

Научная статья

Original article

УДК 631.559:528.8

doi: https://doi.org/10.55186/2413046X_2026_11_6_86

edn: SFQCAZ

**К ВОПРОСУ О СНИЖЕНИИ УРОЖАЙНОСТИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ЭРОДИРОВАННЫХ
ЗЕМЛЯХ**

TO THE ISSUE OF REDUCING CROP YIELDS ON ERODED LANDS



Зверьков Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», (пос. Радужный, д. 38, Коломна, Московская обл., Россия, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8348-4391>, e-mail: rad_sc@bk.ru

Смелова Светлана Станиславовна, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт «Радуга» (пос. Радужный, д. 38, Коломна, Московская обл., Россия, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1717-0026>

Мазурова Ирина Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБНУ «ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», (пос. Радужный, д. 38, Коломна, Московская обл., Россия, 140483)

Zverkov Mikhail Sergeevich, candidate of technical sciences, leading researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Raduzhny village, 38, Kolomna, Moscow region, Russia, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8348-4391>, e-mail: rad_sc@bk.ru

Svetlana Stanislavovna Smelova, candidate of biological sciences, associate professor, senior researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Raduzhny village, 38, Kolomna, Moscow region, Russia, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1717-0026>

Mazurova Irina Sergeevna, junior researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Raduzhny village, 38, Kolomna, Moscow region, Russia, 140483)

Аннотация. Цель настоящей работы заключалась в оценке экономических показателей снижения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от ежегодной вероятности превышения (обеспеченности) площади эродированных почв. Проведенные исследования позволяют использовать полученные результаты для прогноза возможной величины снижения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от степени эрозии почв. Это особенно важно при планировании рентабельного растениеводства на эродированных землях. Результаты исследований могут быть использованы для расчета экономических рисков производства в зависимости от величины недобора урожая сельскохозяйственных культур.

Abstract. The purpose of this work was to assess the decrease in crop yields depending on the annual probability of excess of the area of development of soil erosion. The performed studies make it possible to use the results to predict the possible value of crop yield reduction depending on the development of soil erosion. This is especially important when planning cost-effective crop production on eroded land. The research results can be used to calculate the economic risks of production depending on the amount of crop yield shortfall.

Ключевые слова: эрозия почв, потери урожайности, сельскохозяйственные культуры, вероятность превышения

Keywords: soil erosion, yield losses, crops, probability of excess

Введение Актуальность исследований обусловлена тем обстоятельством, что в России более 70 % всех сельскохозяйственных угодий и около 80 % пашни расположены в зонах недостаточного или неустойчивого увлажнения атмосферными осадками, с часто повторяющимися засухами и суховеями, деградационными процессами природного и антропогенного генезиса, резко снижающими урожайность и валовые сборы сельскохозяйственной продукции. Одним из таких процессов является эрозия почв. Для своевременного контроля и выявления рисков возникновения эрозионных процессов и, как следствие, ухудшения мелиоративного состояния сельскохозяйственных земель, требуется обоснование и разработка аналитического метода оценки с использованием инструментов дистанционного зондирования Земли.

Цель настоящей работы заключалась в оценке экономических показателей снижения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от ежегодной вероятности превышения (обеспеченности) площади развития эрозии почв.

Материалы и методы исследования Для расчета урожайности сельскохозяйственных культур использована известная модель А.А. Ничипоровича – зависимость абсолютно сухой растительной массы Y_{FAR} от количества приходящей фотосинтетически активной солнечной радиации за период вегетации культуры в данном регионе. Полученное значение Y_{FAR} приводилось к величине урожайности стандартной влажности $Y_{\text{ст.вл.}}$ по зависимости [1]. Данные о севообороте собраны авторами в 2024 и 2025 г. в результате полевой работы на участках, расположенных в Коломенском городском округе Московской области. Общая площадь обследованных участков составила 65275,90 га (3128 контуров полей). Из них по 24841,41 га (37,9%) в 2024 году и 26345,51 га (40,3%) в 2025 г. собраны сведения о возделываемой культуре и факте использования (соответственно 1115 и 1229 контуров полей). Прогноз урожайности Y_{NDVI} выполнялся по значениям

вегетационного спектрального индекса NDVI по спутниковым данным Sentinel-2 по методике [13, 14]. Вычисления выполнялись с помощью растрового калькулятора. Использовалась система координат WGS 84. Обобщенная оценка урожайности Y_k выполнена в зерновых единицах по методике [2]. Общая методология оценки вышеперечисленных показателей приведена в [3].

