

УДК 631.4:632.125

## **ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ЭРОЗИИ ПОЧВ В МАКРОРЕГИОНЕ РОССИИ**

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

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул.Кремлевская, 18,  
420008, г. Казань, Россия, [oyermol@gmail.com](mailto:oyermol@gmail.com)*

Для макрорегиона России — равнинных и возвышенных ландшафтов ее европейской части методами моделирования, ГИС-картографирования приведены результаты количественной оценки параметров почвенной эрозии, входящих в расчетную модель смыва почв USLE/RUSLE на региональном уровне генерализации. Особое внимание уделено оценке эрозионного потенциала осадков. Разработанный подход предполагает моделирование R-фактора с использованием внутри-суточных данных об осадках. На основе оценок R-фактора на 189-ти метеостанциях европейской территории России со срочными данными за 2014-2019 гг. получена современная оценка пространственного распределения среднесуточного годового R-фактора на исследуемой территории. В докладе изложены методики и результаты оценки всех факторов эрозии и ее интенсивности в разных ландшафтных зонах.

**Ключевые слова:** эрозия почвы; модель USLE/RUSLE; эрозионный потенциал осадков; R-фактор.

## **GEOINFORMATION MAPPING AND SPATIAL ANALYSIS OF SOIL EROSION FACTORS IN THE MACROREGION OF RUSSIA**

**O. P. Yermolaev, S. S. Mukharamova, A. A. Saveliev, A. R. Polyakova**

*Kazan (Volga region) Federal University, 18 Kremlyovskaya street,  
420008, Kazan, Russia, [oyermol@gmail.com](mailto:oyermol@gmail.com)*

For the macroregion of Russia - lowland and upland landscapes of its European part, using modeling and GIS-mapping methods, the results of a quantitative assessment of soil erosion parameters included in the USLE/RUSLE calculation model of soil erosion at the regional level of generalization are presented. Particular attention is paid to the assessment of rainfall erosivity factor (R). The developed approach involves modeling the R-factor using intra-daily precipitation data. Based on estimates of the R-factor at 189 weather stations with urgent data for 2014-2019, a modern assessment of the spatial distribution of the average long-term annual R-factor in the study area was obtained. The report outlines the methods and results of assessing all factors of erosion and its intensity in different landscape zones..

**Keywords:** soil erosion; USLE/RUSLE model; rainfall erosive potential; R-factor.

Опубликованных результатов современных исследований, посвященных количественной оценке факторов эрозии почв и ее интенсивности на региональном уровне генерализации для европейской территории России (ЕТР) крайне мало. Ранее полученные для этой территории оценки факторов эрозии и самой эрозии нуждаются в уточнении по ряду причин. В основном все результаты для этой большой территории получены с низкой пространственной детальностью. Расчеты параметров и интенсивности эрозии обобщены либо на укрупненные по условиям рельефа морфологические районы, либо на субъекты и районы РФ, либо определены только для пахотных земель. В докладе рассматривается методика и результаты оценки в первую очередь такого фактора эрозии почвы, как эрозионный потенциал осадков (ЭПО). Проведенные оценки базируются на максимально высоком уровне пространственной детальности: все значения определены в ячейках растра с шагом 250 м и обобщены на лучшие, с точки зрения интерпретации эрозионного процесса геосистемные образования, - бассейны малых рек. С учетом пространственной детальности привлекаемых исходных данных результаты соответствуют масштабу 1:500000. Выбор макрорегиона (3,5 млн. км<sup>2</sup>) исследований обусловлен продолжительной и интенсивной земледельческой деятельностью. Здесь же проживает и значительная часть населения РФ.

