Russia

zakieva.alika@mail.ru, smukhara@gmail.com, oyermol57@mail.ru, anatology.saveliev.aka.saa@gmail.com

Abstract. Rainfall erosivity (R -factor) is one of the key parameters in the *USLE/RUSLE* erosion models, determining the intensity of rainfall (storm) soil erosion. Its quantitative assessment is hampered by the lack of extensive quantitative data on rainfall intensity at weather stations, which is particularly

© Полякова А.Р., Мухарамова С.С., Ермолаев О.П., Савельев А.А., 2026

characteristic of the Asian part of Russia against the background of ongoing climate change. The research aims to develop a methodology for calculating the *R*-factor for the Asian macro-region of Russia using sub-daily precipitation observation data. The methodology combines the calculation of rain event erosivity (*Rs*) from automatic weather stations with 10-minute resolution and the application of Generalized Additive Models (*GAM*) to predict *Rs* at Roshydromet weather stations. The developed *GAM* model explains 94.6 % of the log-*Rs* variability and allows reconstructing *R*-factor time series for 328 weather stations in this macro-region from 1966 to 2021. It was found that the long-term average *R*-factor values for the period 1966–1985 are in good agreement with the reference data previously obtained by G.A. Larionov. Trend analysis for 85 % of the stations showed no statistically significant trends in the *R*-factor over the selected 56-year period across the entire macro-region, and the observed changes do not exceed 1 % of the mean values. The developed methodology makes it possible to obtain current monthly and annual *R*-factor estimates at weather stations for all years of observations, as well as to perform long-term averaging for any given period.

Keywords: weather stations, pluviograms, rainfall erosivity, temporal dynamics, *USLE/RUSLE*, *GAM* model, soil erosion, rainstorm erosion

Acknowledgements: The study was financially supported by the state assignment of Kazan Federal University (project No. FZSM-2026-0017)

For citation: Polyakova A.R., Mukharamova S.S., Yermolaev O.P., Saveliev A.A. 2026. Estimation of the *R*-Factor for the Asian Part of Russia. *Regional Geosystems*, 50(3): 538–554 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-538-554 EDN: FJMKEO

Введение

Эрозия почв в условиях гумидного климата – один ведущих экзогеодинамических процессов, ведущих к деградации почв и снижению почвенного плодородия. На этот процесс приходится 84 % глобальной деградации земель [Реппock, 2019]. Нарушение верхнего плодородного слоя почв является одной из глобальных мировых проблем, главным образом влияющей на продовольственную безопасность населения Земли. По разным оценкам, эрозия почв затрагивает около $2,9 \times 10^6$ км² суши планеты [Borrelli et al., 2017; Vousdoukas et al., 2020; Wen et al., 2023], снижая урожайность сельскохозяйственных культур на $7,5 \times 10^4$ млн т. Почва хоть и считается возобновляемым ресурсом, но «восстановить естественную, первозданную почву невозможно, так как она сформировалась в условиях уже неповторимых» и «почва – это особый природный ресурс: он и невозобновляемый, и в то же время при правильном использовании – неисчерпаемый» [Заславский, 1979].

Локальные оценки интенсивности почвенной эрозии проводят на стоковых станциях, а также с использованием разнообразных методов полевых экспериментов (шпильки, замер объема струйчатых размывов, микропрофилирование, короткодистанционная стереофотметрическая съемка, радиоизотопов, коррелятных отложений, лазерного сканирования и пр.) [Егоров, 2009; Yermolaev et al., 2018]. В начале прошлого столетия в США негативными последствиями от сдачи земель фермерам в аренду стали катастрофические эрозионные потери почвы и ее плодородия. Эта природная катастрофа в определенной степени способствовала тому, что в середине прошлого века было разработано универсальное уравнение эрозии почв (*USLE – Universal Soil Loss Equation*), ставшее удобным рабочим инструментом для специалистов по охране почв, позволяющее провести оценку интенсивности почвенной эрозии от дождевых осадков. Уравнение впервые было опубликовано в 1965 г. [Wischmeier, Smith, 1965]. «Универсальность» модели *USLE* отличает ее от предшествующих ей региональных моделей. Со временем модель *USLE* модифицировалась, были внесены дополнительные ограничения и обновления в расчеты факторов, в результате чего разработаны ее усовершенствованные версии – модели

RUSLE [Renard, 1997], *RUSLE2* [Revised..., 2013], *MUSLE* [Williams, 1975], *USPED* [Mitasova et al., 1996], *SEDEM* [Van Rompaey et al., 2001]. Наиболее полный обзор количественных моделей эрозии почв представлен в ряде отечественных работ [Литвин, 2002; Лисецкий и др., 2012; Эрозионно-русловые системы, 2017]. Что касается непосредственно территории азиатской части России (АЧР), то проблемы эрозии почв Сибири и Дальнего Востока изучаются в нашей стране в таких научных учреждениях, как Институт почвоведения и агрохимии СО РАН [Танасиенко и др., 2021], МГУ им. М.В. Ломоносова [Литвин и др., 2021], Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН [Баженова и др., 2023] и другими. Так Л.Ф. Литвиным [2021] в 2021 году проанализирована земледельческая эрозия почв по субъектам АЧР, а в статье А.А. Танасиенко с соавторами [2021] описано исследование влияния режима осадков на эрозионные процессы в Кузнецкой котловине, Приобье и Салаире. В одной из последних фундаментальных работ, посвященной мировой деградации почв [Li et al., 2022], две главы по эрозии почв на юге Сибири написаны отечественными учеными [Bazhenova et al., 2022a; 2022b].

В спектре параметров модели *USLE/RUSLE* особого внимания заслуживает *R*-фактор (или эрозионный потенциал осадков). Он выражает способность дождей вызывать эрозию почвы через совокупный потенциальный эффект от удара капель дождя и турбулентности стока при транспортировке отдельных частиц. Именно дожди высокой интенсивности формируют склоновый поверхностный сток, являющийся движущей силой эрозии, и оказывают прямое воздействие на отрыв частиц почвы [Panagos et al., 2015]. Согласно модели *USLE/RUSLE* *R*-фактор определяется как сумма эрозионной активности отдельных дождей (R_S), выпавших за заданный период (месяц, год). Эрозионная активность отдельного дождя, в свою очередь, определяется как произведение кинетической энергии дождя и его максимальной 30-минутной интенсивности ($R_S = E \times I_{30}$). Л.Ф. Литвин [2002] в своей работе обосновывает принципиальную возможность использования *R*-фактора в эрозионных моделях в условиях России, что подтверждается сравнением распределения величин $E \times I_{30}$ отдельных ливней для ряда метеостанций США и России. В более ранних работах М.Н. Заславского [1979] и Г.А. Ларионова [1993] также подтверждается возможность применения показателя $E \times I_{30}$ для расчета *R*-фактора как на территории России, так и в пределах бывшего СССР.