Все сводные параметры определялись по общепринятым методикам статистических тестов, в которых оценивалась медиана *median*, среднее *mean*, минимальное и максимальное значения *min* и *max* соответственно, *SE* – стандартная ошибка, *SD* – стандартное отклонение. В статье приведены статистически значимые результаты ($p \leq 0,05$).

Влияние рельефа на интенсивность эрозии почвы оценивается с помощью безразмерного топографического *LS*-фактора. Этот параметр учитывает влияние длины склона L и его градиент (уклон) S . Использование этого параметра в разные годы описано во многих работах, например, в [4, 5]. Для его расчета в среде программы SagaGIS для цифровой модели рельефа применялись алгоритмы расчета по моделям Wischmeier W.H. и Smith D.D. [6] (далее – W&S) и Moore I.D. и Nieber J.L. [7] (далее – M&N). Результат создания растра *LS*-фактора по модели W&S имеет следующую статистику: *mean* = 0,64, *max* = 10,44, *min* = 0,008, коэффициент вариации 0,21, *SD* = 0,46, *SE* = 0,18. Результат создания растра *LS*-фактора по модели M&N имеет следующую статистику: *mean* = 0,72, *max* = 7,02, *min* = 0,00, коэффициент вариации 0,15, *SD* = 0,39, *SE* = 0,32.

Для оценки площадей эродированных почв F_e использовались инструменты анализа векторных полигонов в системе QGIS. При этом интенсивность эрозионных процессов в зависимости от обеспеченности R -фактора эрозионного потенциала дождевых осадков устанавливалась по пересмотренному универсальному уравнению потерь почвы RUSLE [8, 9]. На участках площадью F_e в зависимости от вероятности превышения

(обеспеченности) сценария развития эрозии оценивались величины недобора урожая в зерновых единицах $Y_k(F_e)$. Данная величина может быть использована при прогнозах недобора урожая в зависимости от предполагаемого уровня эрозии почв. На рисунке 1 приведен алгоритм исследования, описанного выше.



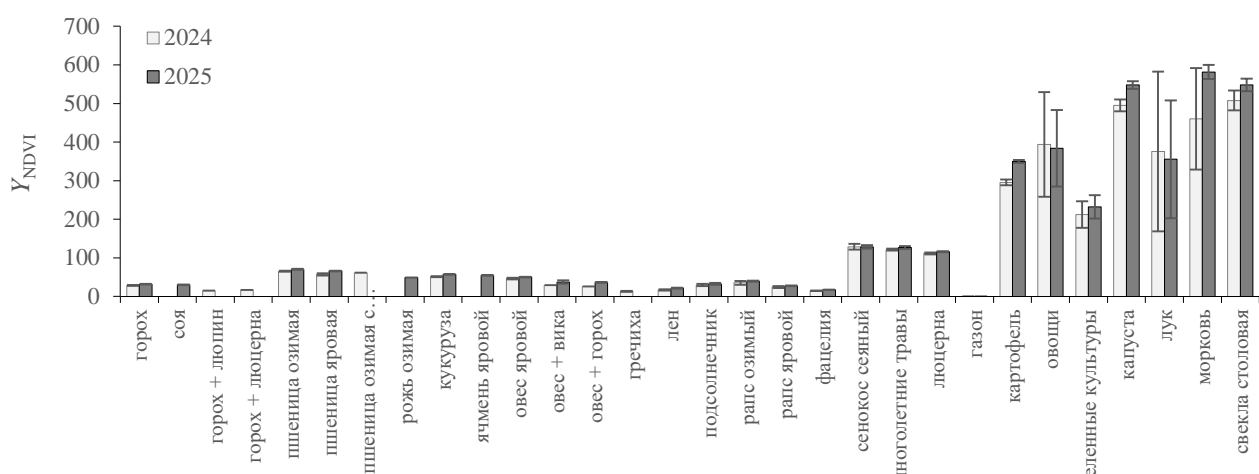
Рисунок 1 – Алгоритм исследования

В настоящем исследовании под риском эрозии понимается моделируемый сценарий развития эрозионных процессов недопустимой интенсивности более 1,5...2,0 т/га в год (для почв региона исследований) [10, 11], приводящий к возможной потере урожая сельскохозяйственных культур. Приняты следующие уровни обеспеченности риска развития эрозии: 5, 25, 50, 75, 95% вероятности.

