УДК 502/504 : 631.459 DOI 10.35688/2413-8452-2024-04-004

Научная статья

Картографирование территории по *LS*-фактору эрозии с использованием геоинформационной системы и цифровой модели рельефа

Поступила 05.10.2024 г. / Принята к публикации 15.12.2024 г.

Зверьков Михаил Сергеевич
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна, Россия

Аннотация
Отмечается, что проблема охраны почв от эрозии с каждым годом становится все более актуальной. Это связано, во-первых, с осознанием выдающейся роли почвы в жизни биосферы, во-вторых, это связано с тем, что почвенный покров находится сейчас в критическом состоянии. Эрозия почвы стала одной из самых значительных экологических проблем в мире. Количественная оценка параметров эрозии – важная научно-практическая задача. В статье рассматривается пример картографирования территории по *LS*-фактору эрозии с использованием геоинформационной системы и цифровой модели рельефа. Общий диапазон *LS*-фактора составил 0…118. Наибольший удельный вес (73,3%) имеет *LS* = 1 (на территории 126691,58 га при средней площади единичного участка 43,61 ± 8,44 га). Отмечается, что влияние на характер эрозии оказывают не только крупные изменения формы рельефа, но и мелкие. Эта особенность проявляется в том, что на одних участках происходит смыв, а на других – аккумуляция продуктов эрозии почв. Этим объясняется характерная флуктуация *LS*-фактора на карте.

Ключевые слова:
эрозия, почва, *LS*-фактор, рельеф, экология, цифровая модель рельефа, картографирование, геоинформационная система, QGIS

Research article

Mapping of the territory by the *LS* erosion factor using a geoinformation system and a digital terrain model

Received on October 05, 2024 / Accepted on Dember 15, 2024

Zverkov Mikhail Sergeevich
Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga», Kolomna, Russia

Abstract
It is noted that the problem of protecting soils from erosion is becoming more and more urgent every year. This is due, firstly, to the awareness of the outstanding role of soil in the life of the biosphere, and secondly, it is due to the fact that the soil cover is now in critical condition. Soil erosion has become one of the most significant environmental problems in the world. Quantitative assessment of erosion parameters is an important scientific and practical task. The article examines an example of mapping the territory by the *LS*-factor of erosion using a geographic information system and a digital relief model. The total *LS*-factor range was 0... 118. The highest specific gravity (73.3%) is *LS* = 1 (in the territory of 126691.58 hectares with an average area of a single plot of 43.61 ± 8.44 hectares). It is noted that not only large changes in the shape of the relief, but also small ones have an impact on the nature of erosion. This feature is manifested in the fact that in some areas there is a flush, and in others – the accumulation of soil erosion products. This explains the characteristic fluctuation of the *LS*-factor on the map.

Keywords:
erosion, soil, *LS*-factor, relief, ecology, digital relief model, mapping, geographic information system, QGIS

Введение. Проблема охраны почв от эрозии с каждым годом становится все более актуальной. Это связано, во-первых, с осознанием выдающейся роли почвы в жизни биосферы. Так, например, по оценкам экспертов почвенные ресурсы эффективно депонируют углерод

на поверхности Земли [1]. Во-вторых, это связано с тем, что почвенный покров находится сейчас в критическом состоянии [2].

Эрозия почвы стала одной из самых значительных экологических проблем в мире [3]. Проявление эрозии не ограничивается местом ее возникновения, часто негативные последствия возникают за пределами разрушения почвы. Исследователи к таким явлениям относят ухудшение качества воды, сокращение биоразнообразия и неблагоприятное воздействие на экономику [4].

Ежегодно эрозия является причиной потери от 25 до 40 миллиардов тонн верхнего плодородного слоя почвы по всему миру [5]. Под эрозией понимается разрушение почвы под действием различных сил – воды, ветра, ледников и др. По степени проявления различают эрозию нормальную (естественную) и ускоренную (антропогенную). Потеря почвой питательных минеральных и органических веществ [6], изменение гранулометрического состава, переуплотнение, засоление, уменьшение полезной почвенной биоты [7] и др. явления приводят к деградации земель и снижению эффективности их использования [8]. В последние годы интенсивная антропогенная деятельность еще больше ускоряет деградацию земель и снижение плодородия почвы. Из-за роста площади пашни и урбанизации почвенные экосистемы нарушаются [9], а темпы эрозии при этом ускоряются [10].