Для корректного расчета эрозионной активности осадков в конкретной локации (как правило на метеостанции) требуются данные наблюдений за дождевыми осадками с высоким временным разрешением и на протяжении теплого периода года в течение нескольких лет. Это либо данные плувиографа (гитографа) – самопишущего прибора для непрерывной регистрации количества жидких атмосферных осадков, их интенсивности и времени выпадения, либо данные дождемеров – приборов, регистрирующих осадки через короткие промежутки времени (1–30 мин). Лишь несколько исследований в национальном/региональном масштабе в Европе определяли *R*-фактор непосредственно по данным с высоким временным разрешением, в том числе исследования, проведенные в Словении [Petan et al., 2010], Швейцарии [Meusburger et al., 2012], на водосборе Эбро в Испании [Angulo-Martínez, Beguería, 2009], Чешской Республике [Janeček et al., 2013], Греции [Panagos et al., 2016], Италии [Borrelli et al., 2016], одной из федеральных земель Германии – Северном Рейне-Вестфалии [Fiener et al., 2013]. Для территории бывшего СССР расчеты среднесноголетнего *R*-фактора по данным с высоким временным разрешением были выполнены на 660 метеостанциях по 20-летним рядам плувиографических наблюдений 1960–1980-х годов [Ларионов, 1993]. По этим результатам методом изолиний построена карта ЭПО (*R*-фактора) на территорию бывшего СССР в масштабе 1 : 8 000 000, опубликованная в работах [Заславский, 1979; Ларионов, 1993]. Наиболее значительным современным проектом с использованием данных с высоким временным разрешением (от 5 до 60 минут) является исследование Р. Panagos с соавторами [2023], результатом которого стала глобальная база данных *GloREDa* v.1.2, содержащая оценки *R*-фактора на 3939 станциях мира, а также

глобальная карта R -фактора с пространственным разрешением 1 км, полученная интерполяцией методом регрессии (с ковариатами) на основе гауссовских процессов. При этом необходимо отметить, что данные о R -факторе на 217 российских метеостанциях, присутствующие в *GloREDa* v.1.2, также основаны на наблюдениях полувековой давности – 1960–1980-х годов (т.е. не являются современными).

Количество регистрирующих датчиков дождя с высоким временным разрешением невелико, такие полевые измерения дороги, они как правило отсутствуют в открытом доступе, их сложно получить в большом масштабе, а в пространстве они распределены крайне неравномерно, при этом часто имеют короткие периоды наблюдения. Поэтому для исследований регионального и глобального уровня используют методы приближенной оценки R -фактора по более доступным данным об осадках с грубым временным разрешением – суточным, месячным или годовым [Renard, Freimund, 1994; Diodato, Bellocchi, 2007; Angulo-Martínez, Beguería, 2009; Bonilla, Vidal, 2011; Panagos et al., 2012; Panagos et al., 2015; Xie et al., 2016]. Здесь как правило, связь между R и количеством осадков описывается степенной зависимостью [Richardson et al., 1983], а при наличии суточных или месячных данных о дождевых осадках в модель иногда включают синусоидальную функцию, отражающую годовой цикл параметров степенного закона [Yu, 1998; Yu et al., 2001; Capolongo et al., 2008; Angulo-Martínez, Beguería, 2009; Xie et al., 2016]. Такие аппроксимирующие уравнения обычно разрабатываются для конкретных регионов и плохо применимы в других условиях. Кроме этого, они не могут отразить влияние на R экстремальных событий – наиболее эрозионно-опасных ливней высокой интенсивности, т.е. доли осадков высокой интенсивности при одной и той же сумме осадков.

В данном исследовании излагается разработанная коллективом авторов методика, позволяющая получать современные помесечные и годовые оценки R -фактора на метеостанциях для всех лет наблюдений, а также выполнять среднемноголетние обобщения за заданный период. Моделирование пространственного распределения R -фактора и пространственный анализ полученных результатов будут рассмотрены в отдельной публикации. В частности, современная оценка R -фактора для территории Европейской части России за период 2015–2021 гг. выполнена коллективом авторов и опубликована на геопортале «Речные бассейны Европейской России» [Ермолаев и др., 2025a]. Актуальность получения современной оценки R -фактора для АЧР подтверждается происходящими с беспрецедентной скоростью за последние десятилетия климатическими изменениями [Masson-Delmotte et al., 2021; Переведенцев и др., 2024], приводящими в том числе и к изменению режима осадков, способных вызвать эрозионные процессы [Zolina, 2011; Chizhikova et al., 2022]. Предлагаемый нами подход развивает метод приближенной оценки R -фактора, который основан на создании эмпирической модели и использовании внутри-суточных данных об осадках. Такие данные могут предоставить больше информации об экстремальных осадках и быть лучшей альтернативой для оценки R по сравнению с годовыми, месячными и суточными данными. Решение этой задачи также позволяет определить современные темпы почвенной эрозии на пространствах АЧР.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является эрозионный потенциал дождевых осадков – R -фактор. Регион исследования – материковое пространство азиатской части России. Протяженность этого макрорегиона страны с запада на восток составляет порядка 6 тыс. км, а общая площадь около 12,8 млн км², включая Западно-Сибирский (2,46 млн км²), Восточно-Сибирский (4,16 млн км²) и Дальневосточный (6,17 млн км²) регионы. В силу своего географического положения и огромной площади для него характерно высокое ландшафтное разнообразие: от арктических тундр и пустынь на севере до типичных степей на юге. Рельеф также очень контрастный и характеризуется сочетанием обширных

равнинных территорий на севере и западе, высоких плато в центральной части и горных систем на юге Сибири и Дальнего Востока. Сельскохозяйственная освоенность региона слабая: пашнями занято только 25,4 млн га в Сибири и 2,3 млн га на юге Дальнего Востока.

Климат отличается большим разнообразием: от резко континентального на западе до муссонного на востоке. Режим увлажнения отличается высокой пространственной контрастностью и выраженной сезонностью. Годовые суммы осадков варьируют от 100–200 мм в арктических и субарктических районах до 600–800 мм в горах Южной Сибири и на юге Дальнего Востока, где в Приморье они могут достигать 800 мм [Бикбулатова, 2011]. На большей части региона до 70–95 % годовой суммы осадков выпадает в теплый период, причем в Западной Сибири максимум приходится на июль–август [Бикбулатова, 2011], а в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке осадки второй половины лета носят преимущественно ливневой характер [Bazhenova et al., 2022a]. Интенсивность ливней на Дальнем Востоке может достигать 150–250 мм/сутки [Бикбулатова, 2011]. Многолетняя динамика осадков также характеризуется пространственной неоднородностью. Для АЧР в целом за период 1975–2005 гг. отмечалась незначимая тенденция к снижению годовых сумм осадков (в среднем – 5 мм/10 лет), однако в теплый период в отдельных районах Средней Сибири наблюдался слабый рост [Логоинов, 2012]. В современный период (1991–2020 гг.) увеличение летних сумм осадков фиксируется в Западной Сибири и на побережье Охотского моря, тогда как на юге Восточной Сибири наблюдается их уменьшение [Алешина, Семенов, 2022].

Разработанный и примененный нами метод оценки R -фактора основан на использовании двух категорий данных о дождевых осадках: 1) набора данных с высоким временным разрешением, полученных на ограниченном числе автоматических метеостанций, не входящих в сеть Росгидромета; 2) данных на метеостанциях Росгидромета, где проводятся внутри-суточные (срочные) наблюдения за осадками. Метод реализуется в три этапа.

На первом этапе по доступным данным автоматических метеостанций с высоким временным разрешением [Ермолаев и др., 2025б] по методологии *USLE/RUSLE* рассчитывалась эрозионная активность (R_s) каждого из наблюдаемых дождей. Согласно *USLE/RUSLE*, дождевое событие определяется как осадки, разделенные более чем 6 часовым сухим интервалом – величины, принятой в *USLE* [Wischmeier, Smith, 1965; 1978] и *RUSLE2* [Revised Universal..., 2013] в качестве минимального меж-дождевого времени. Эрозионно-опасным считается ливень с общим количеством осадков не менее 12,7 мм или с максимальной 15-минутной интенсивностью, превышающей 25,4 мм/ч [Wischmeier, Smith, 1978]. В зависимости от региональных климатических и почвенных условий применяются различные пороговые значения как для суммарного слоя осадков, так и для их интенсивности [Renard, 1997; Yu, 1999; Литвин, 2002]. Дискуссионным остается и вопрос о целесообразности включения в анализ всех без исключения ливневых событий [Yin et al., 2017]. В настоящей работе при расчете эрозионного потенциала учитывались ливни со слоем осадков более 10 мм. Применимость данного порога для условий Северной Евразии была обоснована Л.Ф. Литвиным [2002]. Ввиду отсутствия региональных исследований, обосновывающих пороговые значения непосредственно для азиатской части России, использование этого апробированного подхода представляется методически оправданным.