Оценка интенсивности эрозии почвы за период ливневого (дождевого) поверхностного стока выполнялась на базе известной модели, даваемой универсальным уравнением потерь почвы (USLE/RUSLE). В составе этого уравнения в качестве одного из значимых метеорологических параметров, формирующих поверхностный склоновый сток и эрозию, выступает так называемый R-фактор (эрозионный потенциал дождевых осадков). Он определяется как сумма эрозионной активности отдельных дождей, выпавших за заданный период (месяц, год). Эрозионная активность отдельного дождя определяется в USLE/RUSLE как произведение кинетической энергии дождя и его максимальную 30-минутную интенсивность [1] и рассчитывается на основе данных гиетोगрафа (или плювиографа), либо регистрации осадков через короткие промежутки времени (1–60 мин) в течение как минимум нескольких лет [2, 3, 4]. Количество таких датчиков (с высоким временным разрешением) невелико, эти данные сложно получить в большом масштабе и часто они имеют короткие периоды наблюдения. Поэтому большинство исследований эрозионности дождей с широким пространственным охватом связано с разработкой и применением методов оценки R-фактора на основе более доступных данных об осадках с грубым временным разрешением (суточные, месячные, годовые). Общий подход заключается в разработке

эмпирических взаимосвязей между  $R$ , рассчитанным по ограниченному количеству данных с высоким разрешением, и данными об осадках с низким разрешением (суточными, месячными или годовыми). Как правило, связь между  $R$  и количеством осадков описывается степенной зависимостью [5], а при наличии суточных или месячных данных о дождевых осадках в модель иногда включают синусоидальную функцию, отражающую годовой цикл параметров степенного закона. Известно, что использовать такие аппроксимирующие уравнения надо с большой осторожностью - уравнения, разработанные для конкретного региона, не могут быть безусловно применены в других условиях, параметры моделей должны быть как минимум откалиброваны до ее экстраполяции в другую ландшафтную зону. Наш подход предполагает моделирование  $R$ -фактора с использованием внутри-суточных данных об осадках. Эти данные могут предоставить больше информации об экстремальных осадках, и это делает их лучшей альтернативой для оценки  $R$  по сравнению с годовыми, месячными и суточными данными. Подход описывается так:

1) Для метеостанций, обеспеченных данными об осадках с высоким временным разрешением – данными pluвиографов, рассчитана эрозионность дождей по USLE/RUSLE (как произведение кинетической энергии дождя и его максимальной 30-минутной интенсивности).

2) На основе этих результатов и с использованием метода обобщенно-аддитивных моделей (Generalized Additive Model, GAM) [6] разработана модель статистической зависимости эрозионности дождя от характеристик места и времени выпадения дождя, и от характеристик дождя, которые могут быть извлечены из внутри-суточных данных об осадках.

3) Для метеостанций, обеспеченных внутри-суточными данными об осадках, выделены «модельные» дожди (непрерывная последовательность сроков наблюдения, в каждом из которых зафиксированы дождевые осадки) и оценена их эрозионность по разработанной GAM-модели.

4) На этих метеостанциях суммированием эрозионности «модельных» дождей (со слоем осадков  $>10\text{мм}$ ) рассчитан  $R$ -фактор для заданного временного промежутка (месяца, года) и выполнено среднемноголетнее обобщение.

5) Моделирование пространственного распределения (интерполяция) среднемноголетнего годового  $R$ -фактора на исследуемой территории использует линейную регрессионную зависимость  $R$  от Prec - среднемноголетней суммы дождевых осадков (осадков в теплый период года) (коэффициент детерминации 80%) и нелинейную зависимость коэффициента этой регрессии от координат (долготы, широты) (коэффициент детерминации 88%). GAM-модель нелинейной зависимости позволяет получить пространственный прогноз