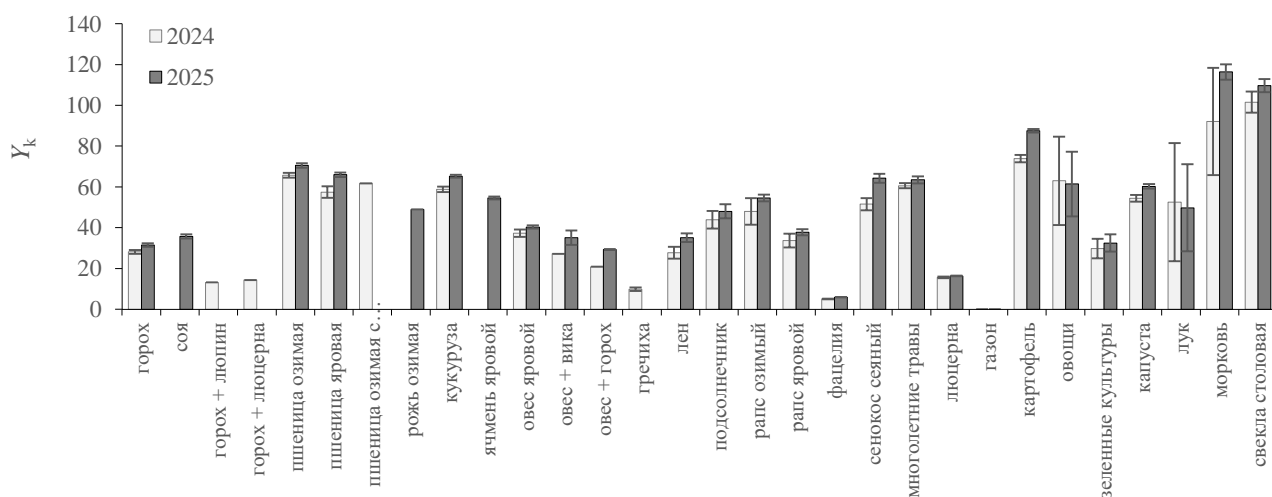
Результаты исследований и их обсуждение. На рисунке 2 приведены гистограммы оценки урожайности сельскохозяйственных культур Y_{NDVI} и в пересчете на зерновые единицы Y_k . На рисунке 2б видно, что урожайность в зерновых единицах в 2024 г. для всех культур имеет более однородную структуру гистограммы, чем в 2024 г.

Коэффициенты вариации выборок соответствующих групп до и после перевода урожая в зерновые единицы остались в основном на прежнем уровне 0,01...0,18. Медиана средних значений урожайности в зерновых

единицах по всем культурам в севообороте 2024 года с коэффициентом вариации 0,12 составила ${}^{24}Y_k = 45,87 \pm 2,77$ ц/га ($SE = 0,75$, $SD = 5,54$), $min = 33,36$ ц/га и $max = 54,73$ ц/га. Медиана средних значений урожайности в зерновых единицах по всем культурам в севообороте 2025 года с коэффициентом вариации 0,05 составила ${}^{24}Y_k = 49,76 \pm 1,31$ ц/га ($SE = 0,54$, $SD = 2,60$), $min = 43,35$ ц/га и $max = 55,88$ ц/га. На этом основании можно сделать вывод, что сезон 2025 года был более урожайным на 8,4% по сравнению с сезоном 2024 г. в пересчете на зерновые единицы.



А



Б

Рисунок 2 – Урожайность, оцененная по NDVI – Y_{NDVI} (А), и в пересчете на зерновые единицы – Y_k (Б)

На рисунке 3 показаны результаты прогноза недобора (потери) урожая в зерновых единицах $^{24}Y_k(F_e)$ и $^{25}Y_k(F_e)$ соответственно в 2024 и 2025 гг. в зависимости от обеспеченности уровня потенциальной опасности эрозии A по пересмотренному универсальному уравнению потерь почвы RUSLE.