Эрозионная активность отдельного ливневого (дождевого) события R_s (МДж мм ч⁻¹ га⁻¹) рассчитывалась по методологии *USLE/RUSLE* как:

$$R_s = E \times I_{30},$$

где I_{30} (мм ч⁻¹) – средняя интенсивность за 30 минут непрерывного дождя с наибольшим количеством осадков (максимальная 30-ти минутная интенсивность), E (МДж га⁻¹) – энергия дождя, которая определяется как интеграл по времени (D – продолжительность

дождя, час) от произведения удельной кинетической энергии дождя (e , МДж мм⁻¹ га⁻¹) на его мгновенную интенсивность (i , мм час⁻¹):

$$E = \int_0^D e \times i \, dt$$

и аппроксимируется как:

$$E \approx \sum_{k=1}^m e_k \times \Delta V_k$$

k – индекс для интервалов во время дождя, где интенсивность осадков считается постоянной, m – количество таких интервалов, ΔV_k (мм) – количество (слой) осадков в k -м интервале, e_k (МДж мм⁻¹ га⁻¹) – удельная энергия (энергия на единицу площади и на единицу слоя осадков) в k -м интервале, которую вычисляют как [Revised Universal..., 2013]:

$$e_k = 0,29(1 - 0,72 \exp(-0,082i_k))$$

i_k (мм ч⁻¹) – интенсивность осадков для k -го интервала дождя.

На втором этапе на основе полученной выборки значений эрозионной активности (R_s) наблюдаемых дождей моделировалась статистическая зависимость R_s от внешних факторов (характеристик дождя, места и времени его выпадения). С этой целью был применен метод обобщенно-аддитивных моделей (GAM) [Hastie, Tibshirani, 1986]. Данный метод позволяет описывать нелинейные зависимости между откликом и предикторами с помощью сплайнов. GAM-модель в нашем случае представляла собой сумму сглаживающих функций ($f_i(x_i)$) от потенциальных предикторов с логарифмической функцией связи:

$$\ln(R_s) = a_0 + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n) + \varepsilon,$$

где a – свободный член, $f(x)$ – непараметрическая гладкая функция (сплайн), ε – случайная ошибка. В конечном варианте степень нелинейности сплайнов выбиралась на основе (обобщенной) перекрестной проверки, чтобы обеспечить оптимальное качество прогноза.

На третьем этапе выполнялась искомая оценка R -фактора на метеостанциях, обеспеченных внутри-суточными данными об осадках. Для этого предварительно на каждой метеостанции за весь период наблюдений выделялись так называемые «модельные» дожди – непрерывные последовательности сроков наблюдений, в каждом из которых зафиксированы дождевые осадки. Для каждого эрозионно-опасного «модельного» дождя (со слоем осадков >10 мм) с помощью построенной GAM-модели рассчитывалась прогнозная оценка его эрозионной активности R_s на основе значений предикторов модели. Годовые значения R -фактора для каждой станции рассчитывались как сумма R_s всех эрозионных «модельных» дождей за соответствующий год для всех лет наблюдений.

Результаты и их обсуждение

В качестве набора данных об осадках с высоким временным разрешением в работе использованы данные, полученные (с шагом по времени 10 мин) на автоматических метеостанциях, не входящих в сеть Росгидромета (предоставлены производителем контрольно-измерительных устройств для метеомониторинга). На их основе выделены 3747 дождевых событий, наблюдаемых на АЧР в 64-х локациях в 2017–2022 гг. Каждый из этих дождей представлен аппроксимацией своей «плювиограммы» (с шагом 10 мин) (примеры на рис. 1), что позволило рассчитать характеристики этих дождей: максимальную 30-ти минутную интенсивность (I_{30}) и энергию дождя (E) и, в итоге, его эрозионную активность R_s по формулам USLE/RUSLE. Статистическое изучение полученной выборки R_s показало наилучшее соответствие эмпирических данных логнормальному распределению, что согласуется с выводами других авторов о применимости данного распределения для описания экстремальных осадков [Papalexiou et

al., 2013]. Логнормальное распределение способно адекватно описывать область больших значений, которые вносят определяющий вклад в годовой эрозионный потенциал осадков, несмотря на редкую повторяемость сильных ливней.

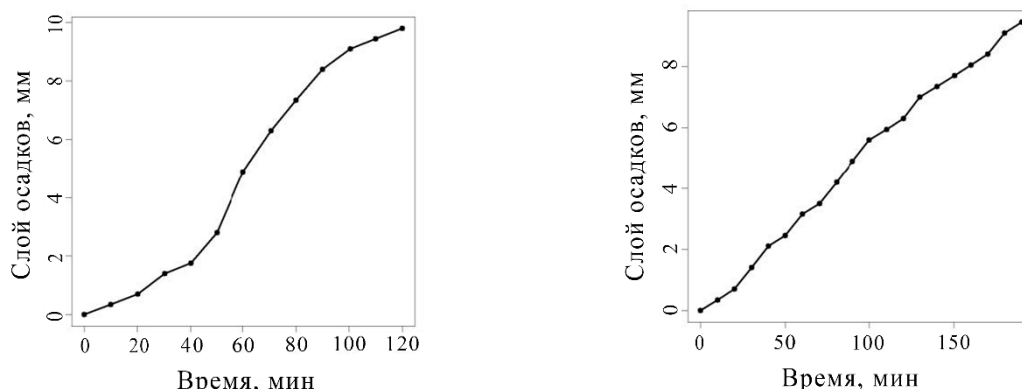


Рис. 1. Примеры «плювиограмм» двух дождевых событий
Fig. 1. Examples of «pluviograms» of two rainfall events

Кроме этого, для каждого из 3747 дождей рассчитана сумма выпавших осадков (*SumPrec*) для анализа этой характеристики как потенциального предиктора эрозионной активности дождя, который может быть использован впоследствии для прогнозной оценки *Rs* «модельных» дождей на метеостанциях с внутри-суточными данными об осадках.

Построенная на базе полученной выборки GAM-модель зависимости эрозионной активности отдельного дождя от внешних факторов для логнормального распределения с фиксированной дисперсией имеет следующий вид:

$$\ln(Rs) = a_0 + a_1 \times H + f_1(Lon, Lat) + f_2(DoY) + f_3(\log(SumPrec)) + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim Norm(0, \sigma_{err}^2),$$

где f_1, f_2, f_3 – непараметрические гладкие функции (сплайны), ε – случайная ошибка с нулевым средним и дисперсией $\sigma^2 = 0,230$. Как значимые предикторы в модель вошли сумма выпавших осадков за дождевое событие (*SumPrec*), характеристики времени и места выпадения дождя – порядковый номер дня в году (*DoY*), географические координаты (*Lon, Lat* – долгота и широта), высота в рельефе (*H*). На рис. 2 показаны графики непараметрических функций некоторых частных зависимостей, вошедших в модель.