Большинство землепользователей в погоне за лучшими показателями урожайности не задумываются над процессами деградации почв, выбирая тот или иной способ агротехники растений [11]. Между тем, значительные площади ежегодно исключаются из сельскохозяйственного оборота в результате нерационального использования земель и их деградации. Так, по состоянию на 2010 год в России более 67% сельхозугодий были подвержены эрозии. Причем ведущая роль принадлежит ирригационной эрозии [12, 13]. К сожалению, в последние годы показатели интенсивности эрозионных процессов на территории Российской Федерации в ежегодных государственных докладах о состоянии земель не актуализируются. В то же время оценка эрозии почвы представляет собой основу для разработки программ по сохранению и защите почвенных ресурсов от эрозии [14].

Вопросам количественной оценки интенсивности почвенной эрозии, а также ее пространственного развития с использованием эрозионного моделирования в пределах объектов разного уровня генерализации – от малого водосбора до континента – уделяется большое внимание [15, 16]. На практике, особенно в зарубежных исследованиях, широкое распространение получили универсальное уравнение потери почвы (USLE) [17, 18] и его аналоги, например, пересмотренное универсальное уравнение потери почвы (RUSLE) [19] и «китайское» уравнение потери почвы (CSLE) [20]. Необходимо отметить, что моделирование как метод исследования широко применяется в эрозиоведении [15, 21]. Уравнение потерь почвы RUSLE имеет вид:

$$A = RKLSCP,$$

где A– среднемноголетние потери почвы с единицы площади; R – среднемноголетнее значение фактора эродирующей способности дождей; K–фактор эродируемости почвы; L и S – безразмерные факторы геометрии склона (соответственно длины и уклона); C – фактор растительности и севооборота (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1); P – фактор эффективности противоэрозионных мероприятий (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1).

Как видно, уравнение аналогично уравнению для оценки потерь почвы по ГОСТ 17.4.4.03-86[1]. Уравнение позволяет провести расчеты среднемноголетних потерь почвы, в то время, как часто возникает необходимость расчета потерь почвы от отдельных дождей или, например, при дождевании на склонах в условиях гидромелиоративных систем. На это замечание о USLE также указывается в исследовании [22]. В этой работе предлагается зависимость для оценки среднемноголетних потерь почвы и потерь почвы от отдельных дождей:

$$A = (AI - AI_{cr})KLSCP,$$

где AI и AI_{cr} – среднемноголетнее значение или значение отдельного дождя соответственно параметров эрозионного индекса дождя и критического эрозионного индекса дождя, при котором начинается эрозия (смыв почвы).

Необходимо отметить, что при применение эмпирических зависимостей ограничено тем, что для их разработки требуется большое количество данных наблюдений. Об этой проблеме почвоведения также указано в исследовании [23].

Широкое распространение в практике оценки потерь почвы от эрозии получили методики с использованием геоинформационных систем. Несомненным их преимуществом является возможность использовать большой

[1] ГОСТ 17.4.4.03-86 «Охрана природы. Почвы. Метод определения потенциальной опасности эрозии под воздействием дождей» [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200012803 (Дата обращения 20.09.2024 г.).

массив атрибутивной информации, ее автоматической обработки для территорий разного масштаба. В тоже время отсутствие унифицированных подходов затрудняет сравнение результатов.

В рассмотренных выше зависимостях влияние рельефа на интенсивность эрозии почвы оценивается с помощью безразмерного топографического фактора *LS*. Этот параметр учитывает влияние длины склона *L* и его градиент (уклон) *S*. Использование этого параметра в разные годы описано во многих работах, например, в [24–27]. Взаимное влияние длины и уклона склона выражают единым топографическим фактором *LS*, который согласно ГОСТ 17.4.4.03-86 вычисляют по формуле:

$$LS = L^{0,5}(0,0011S^{2}+0,0078+0,0111).$$

В зарубежной литературе наиболее часто встречается зависимость [28]:

$$LS = (n + 1)(A_s/22,13)^{n}(\sin\beta/0,0896)^{m},$$

где n и m – эмпирические коэффициенты, равные соответственно 0,4 и 1,3; A_s – площадь территории водосбора; β – угол уклона поверхности склона.

Цель исследования заключалась в расчете *LS*-фактора эрозии с использованием геоинформационной системы и цифровой модели рельефа.

Материалы и методы исследования. Исследовалась территория Коломенского городского округа Московской области. Общая площадь 172846 га.