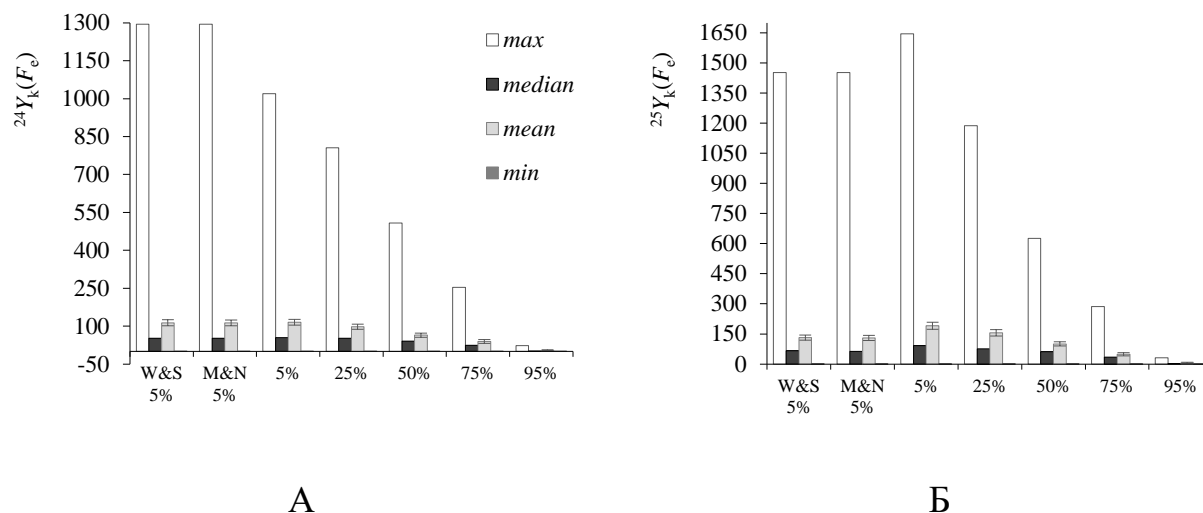


Рисунок 3 – Потери урожая различной обеспеченности в зависимости от расчетного случая потенциальной опасности эрозии в 2024 (А) и 2025 (Б) гг.: $^{W\&S}Y_k(F_e)_{5\%}$ – 5% вероятности превышения по модели Wischmeier W.H. и Smith D.D.; $^{M\&N}Y_k(F_e)_{5\%}$ – 5% вероятности превышения по моделям Moore I.D. и Nieber J.L.; $Y_k(F_e)_{5\%}$, $Y_k(F_e)_{25\%}$, $Y_k(F_e)_{50\%}$, $Y_k(F_e)_{75\%}$, $Y_k(F_e)_{95\%}$ – соответственно 5, 25, 50, 75 и 95% вероятности превышения расчетного значения эрозионного потенциала осадков по метеорологическим наблюдениям.

Величина потери урожая зависит от площади вероятного развития эрозионных процессов. Наиболее высокие потери характерны для случаев 5% вероятности превышения. Необходимо отметить, что расчетные случаи по моделям Wischmeier W.H. и Smith D.D. и Moore I.D. и Nieber J.L. дали примерно одинаковый уровень потерь в 2024 и 2025 гг. при сравнении между собой. Так, в 2024 г. фиксируется уровень потерь соответственно $^{24,W\&S}Y_k(F_e)_{5\%} = 113,38 \pm 11,91$ т ($SE = 6,07$, $SD = 155,18$) и $^{24,M\&N}Y_k(F_e)_{5\%} = 113,01 \pm 11,70$ т ($SE = 5,96$, $SD = 154,01$). Максимальные потери 5% вероятности превышения в 2024 г. относятся к расчетному случаю с

использованием эрозионного потенциала осадков по метеорологическим наблюдениям: $Y_k(F_e)_{5\%} = 115,27 \pm 11,65$ т ($SE = 5,93$, $SD = 147,35$). При этом максимальные значения максимумов *max* выборок равны 1294,19 т и относятся к результатам по моделям Wischmeier W.H. и Smith D.D. и Moore I.D. и Nieber J.L. Кроме того, для этих моделей характерно и большее число угодий, на которых могут развиваться последствия эрозии 5% обеспеченности (654 и 668 участков соответственно, 617 – с расчетом R-фактора по метеорологическим наблюдениям).

С увеличением уровня обеспеченности расчетного случая с 25% до 95% потери урожая уменьшаются соответственно с $97,73 \pm 10,50$ т ($SE = 5,34$, $SD = 118,74$) до $4,53 \pm 2,09$ т ($SE = 1,02$, $SD = 5,39$) с одновременным уменьшением числа участков соответственно с 494 до 28 с критическим уровнем эрозии.