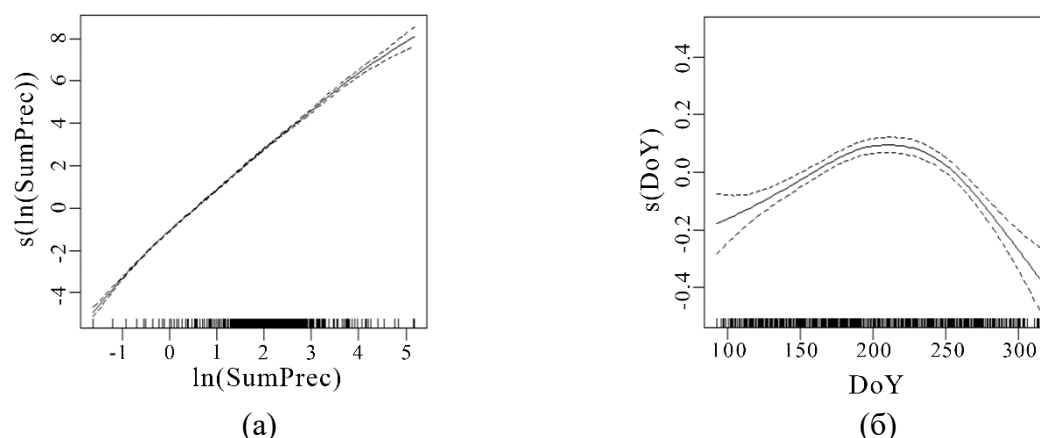


Рис. 2. Примеры частных зависимостей логарифма эрозионной активности дождя *Rs* от объясняющих переменных: (а) от логарифма слоя выпавших осадков ($\ln(SumPrec)$), (б) от номера дня в году (*DoY*). По горизонтали – значение предиктора, по вертикали – его вклад в модель

Fig. 2. Examples of partial dependence of the logarithm of rainfall erosivity (*Rs*) on explanatory variables: (a) on the logarithm of precipitation amount ($\ln(SumPrec)$), (б) on the day of the year (*DoY*).

The horizontal axis shows the predictor value, the vertical axis shows its contribution to the model

Результирующая GAM-модель объясняет 94,6 % изменчивости данных (коэффициент детерминации). Точность прогноза, даваемого GAM-моделью логарифма R_s с 95 %-ой доверительной вероятностью, составляет примерно $\pm 0,94$. Для сравнения, размах выборочных значений 13,62. То есть, модель обеспечивает представление фактической изменчивости логарифма R_s с ошибкой прогноза порядка 7 % от разброса данных. В таблице приведены статистические показатели соответствия модельных результатов исходным данным, основанные на анализе остатков, а на рис. 3 – ряд графиков/диаграмм, иллюстрирующих качество модели.

Статистики остатков построенной GAM-модели логарифма эрозионной активности дождя (R_s)
Residual statistics of the fitted GAM model for the logarithm of rainfall erosivity (R_s)

Средняя ошибка, ME	Медиана ошибки, MD	Средняя абсолютная ошибка, MAE	Среднее квадрата ошибки, MSE	Стандартная ошибка оценки, SE
0	0,05	0,358	0,230	0,480

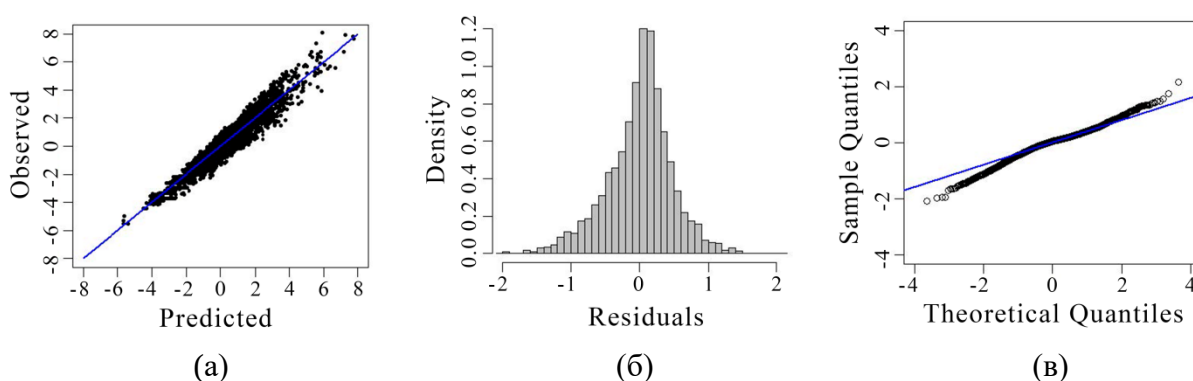


Рис. 3. Диаграммы, иллюстрирующие качество построенной модели логарифма эрозионной активности дождя R_s (метод GAM): (а) по горизонтали – модельные значения (*predicted*), по вертикали – наблюдаемые значения (*observed*) логарифма R_s ; (б) гистограмма частот значений остатков (*residuals*); (в) по горизонтали – теоретические квантили нормального распределения, по вертикали – выборочные квантили остатков

Fig. 3. Diagrams illustrating the quality of the fitted GAM model for the logarithm of rainfall erosivity (R_s): (a) horizontal axis – predicted values, vertical axis – observed values of log R_s ; (б) histogram of residual frequencies; (в) horizontal axis – theoretical quantiles of the normal distribution, vertical axis – sample quantiles of the residuals

Разработанная GAM-модель применена для оценки R -фактора на метеостанциях Росгидромета, обеспеченных внутри-суточными данными об осадках. В пределах АЧР (с буферной зоной 100 км) расположены 328 таких станций. Исходные данные для них загружены из открытого цифрового архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [Архив всероссийского..., 2026] и представляют собой срочные наблюдения за количеством осадков (в мм) в интервалах между сроками, начиная с 1966 г. В 1966-1985 гг. измерения проводились 4 раза в сутки, с 1986 г. – 2 раза в сутки. В ходе предварительной обработки отфильтрованы данные с пропусками и сбойные данные. Всего за обеспеченные года наблюдений на этих 328 станциях было идентифицировано 380 725 «модельных» дождей (от 7 до 75 на станцию в год). Из них к категории эрозионно-опасных дождевых событий (с суммой осадков более 10 мм) отнесены 123 800 ливней (от 0 до 42 на станцию в год). С использованием построенной GAM-модели рассчитаны прогнозные оценки R_s «модельных» дождей в зависимости от значений предикторов: суммы осадков дождя, времени и места выпадения дождя. После чего суммированием R_s эрозионно-опасных «модельных» дождей получены помесечные и годовые оценки R -фактора на каждой метеостанции для всех лет наблюдений с 1966 г. по 2021 г.

Адекватность модельных результатов проверялась путем их сравнения с оценками R -фактора, полученными ранее другими исследователями (с учетом периода обобщения). В качестве «референсных» оценок рассматривались упомянутые выше среднемноголетние значения годового R -фактора, рассчитанные на метеостанциях бывшего СССР по рядам плювиографических наблюдений 1960–1980-х годов [Ларионов, 1993; Panagos, 2023]. На территории АЧР находятся 107 таких метеостанций, которые при этом обеспечены внутри-суточными данными об осадках, что позволило получить на них и наши оценки среднемноголетнего годового R -фактора (усредненного за 1966–1985 гг.). И наши, и «референсные» оценки сделаны для примерно одинаковых периодов обобщения. На рис. 4 приведены диаграммы, иллюстрирующие согласие наших модельных оценок и «референсных» данных. Можно видеть, что наша оценка показывает значения как ниже, так и выше «референсных», но в среднем согласие вполне приемлемое. Медиана и среднее значение отношения нашей оценки к «референсной» практически равны 1 (медиана = 0,99, среднее = 1,1), коэффициент корреляции 0,75.