коэффициента регрессии (coef.predict), который можно считать оценкой пространственного матожидания этого показателя. В соответствии с принципами геостатистики, прогноз рассматривается как пространственный тренд и вычитается из значений коэффициента на метеостанциях, после чего проводилась пространственная интерполяция остатков методом МВА (Multilevel B-spline Approximation) [7]. Преимуществом МВА является воспроизведение деталей на всех масштабных уровнях, которое обусловлено иерархией масштабов, в которых последовательно выполняется интерполяция. Результирующая оценка R-фактора в произвольной точке исследуемой территории получена как произведение суммы прогнозного коэффициента регрессии и остатков на сумму осадков в теплый период года:

$$R = (\text{coef.predict} + \text{residual}) \cdot \text{Prec.}$$

Для реализации подхода использованы плювиографические данные, полученные в разные периоды наблюдений (с 1961 по 1989 гг.) на 32 станциях, расположенных на ЕТР. Всего анализировалось 4221 плювиограмм дождей. В качестве внутри-суточных данных об осадках в работе использованы срочные данные о количестве осадков на метеостанциях Росгидромета. Данные загружены с официального сайта ВНИИГМИ-МЦД [8]. На ЕТР расположено 189 метеостанций со срочными данными об осадках (за период наблюдений 1966-2020 гг.). Методика реализуется средствами авторского программного обеспечения, созданного с использованием языков R 3.4.4. и Python 3.7. Была разработана GAM-модель статистической зависимости эрозионности дождей от внешних факторов, объясняющая 87 % изменчивости данных. Как значимые предикторы в модель вошли характеристики времени и места выпадения дождя (номер дня в году, долгота, широта, высота рельефа), количество выпавших осадков, средняя интенсивность дождя. Нелинейная зависимость от внешних факторов моделировалась с использованием сплайнов. Адекватность модельных оценок R-фактора оценивалась путем их сравнения с референсными оценками R (годового среднемноголетнего) на 40 метеостанциях, использованными при построении карты Global Rainfall Erosivity map [9] с учетом периода обобщения. И наши, и референсные оценки R сделаны для периода 1961-1989 гг. Установлено хорошее согласие модельных значений с референсными данными ( $r=0.98$ ).

На основе оценок R-фактора на 189-ти метеостанциях ЕТР со срочными данными за 2014-2019 гг. и с использованием разработанного метода получена современная оценка пространственного распределения среднемноголетнего годового R-фактора дождевой эрозии на исследуемой территории. Результат представлен на растровом слое обобщением данных на бассейны малых рек и представлен на нашем

геопортале [10, 11]. Значения полученной оценки R-фактора варьируются в интервале от 27 до 2700, среднее значение 280, СКО 179 (МДж мм) / (га час) в год. В докладе также рассматриваются все другие параметры эрозии почв (смываемость почв, почвозащитная роль растительности, эрозионный потенциал рельефа, запасы воды в снеге), а также результаты оценки интенсивности почвенной эрозии на ЕТР. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (22-17-00025).

### Библиографические ссылки

1. *Wischmeier W. H., Smith D. D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, DC: US Gov. Print. Office, 1978. 537 p.
2. *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.
3. *Yu B.* Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics. *Soil Res.* 1998. Vol. 36, № 1. P. 143. doi 10.1071/S97025
4. *Lu H., Yu B.* Spatial and seasonal distribution of rainfall erosivity in Australia. *Soil Res.* 2002. Vol. 40, № 6. P. 887. doi 10.1071/SR01117
5. *Richardson C. W., Foster G. R., Wright D. A.* Estimation of erosion index from daily rainfall amount. *Transactions of the ASAE* 1983. Vol. 26, № 1. P. 153–156.
6. *Hastie T., Tibshirani R.* Generalized Additive Models. *Statist. Sci.* 1986. Vol. 1, № 3. doi 10.1214/ss/1177013604
7. *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. doi 10.1109/2945.620490
8. Официальный сайт Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 15.03.2021).
9. *Panagos, P., Borrelli, K., Meusburger, B., Yu, A., Klik, K. J. Lim, et al.* Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Sci. Rep.* 7:4175. doi:10.1038/s41598-017-04282-8
10. Веб-портал открытого пользования «Речные бассейны Европейской части России». URL: <https://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения: 15.01.2024).
11. *Mukharamova S., Saveliyev A., Ivanov M., Gafurov A., Yermolaev O.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European part of Russia. *ISPRS International Journal of Geo-Information.* 2021. Vol.10, Is.10. - Art. №645.