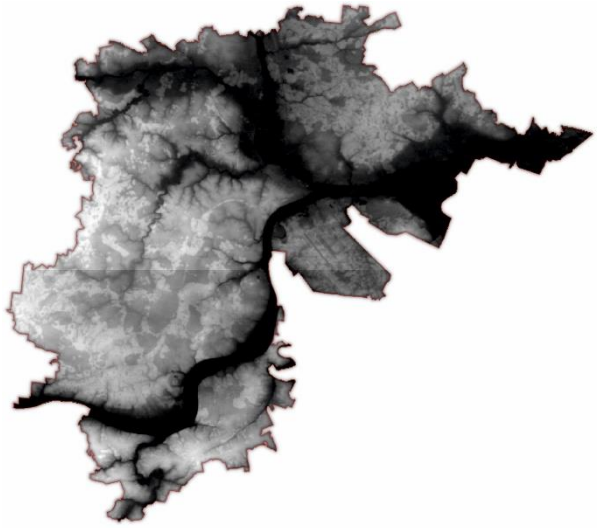
Для построения цифровой модели рельефа использовались данные Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Исходные растровые данные разбиты на ячейки, каждая из которых охватывает один градус широты и один градус долготы, названные в соответствии с их юго-западными углами. Разрешение необработанных данных составляет одну угловую секунду (30 м вдоль экватора). Исходные высоты SRTM рассчитаны относительно эллипсоида WGS84. Использовались SRTM-снимки «srtm_44_01» и «srtm_44_02». Снимки для исходного анализа имеют пространственный формат данных с метаданными о географической привязке, так называемый георефернцированный растр.

Обработка полученных данных выполнена в программе QGIS (версия 3.28.1 «Firenze»). Исходная система координат – WGS 84 (Pseudo-Mercator, EPGS:3857). Выполнен анализ георастровых данных с помощью инструментов образования «Теневого рельефа» и «Одноканального псевдоцветного» режимов отображения тайлов. Для этого каждый из георефернцированных растров дублировался и обрезался по «маске» (векторный абрис границы исследуемой территории). Для настройки режима визуализации выбран режим смешивания «Умножение», передискретизация не выполнялась. Выполнялось построение изолиний рельефа. Итоговый растр векторизовался для получения атрибутивных данных.

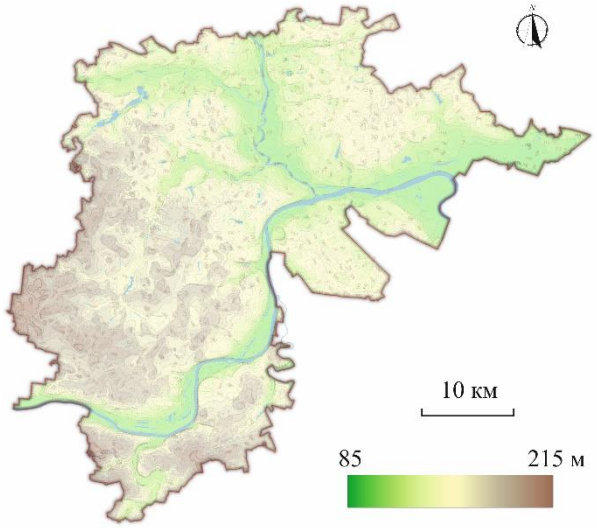
Моделирование *LS*-фактора выполнено в геоинформационной системе SAGA GIS 9.3.1. Использовался модуль «Terrain Analysis» и инструмент «*LS* factor». В качестве исходных данных использовалась сетка «Grid System» цифровой модели рельефа. Использовался метод Moore et al. (1991). Результаты векторизовались и выполнялась стандартная классификация. Оценка площадей выполнена с помощью функции геометрии полигонального объекта $area, которая позволяет вычислить площадь по эллипсоиду (если он установлен в системе координат) или на плоскости (если эллипсоид не установлен).