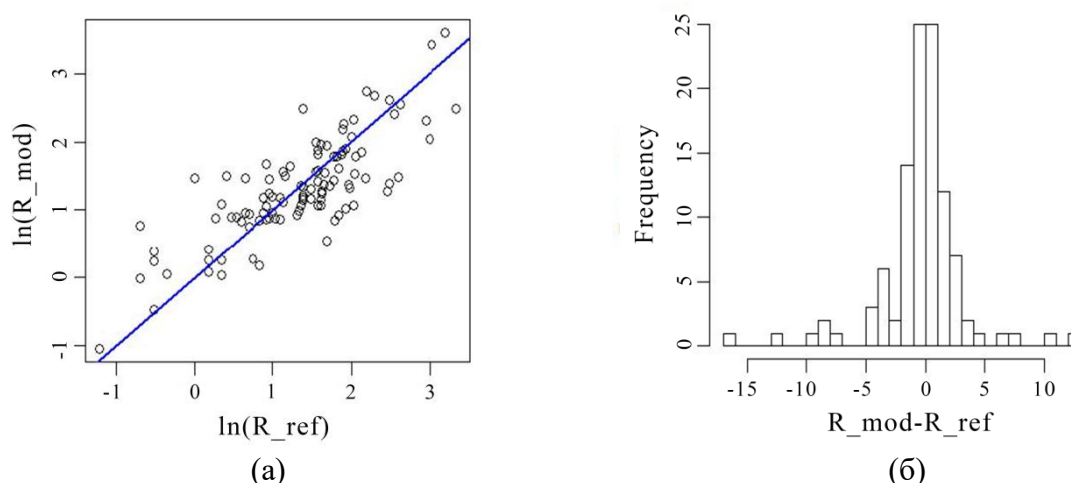


Рис. 4. Диаграммы, иллюстрирующие результаты сравнения на метеостанциях АЧР полученных модельных оценок среднемноголетнего (для периода 1960–1980-х годов) R -фактора с ранее полученными результатами, использованными при построении карты ЭПО [Ларионов, 1993]: (а) по горизонтали – «референсные» значения логарифма R , по вертикали – модельные значения логарифма R ; (б) гистограмма частот значений разностей оценок

Fig. 4. Diagrams illustrating the results of comparing the obtained model estimates of the long-term mean (for the period of the 1960s–1980s) R -factor at weather stations of the Asian territory of Russia with previously published results used for mapping rainfall erosivity [Larionov, 1993]: (a) horizontal axis – reference values of log R , vertical axis – model estimates of log R ; (b) histogram of the frequency distribution of the differences between the estimates

Полученные на метеостанциях АЧР оценки R -фактора за период с 1966 по 2021 гг. позволяют не только анализировать межгодовую динамику этого фактора, но и получать среднемноголетние обобщения за заданный период/периоды в этом интервале лет. Среднемноголетняя оценка снижает влияние межгодовой изменчивости и увеличивает надежность выводов. В частности, современная оценка R -фактора вычислена как среднемноголетняя за период 1996–2021 гг. Ее картографическая визуализация и гистограмма распределения частот значений приведены на рис. 5.

Значения годового R -фактора варьируются в интервале от 0 до 5814 (МДж×мм)/(га×час) в год, при этом 99 % квантиль составляет 2727, а 90 % значений находятся в интервале от 75 до 988, среднее значение 388, медиана 246 (МДж×мм)/(га×час) в год.

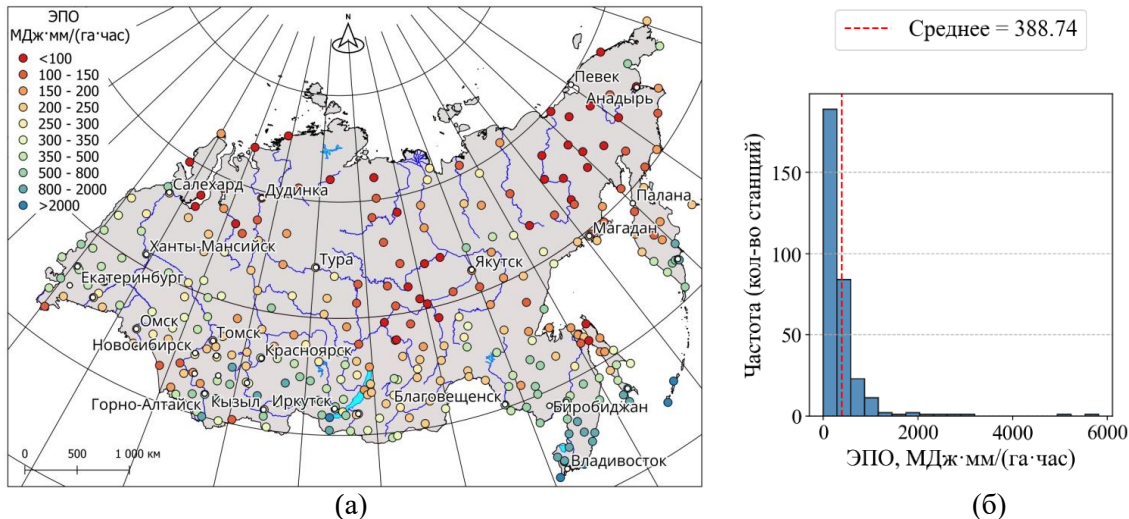


Рис. 5. (а) оценка ЭПО (среднеголетнего за 1996–2021 гг.) на 328 метеостанциях Росгидромета, обеспеченных срочными данными об осадках, на территории АЧР;
(б) гистограмма распределения частот значений ЭПО на станциях за период 1996–2021 гг.
Fig. 5. (a) R-factor estimates (long-term average for 1996–2021) at 328 Roshydromet weather stations with sub-daily precipitation data in the Asian territory of Russia; (b) histogram of rainfall erosivity (R-factor) frequency distribution at the stations for the period 1996–2021

Для исследования систематических временных изменений анализируемых характеристик осадков применено несколько непараметрических статистических критериев: критерий Манна-Кендалла, тест наклона Сена, используемые для проверки гипотезы о наличии направленных изменений (трендов). Достаточным порогом статистической значимости тестов был взят уровень $p\text{-value} = 0,05$. Тесты применялись к построенным временным рядам характеристик осадков на каждой метеостанции. На 85 % метеостанций статистически значимые тренды R -фактора в изучаемый временной интервал 1996–2021 гг. не выявлены, на 11 % станций показано статистически значимое увеличение годового R -фактора, на 3 % – статистически значимое уменьшение (рис. 6а). Для R -фактора изменения за 26 лет за счет тренда составляют около 2 %. График на рис. 6б иллюстрирует эти выводы.

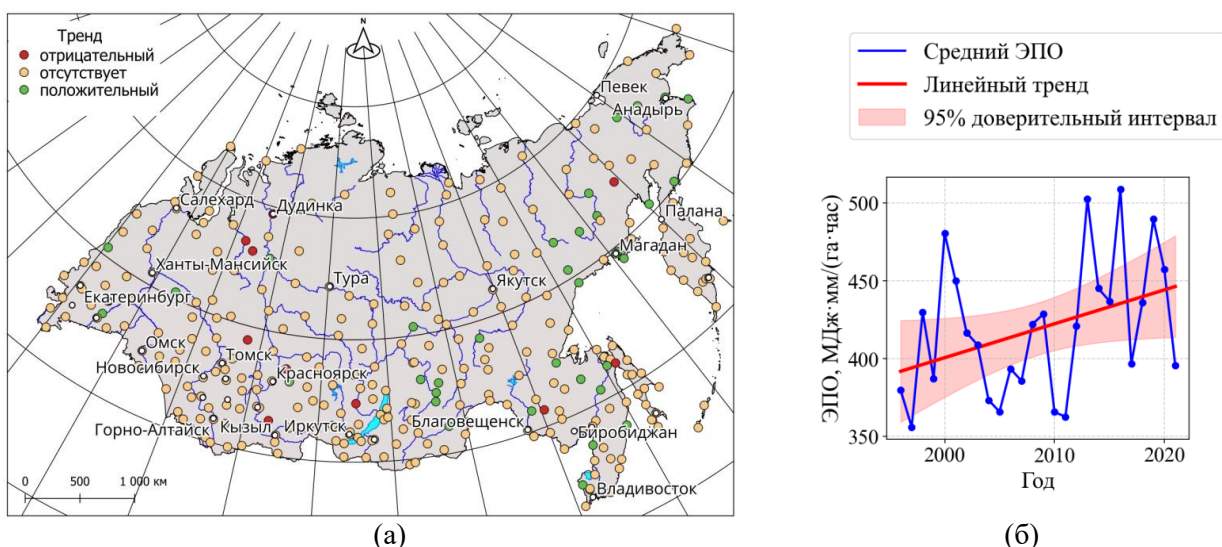


Рис. 6. (а) пространственное распределение метеостанций по знаку тренда годовой суммы дождевых осадков (1996–2021 гг.) (б) межгодовая динамика годового ЭПО на метеостанциях исследуемой территории
Fig. 6. (a) Spatial distribution of weather stations by trend sign of annual rainfall amount (1996–2021); (b) interannual dynamics of the annual R-factor at weather stations of the study area

Заключение

В ходе выполнения работы разработана и реализована методика количественной оценки эрозионного потенциала осадков (*R*-фактора) для азиатской части России, основанная на комбинации данных с высоким временным разрешением и обобщенно-аддитивных моделей (*GAM*). Использование 10-минутных рядов осадков позволило рассчитать эрозионную активность отдельных дождевых событий (*Rs*) по классической методологии *USLE/RUSLE*. Построенная *GAM*-модель объясняет 94,6 % изменчивости логарифма *Rs* и обеспечивает прогноз с ошибкой порядка 7 % от общего разброса данных, что подтверждается анализом остатков и сопоставлением с референсными оценками.