В 2025 г. фиксируется уровень потерь урожая в зерновых единицах выше, чем в 2024 г., соответственно $^{25,W\&S}Y_k(F_e)_{5\%} = 132,02 \pm 12,37$ т ($SE = 6,30$, $SD = 171,43$) и $^{25,M\&N}Y_k(F_e)_{5\%} = 129,98 \pm 12,15$ т ($SE = 6,19$, $SD = 170,25$). Максимальные потери 5% вероятности превышения в 2025 г. также, как и в 2024 г., относятся к расчетному случаю с использованием эрозионного потенциала осадков по метеорологическим наблюдениям: $Y_k(F_e)_{5\%} = 190,35 \pm 17,85$ т ($SE = 9,09$, $SD = 241,72$). Недопустимые эрозионные потери почвы и, как следствие, потери урожая, фиксируются на большем, чем в 2024 г. количестве участков по моделям Wischmeier W.H. и Smith D.D., Moore I.D. и Nieber J.L. и метеорологическим наблюдениям – соответственно на 740, 757 и 707 участках (в среднем на 88 участков больше). При этом максимальные значения максимумов *max* выборок равны 1645,42 т и относятся (в отличии от 2024 г.) к результатам по расчетному случаю с использованием эрозионного потенциала осадков по метеорологическим наблюдениям.

С увеличением уровня обеспеченности расчетного случая с 25% до 95% потери урожайности уменьшаются соответственно с $155,78 \pm 15,68$ т ($SE =$

7,98, $SD = 191,26$) до $5,84 \pm 2,81$ т ($SE = 1,37$, $SD = 7,11$) с одновременным уменьшением числа участков соответственно с 574 до 27 с критическим уровнем эрозии.

Эмпирические кривые обеспеченности потери урожая от развития эрозионных процессов приведены на рисунке 4. Аппроксимация кривых выполнена по значениям *mean* и *median* по линейной зависимости в логарифмической шкале. Коэффициенты детерминации R^2 лежат в пределах 0,92...0,99 (достаточно высокие) и объясняют всю дисперсию случайной величины.

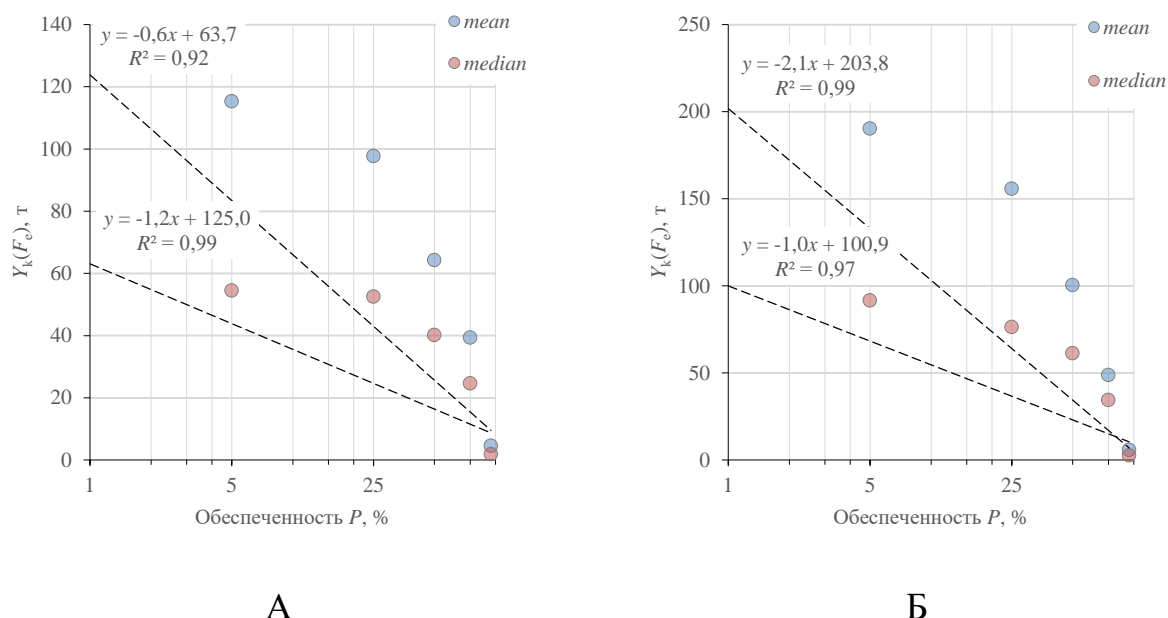


Рисунок 4 – Семейство эмпирических кривых обеспеченности потенциальной потери урожая на эродированных землях по математическому ожиданию *mean* и *median*

Выводы. Выполненные исследования позволяют использовать полученные результаты для прогноза возможной величины снижения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от развития эрозии почв. Это особенно важно при планировании рентабельного растениеводства на эродированных землях. Результаты исследований могут

быть использованы для расчета экономических рисков производства в зависимости от величины недобора урожая сельскохозяйственных культур.

Список источников

1. Gao B. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58. No. 3. pp. 257-266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
2. Прогноз урожайности в зерновых единицах с помощью геоинформационной системы для оценки эффективности реализации проектов мелиорации / М.С. Зверьков, И.С. Мазурова // *Московский экономический журнал*. 2025. Т. 10, № 12. С. 404-420. doi: 10.55186/2413046X_2025_10_12_295.
3. Провести исследования и выполнить оценку снижения урожайности сельскохозяйственных культур на мелиорируемых землях, подверженных эрозионным процессам, с помощью методов дистанционного зондирования и оперативного мониторинга / отчет о НИР; № гос. рег. 224013100558-1; № гос. задания № 082-00079-23-01; Коломна, ФГБНУ ВНИИ «Радуга», 2023. 112 с.
4. 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.
5. 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.
6. Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537: US Department of Agriculture, Washington DC.
7. Moore, I.D., Nieber, J.L. (1991): Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution. *J. Minnesota Acad. Sci.*, 55, 18-25.

8. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe / Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C. et. al. // *Environmental Science and Policy*. 2015. Vol. 54, P. 438–447. doi: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.
9. Quantification of Soil–Water Erosion Using the RUSLE Method in the Mékrou Watershed (Middle Niger River) / Attoubounou R.A.; Diawara H.; Ludwig R.; Adoukpe J. // *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*. 2025. Vol. 14. P. 28. doi: 10.3390/ijgi14010028.
10. Эрозия и охрана почв: уч. для вузов / М.С. Кузнецов, Г.П. Глазунов. М.: Юрайт, 2026. 387 с.
11. Методические указания по определению опасного уровня водной и ветровой эрозии / Г.Т. Балакай, Н.И. Балакай, А.Н. Бабичев, Л.А. Воеводина, Л.И. Юрина : методич. ук. Новочеркасск, ФГБНУ «РосНИИПИМ», 2015. 23 с.

References

1. Gao B. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58. No. 3. pp. 257-266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
2. Prognoz urozhainosti v zernovykh edinitsakh s pomoshch'yu geoinformatsionnoi sistemy dlya otsenki ehffektivnosti realizatsii proektov melioratsii / M.S. Zver'kov, I.S. Mazurova // *Moskovskii ehkonomicheskii zhurnal*. 2025. T. 10, № 12. S. 404–420. doi: 10.55186/2413046X_2025_10_12_295.
3. Provesti issledovaniya i vypolnit' otsenku snizheniya urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na melioriruemykh zemlyakh, podverzhennykh ehrozionnym protsessam, s pomoshch'yu metodov distantsionnogo zondirovaniya i operativnogo monitoringa / otchet o NIR; № gos. reg. 224013100558-1; № gos. Zadaniya № 082-00079-23-01; Kolomna, FGBNU VNII «Raduga», 2023. 112 s.
4. 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.
5. 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.

6. Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537: US Department of Agriculture, Washington DC.
7. Moore, I.D., Nieber, J.L. (1991): Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution. J. Minnesota Acad. Sci., 55, 18-25.
8. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe / Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C. et. al. // Environmental Science and Policy. 2015. Vol. 54, P. 438–447. doi: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.
9. Quantification of Soil–Water Erosion Using the RUSLE Method in the Mékrou Watershed (Middle Niger River) / Attoubounou R.A.; Diawara H.; Ludwig R.; Adoukpe J. // ISPRS Int. J. Geo-Inf.. 2025. Vol. 14. P. 28. doi: 10.3390/ijgi14010028.
10. Ehroziya i okhrana pochv: uch. dlya vuzov / M.S. Kuznetsov, G.P. Glazunov. M.: Yurait, 2026. 387 s.
11. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu opasnogo urovnya vodnoi i vetrovoi ehrozii / G.T. Balakai, N.I. Balakai, A.N. Babichev, L.A. Voevodina, L.I. Yurina : metolich. uk. Novocherkassk, FGBNU «RosNIIPM», 2015. 23 s.

© Зверьков М.С., Смелова С.С., Мазурова И.С., 2026. Московский
экономический журнал, 2026, № 6.