Обработка данных и графическое оформление результатов исследования также выполнены в электронных таблицах Microsoft Office Excel (ver. 16.10 Build 180124 (2018)). Для итоговых векторных слоев рассчитывались значения зональной статистики (среднеарифметические значения, стандартное отклонение *s*, доверительный интервал). Уровень статистической значимости принят $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение. На рисунке 1а показан результат обработки SRTM-снимков, на рисунке 1б – цифровая модель рельефа с горизонталями. Медианное значение высоты сечения рельефа составляет около 150 м, в тоже время только 7,9% территории имеет такие отметки. К медианному значению высоты тяготеет интервал горизонталей от 140 до 165 м, суммарно составляющий 42,8% площади территории. Интервал горизонталей от 105 до 135 м суммарно составляет 30,3% площади, интервал от 150 до 185 м – 20,4%. Колебания высотных отметок вокруг медианного значения иллюстрирует гистограмма на рисунке 2. Отметки нижнего (зеленая гамма паттернов) диапазона приурочены к поймам рек Оки, Москвы и их притоки. В южной и юго-западной частях исследуемой территории характерны наиболее высокие отметки (165…215 м). Более 50% территории имеет значение *LS*-фактора, равное 0…2 (рисунки 3, 4). Общий диапазон этого параметра составил 0…118. Этот параметр отражает потенциальную эрозионную опасность, обусловленную особенностями рельефа. Выполнена классификация *LS*-фактора по площади занимаемой им территории (рисунок 5).



а



б

Рисунок 1 – **Цифровая модель рельефа:** а – результат объединения растров SRTM; б – результат построения изолиний рельефа и классификации растра

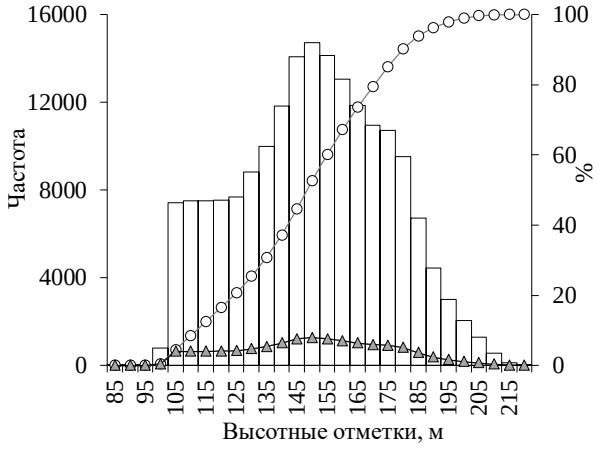


Рисунок 2 – **Распределение высоты сечения рельефа:** ▭ – гистограмма; —○— – накопленная частота, %; —△— – встречаемость в выборке, %

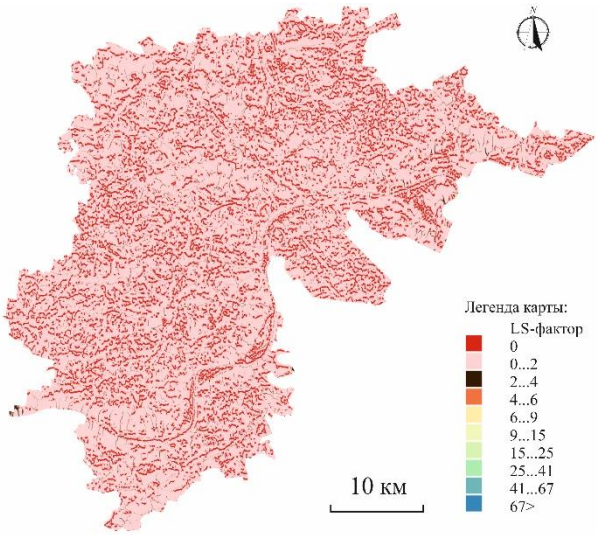


Рисунок 3 – **Карта *LS*-фактор рельефа**

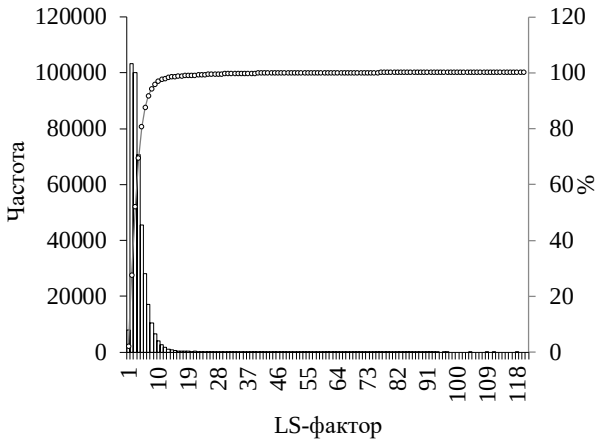


Рисунок 4 – **Гистограмма *LS*-фактора:** ▭ – гистограмма; —○— – накопленная частота, %;