На основе модели восстановлены временные ряды *R*-фактора для 328 метеостанций Росгидромета за период 1966–2021 гг. показано, что среднемноголетние значения *R*-фактора за 1966–1985 гг. хорошо согласуются с данными Г.А. Ларионова (медиана отношения 0,99, коэффициент корреляции 0,75). Современная оценка *R*-фактора (среднемноголетняя за 1996–2021 гг.) варьирует от 0 до 5814 (МДж×мм)/(га×час) в год, при этом 90 % значений лежат в интервале 75–988, а среднее значение составляет 388.

Анализ временной динамики с использованием непараметрических критериев Манна-Кендалла и наклона Сена показал, что на 85 % метеостанций статистически значимые тренды *R*-фактора за 1996–2021 гг. отсутствуют. На 11 % станций выявлен значимый положительный тренд, на 3 % – отрицательный. Величина изменений за счет тренда не превышает 2 % от средних многолетних значений, что свидетельствует о стабильности эрозионного потенциала осадков на большей части азиатской территории России в последние десятилетия.

Предложенная методика позволяет прогнозировать эрозионную активность дождевых осадков на метеостанциях Росгидромета на основе доступных внутри-суточных (срочных) наблюдений за осадками и может быть использована для создания актуальных карт *R*-фактора, а также для оценки влияния климатических изменений на эрозионные процессы в регионах с ограниченной сетью высокоразрешающих наблюдений. Полученные оценки *R*-фактора являются основой для дальнейшего моделирования почвенной эрозии в пределах азиатской части России.

Список источников

- Архив всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения 08.05.2026).
- Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). 2013. Washington, USDA-Agricultural Research Service, 330 p.

Список литературы

- Алешина М.А., Семенов В.А. 2022. Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6. Фундаментальная и прикладная климатология, 8(4): 424–440. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-424-440>.
- Баженова О.И., Тюменцева Е.М., Черкашина А.А., Голубцов В.А., Тухта С.А. 2023. Почвенные ресурсы юга Сибири. География и природные ресурсы, 44(4): 37–45. <https://doi.org/10.15372/GIPR20230404>.
- Бикбулатова Г.Г. 2011. Исследование распределения атмосферного увлажнения на территории Сибири и Дальнего Востока. Омский научный вестник, 1(104): 232–235.
- Заславский М.Н. 1979. Эрозия почв. М., Мысль, 245 с.
- Егоров И.Е. 2009. Полевые методы изучения почвенной эрозии. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле, 1: 157–170.
- Ермолаев О.П., Мухарамова С.С., Мальцев К.А., Полякова А.Р., Савельев А.А. 2025а. Факторы эрозии почв в макрорегионе Европейской части России: моделирование,

- геоинформационное картографирование и пространственный анализ. Почвоведение, 2: 281–300. <https://doi.org/10.31857/S0032180X25020097>.
- Ермолаев О.П., Мухарамова С.С., Полякова А.Р., Савельев А.А. 2025б. Факторы эрозии почв в бассейновых геосистемах азиатской части России. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 89(6): 930–942. <https://doi.org/10.7868/S2658697525060059>.
- Ларионов Г.А. 1993. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М., Изд-во МГУ, 198 с.
- Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. 2012. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород, Константа, 456 с.
- Литвин Л.Ф. 2002. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М., Академкнига, 255 с.
- Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Горобец А.В. 2021. География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и Дальнего Востока. Почвоведение, 1: 136–148. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2101007X>
- Логинов С.В. 2012. Пространственно-временная изменчивость климата азиатской территории России. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 23 с.
- Переведенцев Ю.П., Мирсаева Н.А., Павлова В.Н., Елисеев А.В., Шанталинский К.М., ... Тагиров М.Ш. 2024. Современные региональные климатические изменения и их последствия. М., РУ-САЙНС, 224 с.
- Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П., Алмендрос Г., Кленов Б.М. 2021. Ливневая эрозия черноземов Западной Сибири. Почвы и окружающая среда, 4(2): e145. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.145>.
- Эрозионно-русловые системы. 2017. Под ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М., ИНФРА-М, 700 с.
- Angulo-Martínez M., Beguería S. 2009. Estimating Rainfall Erosivity from Daily Precipitation Records: A Comparison Among Methods Using Data from the Ebro Basin (NE Spain). Journal of Hydrology, 379(1): 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>.
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A. 2022a. 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. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 566–593.
- Bazhenova O.I., Cherkashina A.A., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A., Sorokovikova L.M. 2022b. Ecological Consequences of Soil Degradation and Water Pollution in the Asian Part of Russia (Siberia). In: Global Degradation of Soil and Water Resources 2022. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 594–616.
- Bonilla C.A., Vidal K.L. 2011. Rainfall Erosivity in Central Chile. Journal of Hydrology, 410(1–2): 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.022>.
- Borrelli P., Diodato N., Panagos P. 2016. Rainfall Erosivity in Italy: A National Scale Spatio-Temporal Assessment. International Journal of Digital Earth, 9(9): 835–850. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1148203>.
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., ... Panagos P. 2017. An Assessment of the Global Impact of 21st Century Land Use Change on Soil Erosion. Nature Communications, 8(1): 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Capolongo D., Diodato N., Mannaerts C.M., Piccarreta M., Strobl R.O. 2008. Analyzing Temporal Changes in Climate Erosivity Using a Simplified Rainfall Erosivity Model in Basilicata (Southern Italy). Journal of Hydrology, 356(1–2): 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.002>.
- Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V., Mukharamova S., Saveliev A. 2022. Changes in the Regime of Erosive Precipitation on the European Part of Russia for the Period 1966–2020. Geosciences (Switzerland), 12(7): 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>.
- Diodato N., Bellocchi G. 2007. Estimating Monthly (R)USLE Climate Input in a Mediterranean Region Using Limited Data. Journal of Hydrology, 345(3–4): 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.008>.
- Fiener P., Neuhaus P., Botschek J. 2013. Long-Term Trends in Rainfall Erosivity: Analysis of High Resolution Precipitation Time Series (1937–2007) from Western Germany. Agricultural and Forest Meteorology, 171–172: 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.011>.

- Hastie T., Tibshirani R. 1986. Generalized Additive Models. *Statistical Science*, 1(3): 297–310.
- Janeček M., Květoň V., Kubátová E., Kobzová D., Vošmerová M., Chlupsová J. 2013. Values of Rainfall Erosivity Factor for the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(2): 97–102. <https://doi.org/10.2478/johh-2013-0013>.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., ... Zhou B. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2391 p.
- Meusburger K., Steel A., Panagos P., Montanarella L., Alewell C. 2012. Spatial and Temporal Variability of Rainfall Erosivity Factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 167–177. <https://doi.org/10.5194/hess-16-167-2012>.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. 1996. Iverson Modelling Topographic Potential for Erosion and Deposition Using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5): 629–641.
- Li R., Napier T., El-Swaify S., Sabir M., Rienzi E. 2022. *Global Degradation of Soil and Water Resources: Regional Assessment and Strategies*. Beijing, Springer, 673 p.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., ... Alewell Ch. 2015. Rainfall Erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 511: 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K. 2016. Spatio-Temporal Analysis of Rainfall Erosivity and Erosivity Density in Greece. *Catena*, 137: 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.015>.
- Panagos P., Karydas C.G., Gitas I.Z., Montanarella L. 2012. Monthly Soil Erosion Monitoring Based on Remotely Sensed Biophysical Parameters: a Case Study in Strymonas River Basin Towards a Functional Pan-European Service. *International Journal of Digital Earth*, 5(6): 461–487. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.587897>.
- Panagos P., Hengl T., Wheeler I., Marcinkowski P., Rukeza M.B., ... Borrelli P. 2023. Global Rainfall Erosivity Database (GloREDa) and Monthly R-Factor Data at 1 km Spatial Resolution. *Data in Brief*, 50: 109482. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109482>.
- Papalexioy S.M., Koutsoyiannis D., Makropoulos C. 2013. How Extreme is Extreme? An Assessment of Daily Rainfall Distribution Tails. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2): 851–862. <https://doi.org/10.5194/hess-17-851-2013>.
- Pennock D. 2019. *Soil Erosion: The Greatest Challenge to Sustainable Soil Management*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 100 p.
- Petan S., Rusjan S., Vidmar A., Mikos M. 2010. The Rainfall Kinetic Energy-Intensity Relationship for Rainfall Erosivity Estimation in the Mediterranean Part of Slovenia. *Journal of Hydrology*, 391(3–4): 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.031>.
- Renard K.G., Freimund J.R. 1994. Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R-Factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1–4): 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4).
- Renard K.G. 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook. Washington, U.S. Government Printing Office, 384 p.
- Richardson C.W., Foster G.R., Wright D.A. 1983. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount. *Transactions of the ASAE*, 26(1): 153–156. <https://doi.org/10.13031/2013.33893>.
- Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. 2001. Modelling Mean Annual Sediment Yield Using a Distributed Approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>.
- Vousdoukas M.I., Ranasinghe R., Mentaschi L., Plomaritis Th.A., Athanasiou P., ... Feyen L. 2020. Sandy Coastlines Under Threat of Erosion. *Nature Climate Change*, 10: 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>.
- Wen X., Zhen L., Jiang Q.O., Xiao Y. 2023. A Global Review of the Development and Application of Soil Erosion Control Techniques. *Environmental Research Letters*, 18(3): 033003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbaac>.
- Williams J.R. 1975. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Washington DC, US Department of Agriculture, Agriculture Research Service: 244–252.

- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1965. Prediction Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Agricultural Handbook No. 282. Washington, U.S. Department of Agriculture, 47 p.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: a guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537. Washington, U.S. Department of Agriculture, 58 p.
- Xie Y., Yin S., Liu B., Nearing M.A., Zhao Y. 2016. Models for Estimating Daily Rainfall Erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 535(3): 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.020>.
- Yermolaev O.P., Gafurov A.M., Usmanov B.M. 2018. Evaluation of Erosion Intensity and Dynamics Using Terrestrial Laser Scanning. *Eurasian Soil Science*, 51: 814–826. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070037>.
- Yin S., Nearing M.A., Borrelli P., Xue X. 2017. Rainfall Erosivity: An Overview of Methodologies and Applications. *Vadose Zone Journal*, 16(12): 1–16. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0131>.
- Yu B. 1998. Rainfall Erosivity and Its Estimation for Australia's Tropics. *Soil Research*, 36(1): 143. <https://doi.org/10.1071/S97025>
- Yu B. 1999. A Comparison of the R-Factor in the Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 42(6): 1615–1620.
- Yu B., Hashim G.M., Eusof Z. 2001. Estimating the R-Factor with Limited Rainfall Data: A Case Study from Peninsular Malaysia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56(2): 101–105.
- Zolina O.G. 2011. Changes in the Duration of Synoptic Rainy Periods in Europe from 1950 to 2008 and Their Relation to Extreme Precipitation. *Doklady Earth Sciences*, 436: 279–283. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11020206>.

References

- Aleshina M.A., Semenov V.A. 2022. Changes in Precipitation Characteristics Over Russia in XX–XXI Centuries from CMIP6 Models Ensemble. *Fundamental and Applied Climatology*, 8(4): 424–440 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-424-440>.
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Cherkashina A.A., Golubtsov V.A., Tukhta S.A. 2023. Soil Resources of Southern Siberia. *Geography and Natural Resources*, 44(4): 37–45 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/GIPR20230404>.
- Bikbulatova G.G. 2011. The Analysis of Atmospheric Moisture on the Territory of Siberia and Far East. *Omsk Scientific Bulletin*, 1(104): 232–235 (in Russian).
- Zaslavskiy M.N. 1979. *Eroziya pochv* [Soil Erosion]. Moscow, Publ. Mysl, 245 p.
- Yegorov I.E. 2009. Field Methods of Studying Soil Erosion. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 1: 157–170 (in Russian).
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A., Polyakova A.R., Saveliev A.A. 2025a. Soil Erosion Factors in the European Russia Macroregion: Modeling, Geoinformation Mapping, and Spatial Analysis. *Eurasian Soil Science*, 58(2): 1–17 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229324603561>.
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Polyakova A.R., Saveliev A.A. 2025b. Soil Erosion Factors in Basin Geosystems of the Asian Part of Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 89(6): 930–942 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S2658697525060059>.
- Larionov G.A. 1993. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnyye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki* [Soil Erosion and Deflation: Basic Patterns and Quantitative Assessments]. Moscow, Publ. Moscow University Press, 198 p.
- Lisetsky F.N., Svetlichnyi A.A., Chernyi S.G. 2012. Recent Developments in Erosion Science. Belgorod, Publ. Konstanta, 456 p. (in Russian).
- Litvin L.F. 2002. *Geografiya erozii pochv selskokhozyaystvennykh zemel Rossii* [Geography of Soil Erosion on Agricultural Lands of Russia]. Moscow, Publ. Akademkniga, 255 p.
- Litvin L.F., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Dobrovolskaya N.G., Gorobets A.V. 2021. Dynamics of Agricultural Soil Erosion in Siberia and Far East. *Eurasian Soil Science*, 54(1): 150–160 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229321010075>
- Loginov S.V. 2012. *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' klimata aziatskoy territorii Rossii* [Spatio-Temporal Variability of Climate in the Asian Territory of Russia]. Abstract. dis. ... cand. phys.-math. sciences. Tomsk, 24 p.