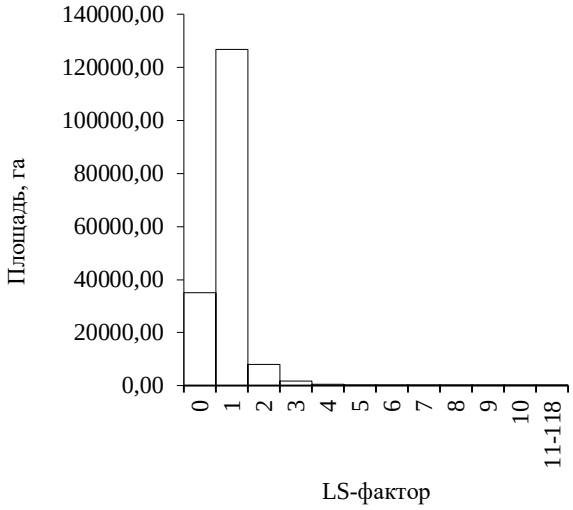


Рисунок 5 – **Классификация территории по *LS*-фактору**

Необходимо отметить, что для интерпретации результатов районирования территории по *LS*-фактору разные исследователи используют разные шкалы. Например, в исследовании [29] рассматривается следующий вариант: $LS \geq 6{,}8$ – умеренно крутой наклон; $2{,}4 \leq LS < 6{,}8$ – небольшой уклон; $0{,}4 \leq LS < 2{,}4$ – пологая местность; $0{,}2 \leq LS < 0{,}4$ – очень пологая территория. В исследовании [30] предложена иная классификация: 1 степень – значения *LS* ниже 0,42; 2 степень – значения от 0,42 до 1,39; 3 степень – значения от 1,39 до 2,22; 4 степень – значения от 2,22 до 3.12; 5 степень – значения от 3,12 до 4,02; 6 степень – значения выше 4,02. В других рассмотренных исследованиях единой классификации также не обнаружено.

Наибольший удельный вес (73,3%) имеет $LS = 1$ (на территории 126691,58 га). При этом среднее значение площади f единичного участка с этим значением фактора составляет $43{,}61 \pm 8{,}44$ га (стандартное отклонение $s = 0{,}97$). Следующими по распространенности являются значения $LS = 0$ (на территории 34984,14 га (20,2%), $f = 6{,}87 \pm 0{,}48$ га, $s = 0{,}50$) и $LS = 1$ (на территории 8095,12 га (4,7%), $f = 0{,}078 \pm 0{,}005$ га, $s = 0{,}76$). Значения *LS*-факторов 3…118 характерно для территории 3064,3 га (1,8%).

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что с увеличением значения *LS*-фактора наблюдается уменьшение площади f единичного участка. Так, при увеличении *LS* от 3 до объединенного диапазона значений 11…118 площади f составили соответственно от $0{,}018 \pm 0{,}001$ га ($s = 0{,}16$) до $0{,}0022 \pm 0{,}0003$ га ($s = 0{,}017$).

При сопоставлении цифровой модели рельефа и карты *LS*-фактора (рисунки 1б и 3) можно отметить отсутствие визуальных признаков схожести их распределения. Отсутствует четкая приуроченность более высоких отметок к более высоким значениям фактора эрозии и наоборот. В тоже время можно отметить характерный рисунок вдоль пойм крупных рек. Это подтверждается физическим смыслом *LS*-фактора, на который наибольшее влияние оказывает длина склона и уклон поверхности почвы. Необходимо также учитывать, что влияние на характер эрозии оказывают не только крупные изменения формы рельефа, но и мелкие. Последние имеют более сложные профили, состоящие из микросочетаний понижений и повышений отметок поверхности. Эта особенность проявляется в том, что на одних участках происходит смыв, а на других – аккумуляция продуктов эрозии почв. Этим объясняется характерная флуктуация *LS*-фактора (пятнистость) на рисунке 3.

Выводы

В результате исследования установлено, что для территории Коломенского городского округа характерно значение *LS*-фактора, равное 1 (73,3% площади), общий диапазон этого параметра составляет 0…118. Диапазон $LS \in [0; 3]$ характерен для 99,3% территории.

Библиографический список

1. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070) / Borrelli P. [et al.] // Proc. Natl Acad. Sci. 2020. Vol. 117. P. 21994–22001.
2. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1996. 335 с.
3. Lal P., Pimentel D. Soil erosion: A carbon sink or source? // Science. 2008. Vol. 319 (5866). P. 1040–1041.
4. Telles, T.S., Dechen, S.C.F., Souza, L.G.A., Guimarãe, M. de F. Valuation and assessment of soil erosion costs // Scientia Agricola, 2013. Vol. 70(3). P. 209–216. DOI: 10.1590/S0103-90162013000300010.
5. Yu H., Chen P., Sun Y. Analysis of the coupling and coordination between soil erosion and land use in the Northeastern black soil region of China: a case study of Lishu County // Sci Rep. 2024. Vol. 14, 21955. DOI: 10.1038/s41598-024-72782-5.
6. Li P., Zhang T., Wang X., Yu D. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China // Soil Tillage Res. 2013. Vol. 126. P. 112–118. DOI: 10.1016/j.still.2012.07.011.
7. Fang H., Zhai Y., Li C. Evaluating the impact of soil erosion on soil quality in an agricultural land, northeastern // China. Sci Rep. 2024. Vol. 14, 15629. DOI: 10.1038/s41598-024-65646-5.
8. Manda, D., Chandrakal, M., Ala, Mandal N.M., Mandal U. Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India // Catena. 2021. Vol. 204, 105440. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105440.
9. Effects of agricultural intensification on soil biodiversity and implications for ecosystem functioning: a meta-analysis / de Graaff, M.-A., Hornslein, N. [et al.] // Advances in Agronomy (ed. Sparks, D. L.). 2019. Vol. 155. P. 1–44. DOI: 10.1016/bs.agron.2019.01.001.
10. Human-triggered magnification of erosion rates in European Alps since the Bronze Age / Rapuc W., Giguet-Covex C., Bouchez J. [et al.] // Nat Commun. 2024. Vol. 15, 1246. DOI: 10.1038/s41467-024-45123-3.

11. Montgomery D. Dirt – The Erosion of Civilizations. University of California Press, 2012. DOI: 10.1525/9780520952119
12. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / Романенков Г.А. [и др.] // М.: Росинформагротех, 2008. 67с.
13. Геосистемный подход в мелиорации / С.С. Смелова // Вестник мелиоративной науки. 2022. № 2. С. 11–15. EDN IYYOES.
14. Fang H., Zhai Y., Li C. Evaluating the impact of soil erosion on soil quality in an agricultural land, Northeastern China //. Sci Rep. 2024, Vol. 14, 15629. DOI: 10.1038/s41598-024-65646-5.
15. Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях европейской части России / К.А. Мальцев, О.П. Ермолаев // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512. DOI: 10.1134/S0032180X19120104. EDN CCRHJE.
16. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // Int. J. Digital Earth. 2014. № 3(7). P. 229–250. DOI: 10.1080/17538947.2012.671380.
17. Gaatib R., Larabi A. Integrated Evaluation of Soil Erosion Hazard and Risk Management in the Oued Beht Watershed Using Remote Sensing and GIS Techniques: Impacts on El Kansra Dam Siltation (Morocco) // Journal of Geographic Information System. 2024. Vol. 6. P. 677–689. DOI: 10.4236/jgis.2014.66056.
18. Telles T.S., Fatima M., Dechen S.C.F. The costs of soil erosion // RevistaBrasileira de Ciência do Solo. 2011. Vol. 35(2). P. 287–298. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200001.
19. An integrated modeling approach for estimating monthly global rainfall erosivity / Fenta A.A., Tsunekawa A., Haregeweyn N. [et al.] // Sci Rep. 2024. Vol. 14, 8167. DOI: 10.1038/s41598-024-59019-1.
20. Water erosion sampling survey in China / B.Y. Liu, S.Y. Guo, Z.G. Li // Soil and Water Conservation in China. 2013. Vol. 10. P. 26–34.
21. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
22. Применимость универсального уравнения потерь почвы от эрозии (USLE) для условий Европейской территории России / Ю.П. Сухановский, Г. Оллеш, К.Ю. Хан [и др.] // Почвоведение. 2003. № 6. С. 733–739. EDN NCNBYB.
23. Модель дождевой эрозии почв / Ю.П. Сухановский // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1114–1125. EDN MVNVKR.
24. Suitability of S factor algorithms for soil loss estimation at gently sloped landscapes / Liu H. Fohrer N. [et al.] // Catena. 2009. DOI: 10.1016/j.catena.2009.02.001.
25. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands / Schmidt S. Tresch S. Meusburger K. // MethodsX. 2019. DOI: 10.1016/j.mex.2019.01.004.
26. Soil erosion topographic factor (LS): Accuracy calculated from different data sources / Lu S. Liu B. [et al.] // Catena. 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104334.
27. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agricultural handbook. 1978. № 537. 65 p.
28. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrol. Process. 1991. Vol. 5. P. 3–30. DOI: 10.1002/HYP.3360050103.
29. Soil Loss Mapping for Sustainable Development and Management of Land Resources in Warora Tehsil of Chandrapur District of Maharashtra: An Integrated Approach Using Remote Sensing and GIS / Nagaraju M.S. Reddy G.P. [et al.] // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2011. DOI: 10.1007/s12524-010-0055-1.
30. Geoinformation support for erosion hazard assessment of rural territories / Stolbov I.A., Bryzhko V.G., Bryzhko I.V. // InterCarto, InterGIS. 2022. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-885-90.

References in roman script

1. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070) / Borrelli P. [et al.] // Proc. Natl Acad. Sci. 2020. Vol. 117. P. 21994–22001.
2. Kuznecov M.S., Glazunov G.P. Eroziya i ohrana pochv: Uchebnik. M.: Izd-vo MGU, 1996. 335 s.
3. Lal P., Pimentel D. Soil erosion: A carbon sink or source? // Science. 2008. Vol. 319 (5866). P. 1040–1041.
4. Telles, T.S., Dechen, S.C.F., Souza, L.G.A., Guimarãe, M. de F. Valuation and assessment of soil erosion costs // Scientia Agricola, 2013. Vol. 70(3). P. 209–216. DOI: 10.1590/S0103-90162013000300010.
5. Yu H., Chen P., Sun Y. Analysis of the coupling and coordination between soil erosion and land use in the Northeastern black soil region of China: a case study of Lishu County // Sci Rep.

2024. Vol. 14, 21955. DOI: 10.1038/s41598-024-72782-5.
6. Li P., Zhang T., Wang X., Yu D. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China // Soil Tillage Res. 2013. Vol. 126. P. 112–118. DOI: 10.1016/j.still.2012.07.011.
7. Fang H., Zhai Y., Li C. Evaluating the impact of soil erosion on soil quality in an agricultural land, northeastern // China. Sci Rep. 2024. Vol. 14, 15629. DOI: 10.1038/s41598-024-65646-5.
8. Manda, D., Chandrakal, M., Ala, Mandal N.M., Mandal U. Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India // Catena. 2021. Vol. 204, 105440. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105440.
9. Effects of agricultural intensification on soil biodiversity and implications for ecosystem functioning: a meta-analysis / de Graaff, M.-A., Hornslein, N. [et al.] // Advances in Agronomy (ed. Sparks, D. L.). 2019. Vol. 155. P. 1–44. DOI: 10.1016/bs.agron.2019.01.001.
10. Human-triggered magnification of erosion rates in European Alps since the Bronze Age / Rapuc W., Giguet-Covex C., Bouchez J. [et al.] // Nat Commun. 2024. Vol. 15, 1246. DOI: 10.1038/s41467-024-45123-3.
11. Montgomery D. Dirt – The Erosion of Civilizations. University of California Press, 2012. DOI: 10.1525/9780520952119
12. Problemy degradacii i vosstanovleniya produktivnosti zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya v Rossii / Romanenkov G.A. [i dr.] // M.: Rosinformagrotekh, 2008. 67s.
13. Geosistemnyj podhod v melioracii / S.S. Smelova // Vestnik meliorativnoj nauki. 2022. № 2. S. 11–15. EDN IYYOES.
14. Fang H., Zhai Y., Li C. Evaluating the impact of soil erosion on soil quality in an agricultural land, Northeastern China //. Sci Rep. 2024, Vol. 14, 15629. DOI: 10.1038/s41598-024-65646-5.
15. Potencial'nye erozionnye poteri pochvy na pahotnyh zemlyah evropejskoj chasti Rossii / K.A. Mal'cev, O.P. Ermolaev // Pochvovedenie. 2019. № 12. S. 1502–1512. DOI: 10.1134/S0032180X19120104. EDN CCRHJE.
16. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // Int. J. Digital Earth. 2014. № 3(7). P. 229–250. DOI: 10.1080/17538947.2012.671380.
17. Gaatib R., Larabi A. Integrated Evaluation of Soil Erosion Hazard and Risk Management in the Oued Beht Watershed Using Remote Sensing and GIS Techniques: Impacts on El Kansra Dam Siltation (Morocco) // Journal of Geographic Information System. 2024. Vol. 6. P. 677–689. DOI: 10.4236/jgis.2014.66056.
18. Telles T.S., Fatima M., Dechen S.C.F. The costs of soil erosion // RevistaBrasileira de Ciência do Solo. 2011. Vol. 35(2). P. 287–298. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200001.
19. An integrated modeling approach for estimating monthly global rainfall erosivity / Fenta A.A., Tsunekawa A., Haregeweyn N. [et al.] // Sci Rep. 2024. Vol. 14, 8167. DOI: 10.1038/s41598-024-59019-1.
20. Water erosion sampling survey in China / B.Y. Liu, S.Y. Guo, Z.G. Li // Soil and Water Conservation in China. 2013. Vol. 10. P. 26–34.
21. Liseckij F.N., Svetlichnyj A.A., CHernyj S.G. Sovremennye problemy eroziovedeniya. Belgorod: Konstanta, 2012. 456 s.
22. Primenimost' universal'nogo uravneniya poter' pochvy ot erozii (USLE) dlya uslovij Evropejskoj territorii Rossii / YU.P. Suhanovskij, G. Ollesh, K.YU. Han [i dr.] // Pochvovedenie. 2003. № 6. S. 733–739. EDN NCNBYB.
23. Model' dozhdevoj erozii pochv / YU.P. Suhanovskij // Pochvovedenie. 2010. № 9. S. 1114–1125. EDN MVNVKR.
24. Suitability of S factor algorithms for soil loss estimation at gently sloped landscapes / Liu H. Fohrer N. [et al.] // Catena. 2009. DOI: 10.1016/j.catena.2009.02.001.
25. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands / Schmidt S. Tresch S. Meusburger K. // MethodsX. 2019. DOI: 10.1016/j.mex.2019.01.004.
26. Soil erosion topographic factor (LS): Accuracy calculated from different data sources / Lu S. Liu B. [et al.] // Catena. 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104334.
27. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agricultural handbook. 1978. № 537. 65 r.
28. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrol. Process. 1991. Vol. 5. P. 3–30. DOI: 10.1002/HYP.3360050103.
29. Soil Loss Mapping for Sustainable Development and Management of Land Resources in Warora Tehsil of Chandrapur District of Maharashtra: An Integrated Approach Using Remote Sensing and GIS / Nagaraju M.S. Reddy G.P. [et al.] // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2011. DOI: 10.1007/s12524-010-0055-1.

30. Geoinformation support for erosion hazard assessment of rural territories / Stolbov I.A., Bryzhko V.G., Bryzhko I.V. // InterCarto, InterGIS. 2022. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-885-90.

Сведения об авторе

Зверьков Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»; пос. Радужный, д. 38, Коломенский городской округ, Московская обл., Россия, 140483;
ORCiD: 0000-0002-8348-4391; SPIN: 3320-7752.

Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов.
Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Финансирование. Работы выполнены в рамках Государственного задания Минсельхоза России № 082-00053-24-00.

Для цитирования: Зверьков М.С. Картографирование территории по *LS*-фактору эрозии с использованием геоинформационной системы и цифровой модели рельефа // Экология и строительство. 2024. № 4. С. 30–37. doi: 10.35688/2413-8452-2024-04-004.

Information about the author

Zverkov Mikhail Sergeevich

candidate of technical sciences, leading researcher; Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga»; Raduzhnyj, 38, Kolomna, Moscow region, Russia, 140483;
ORCiD: 0000-0002-8348-4391; SPIN: 3320-7752.

The author declares that there are no conflicts of interest.
Editorial opinion may not coincide with the opinion of the author.

Funding. The work was carried out under the State task of the Ministry of Agriculture of Russia № 082-00053-24-00.

For citations: Zverkov M.S. Mapping of the territory by the *LS* erosion factor using a geoinformation system and a digital terrain model // Ekologiya i stroitelstvo. 2024. № 4. P. 30–37. doi: 10.35688/2413-8452-2024-04-004.