- Perevedentsev Yu.P., Mirsayeva N.A., Pavlova V.N., Elisseyev A.V., Shantalinskiy K.M., ... Tagirov M.Sh. 2024. Sovremennyye regional'nyye klimaticheskiye izmeneniya i ikh posledstviya [Modern Regional Climate Changes and Their Consequences]. Moscow, Publ. RU-SAYNS, 224 p.
- Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P., Almendros G., Klenov B.M. 2021. Rainfall Patterns Associated with Runoff and Erosion Levels in West-Siberian Chernozems. *The Journal of Soils and Environment*, 4(2): e145 (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.145>.
- Eroзионно-ruslovyie sistemy [Erosion-Channel Systems]. 2017. Ed. by R.S. Chalov, A.Yu. Sidorchuk, V.N. Golosov. Moscow, Publ. INFRA-M, 700 p.
- Angulo-Martínez M., Beguería S. 2009. Estimating Rainfall Erosivity from Daily Precipitation Records: A Comparison Among Methods Using Data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1): 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>.
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A. 2022a. 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*. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 566–593.
- Bazhenova O.I., Cherkashina A.A., Tyumentseva E.M., Golubtsov V.A., Sorokovikova L.M. 2022b. Ecological Consequences of Soil Degradation and Water Pollution in the Asian Part of Russia (Siberia). In: *Global Degradation of Soil and Water Resources 2022*. Ed. by Li R., Napier T., ElSwaify S., Sabir M., Rienzi E. Beijing, Springer: 594–616.
- Bonilla C.A., Vidal K.L. 2011. Rainfall Erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*, 410(1–2): 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.022>.
- Borrelli P., Diodato N., Panagos P. 2016. Rainfall Erosivity in Italy: A National Scale Spatio-Temporal Assessment. *International Journal of Digital Earth*, 9(9): 835–850. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1148203>.
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., ... Panagos P. 2017. An Assessment of the Global Impact of 21st Century Land Use Change on Soil Erosion. *Nature Communications*, 8(1): 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Capolongo D., Diodato N., Mannaerts C.M., Piccarreta M., Strobl R.O. 2008. Analyzing Temporal Changes in Climate Erosivity Using a Simplified Rainfall Erosivity Model in Basilicata (Southern Italy). *Journal of Hydrology*, 356(1–2): 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.002>.
- Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V., Mukharamova S., Saveliev A. 2022. Changes in the Regime of Erosive Precipitation on the European Part of Russia for the Period 1966–2020. *Geosciences (Switzerland)*, 12(7): 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>.
- Diodato N., Bellocchi G. 2007. Estimating Monthly (R)USLE Climate Input in a Mediterranean Region Using Limited Data. *Journal of Hydrology*, 345(3–4): 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.008>.
- Fiener P., Neuhaus P., Botschek J. 2013. Long-Term Trends in Rainfall Erosivity: Analysis of High Resolution Precipitation Time Series (1937–2007) from Western Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172: 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.011>.
- Hastie T., Tibshirani R. 1986. Generalized Additive Models. *Statistical Science*, 1(3): 297–310.
- Janeček M., Květoň V., Kubátová E., Kobzová D., Vošmerová M., Chlupsová J. 2013. Values of Rainfall Erosivity Factor for the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(2): 97–102. <https://doi.org/10.2478/johh-2013-0013>.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., ... Zhou B. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2391 p.
- Meusburger K., Steel A., Panagos P., Montanarella L., Alewell C. 2012. Spatial and Temporal Variability of Rainfall Erosivity Factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 167–177. <https://doi.org/10.5194/hess-16-167-2012>.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. 1996. Iverson Modelling Topographic Potential for Erosion and Deposition Using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5): 629–641.
- Li R., Napier T., El-Swaify S., Sabir M., Rienzi E. 2022. *Global Degradation of Soil and Water Resources: Regional Assessment and Strategies*. Beijing, Springer, 673 p.

- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., ... Alewell Ch. 2015. Rainfall Erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 511: 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>.
- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K. 2016. Spatio-Temporal Analysis of Rainfall Erosivity and Erosivity Density in Greece. *Catena*, 137: 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.015>.
- Panagos P., Karydas C.G., Gitas I.Z., Montanarella L. 2012. Monthly Soil Erosion Monitoring Based on Remotely Sensed Biophysical Parameters: a Case Study in Strymonas River Basin Towards a Functional Pan-European Service. *International Journal of Digital Earth*, 5(6): 461–487. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.587897>.
- Panagos P., Hengl T., Wheeler I., Marcinkowski P., Rukeza M.B., ... Borrelli P. 2023. Global Rainfall Erosivity Database (GloREDa) and Monthly R-Factor Data at 1 km Spatial Resolution. *Data in Brief*, 50: 109482. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109482>.
- Papalexiou S.M., Koutsoyiannis D., Makropoulos C. 2013. How Extreme is Extreme? An Assessment of Daily Rainfall Distribution Tails. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2): 851–862. <https://doi.org/10.5194/hess-17-851-2013>.
- Pennock D. 2019. Soil Erosion: The Greatest Challenge to Sustainable Soil Management. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 100 p.
- Petan S., Rusjan S., Vidmar A., Mikos M. 2010. The Rainfall Kinetic Energy-Intensity Relationship for Rainfall Erosivity Estimation in the Mediterranean Part of Sloveni. *Journal of Hydrology*, 391(3–4): 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.031>
- Renard K.G., Freimund J.R. 1994. Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R-Factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1–4): 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4).
- Renard K.G. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook*. Washington, U.S. Government Printing Office, 384 p.
- Richardson C.W., Foster G.R., Wright D.A. 1983. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount. *Transactions of the ASAE*, 26(1): 153–156. <https://doi.org/10.13031/2013.33893>.
- Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. 2001. Modelling Mean Annual Sediment Yield Using a Distributed Approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>
- Vousdoukas M.I., Ranasinghe R., Mentaschi L., Plomaritis Th.A., Athanasiou P., ... Feyen L. 2020. Sandy Coastlines Under Threat of Erosion. *Nature Climate Change*, 10: 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>.
- Wen X., Zhen L., Jiang Q.O., Xiao Y. 2023. A Global Review of the Development and Application of Soil Erosion Control Techniques. *Environmental Research Letters*, 18(3): 033003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbaac>.
- Williams J.R. 1975. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Washington DC, US Department of Agriculture, Agriculture Research Service: 244–252.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1965. Prediction Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. *Agricultural Handbook No. 282*. Washington, U.S. Department of Agriculture, 47 p.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: a guide to conservation planning. *Agricultural Handbook No. 537*. Washington, U.S. Department of Agriculture, 58 p.
- Xie Y., Yin S., Liu B., Nearing M.A., Zhao Y. 2016. Models for Estimating Daily Rainfall Erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 535(3): 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.020>.
- Yermolaev O.P., Gafurov A.M., Usmanov B.M. 2018. Evaluation of Erosion Intensity and Dynamics Using Terrestrial Laser Scanning. *Eurasian Soil Science*, 51: 814–826. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070037>.
- Yin S., Nearing M.A., Borrelli P., Xue X. 2017. Rainfall Erosivity: An Overview of Methodologies and Applications. *Vadose Zone Journal*, 16(12): 1–16. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0131>.
- Yu B. 1998. Rainfall Erosivity and Its Estimation for Australia's Tropics. *Soil Research*, 36(1): 143. <https://doi.org/10.1071/S97025>

- Yu B. 1999. A Comparison of the R-Factor in the Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, 42(6): 1615–1620.
- Yu B., Hashim G.M., Eusof Z. 2001. Estimating the R-Factor with Limited Rainfall Data: A Case Study from Peninsular Malaysia. Journal of Soil and Water Conservation, 56(2): 101–105.
- Zolina O.G. 2011. Changes in the Duration of Synoptic Rainy Periods in Europe from 1950 to 2008 and Their Relation to Extreme Precipitation. Doklady Earth Sciences, 436: 279–283. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11020206>.

*Поступила в редакцию 16.05.2026;
поступила после рецензирования 28.06.2026;
принята к публикации 17.07.2026*

*Received May 16, 2026;
Revised June 28, 2026;
Accepted July 17, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Полякова Алика Рафаэлевна, старший преподаватель кафедры моделирования экологических систем института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Мухарамова Светлана Саясовна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры моделирования экологических систем института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Ермолаев Олег Петрович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры ландшафтной экологии института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Савельев Анатолий Александрович, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник учебно-научной лаборатории «Центр агро- и экобиотехнологий» института экологии, биотехнологии и природопользования К(П)ФУ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alika R. Polyakova, Senior Lecturer of the Department of Environmental Systems Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Svetlana S. Mukharamova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Ecological Systems Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Oleg P. Yermolaev, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor at the Department of Landscape Ecology, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Anatoly A. Saveliev, Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher at the "Center for Agro- and Eco-Biotechnologies" Educational and Research Laboratory, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia