

П.Н. Проездов, Д.В. Есков, А.В. Розанов, С.В. Свиридов

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА И ЭРОЗИИ
ПОД ВЛИЯНИЕМ УГОДИЙ И ЛЕСНЫХ ПОЛОС
НА ЮЖНОМ ЧЕРНОЗЕМЕ
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ ПРИЕМОВ**

Введение. Защитные лесные насаждения составляют основу лесоаграрных ландшафтов, что является одним из положений современной концепции защитного лесоразведения [Кулик и др., 2015]. Эти насаждения, являясь малоизмененными натурными объектами, обеспечивают возможность создания единой устойчивой структуры иерархического лесоаграрного ландшафта для экологической адаптации к ней сельскохозяйственного землепользования [Кулик и др., 2015; Кузник и др., 1974; Proezdov и др., 2021]. Определены особенности эколого-мелиоративного влияния лесных полос на прилегающие поля заключающиеся в снижении поверхностного стока, накоплении почвенной влаги, сокращении эрозии [Кузник и др., 1974; Proezdov и др., 2021; Петелько и др., 2018; Балакай и др., 2016]. За рубежом термин «агролесомелиорация» отождествлен с более широким понятием «агролесоводство». Системы агrolесоводства являются одним из самых известных средств обеспечения существования и устойчивого развития коренных народов (Индия) [Parihaag и др., 2015]. В США защитные свойства лесов рассматриваются агrolесоводством: на равнинах применяют ветрозащитные лесные полосы, на склонах пастбищезащитные насаждения без фактического исследования противоэрозионной роли насаждений [Agrawal и др., 2014].

Цель исследования – установление закономерностей формирования стока и эрозии под влиянием лесных полос, сельскохозяйственных угодий и леса для обоснования комплекса противоэрозионных приемов.

Объект и методика исследования. Объект исследования находится в степи Приволжской возвышенности в хозяйстве «Вязовское» Татищевского района Саратовской области, являющимся научно-производственным стационаром кафедры лесного хозяйства и ландшафтного строительства Вавиловского университета (рис. 1).

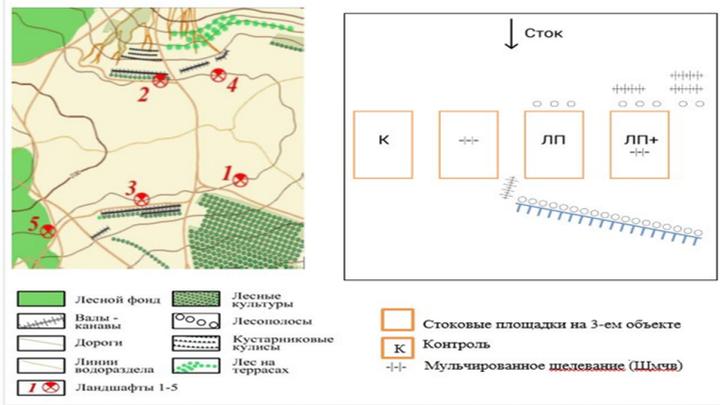


Рис. 1. Схема опыта в фермерском хозяйстве «Вязовский» с комплексом противозерозивных приемов

Fig. 1. Scheme of experience in the farm «Vyazovsky» with a complex of anti-erosion techniques

На объекте 3 межполосное пространство осваивалось в течение 1964–2022 гг. под кормовые и полевые севообороты с применением отвальной и безотвальной технологии возделывания культур и под пастбище для поддержания земледелия на допустимом уровне эрозии. Крутизна склона в межполосном пространстве $4,5^{\circ}$. В проведении исследований использовалась совокупность методов, применяемых в гидрометрии, гидрологии, агролесомелиорации, эрозиоведении, опираясь на рекомендации ученых Государственного гидрологического института [Боголюбова и др., 1975; Рождественский, 2005], ВНИАЛМИ [Павловский, Долгилевич, 1985]. Снег замерялся накануне таяния прибором ВС-43 на стоковых площадках и ландшафтах с одновременным фиксированием промерзания почвогрунта по наличию кристаллов льда в пробах буром Н.А. Качинского. Для фиксации ливней применялся плувиограф. Сток измерялся водосливами с тонкой стенкой (трапецидальными и треугольными). Смыв почвы фиксировался методом расход-мутность, используя обеззоленные фильтры, и по водороидам [Боголюбова и др., 1975]. Для построения графиков вероятности превышения гидрологической величины (модуля стока) применяли специальную клетчатку для кривых с умеренной асимметрией [Рождественский, 2005].

Регрессионно-корреляционный анализ выполнен согласно типовым компьютерным программам Statistika, MS Excel.

Результаты исследования, обсуждение. Теоретический аспект содержания почв на допустимом уровне эрозии на сельскохозяйственных угодьях заключается в использовании аналитико-эмпирического метода, на основе которого построены множественные регрессии:

$$k_v = b_0 + b_1 h_v + b_2 q_v + b_3 B_v + b_4 h_v q_v + b_5 h_v B_v + b_6 q_v B_v + b_7 h_v q_v B_v, \quad (1)$$

$$E_v = b_0 + b_1 k_v + b_2 q_v + b_3 B_v + b_4 k_v q_v + b_5 k_v B_v + b_6 q_v B_v + b_7 k_v q_v B_v, \quad (2)$$

$$k_l = b_0 + b_1 h_l + b_2 q_l + b_3 B_l + b_4 h_l q_l + b_5 h_l B_l + b_6 q_l B_l + b_7 h_l q_l B_l, \quad (3)$$

$$E_l = b_0 + b_1 k_l + b_2 q_l + b_3 B_l + b_4 k_l q_l + b_5 k_l B_l + b_6 q_l B_l + b_7 k_l q_l B_l, \quad (4)$$

где h_v – весенний сток, мм; k_v – коэффициент весеннего стока; q_v – модуль весеннего стока, л/с-га; B_v, B_l – степень защищенности почвы от эрозии угодьями соответственно при весенних половодьях (числитель) и ливневых паводках (знаменатель): зябь безотвальная, культуры, пастбище – 0,2/0,2; зябь отвальная, пар чистый – 0,05/0,05; Лес, лесные полосы – 0,9/0,9; k_l – коэффициент ливневого стока; h_l – ливневый сток, мм; q_l – модуль ливневого стока, л/с-га; b_0 – b_7 – коэффициенты множественной регрессии.

Элементы водного баланса и эрозия почв за весенние половодья и ливневые паводки под влиянием лесных полос, сельскохозяйственных и лесных угодий претерпевают значительные изменения (табл.1). Водные запасы снега увеличиваются под воздействием леса и лесных полос по сравнению с сельскохозяйственными угодьями в среднем за 59 лет наблюдений на 78,0–208,6%, причем с тенденцией большего повышения в малоснежные зимы: например, в очень малоснежную зиму 2019–2020 гг. увеличение составило в 2,2 раза, а в многоснежную зиму 2018–2019 гг. – на 15,3% [Proezdov et al., 2021]. Агролесоландшафты накапливают снега на 36,0% больше, чем агроландшафты. Поверхностный сток, коэффициент и модуль стока за весенние половодья и ливневые паводки под влиянием леса и лесных полос по сравнению с сельскохозяйственными угодьями уменьшаются в 5,1–31,0 раз, причем наибольшее снижение характерно для модуля стока (табл. 1).

Формирование ливневого стока и эрозии скоротечно по сравнению с весенним половодьем, первые продолжаются в течение нескольких часов и даже минут, тогда как вторые длятся несколько суток, иногда более месяца. Исследования показали, что величина ливневого стока уступает весен-

нему половодью в зависимости от вида угодий в 1,5–2,2 раза. Коэффициент и модуль стока, наоборот, при дождевых паводках превалирует над талыми водами в 1,5–1,9 раза. Значения модуля стока необходимы при проектировании и строительстве сбросных противозэрозионных объектов: быстротоков, шахтных водосбросов, водосливов и др. (табл. 1, рис. 2) [Рождественский, 2005].

Таблица 1

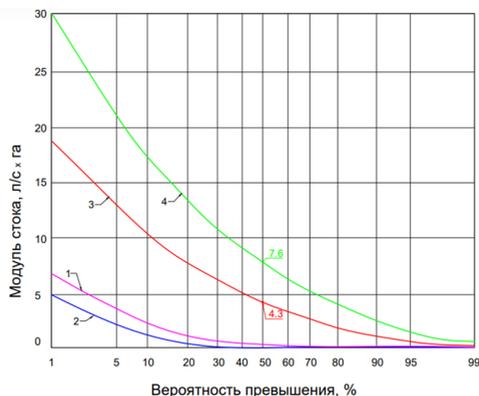
**Элементы водного баланса и эрозия на угодьях и ландшафтах
(в среднем за 1964–2022 гг.)**

**Elements of water balance and erosion on land and landscapes
(on average for 1964–2022)**

Наименование угодий и ландшафтов	Степень защитности почвы угодьями, снег/ ливень	Весеннее половодье					Ливневый паводок					Эрозия * весенняя + ливневая, т/га
		Снегозапасы, мм	Сток, мм	Коэффициент стока	Модуль стока, л/с-га	Эрозия, т/га	Сток, мм	Коэффициент стока	Модуль стока, л/с-га	Эрозия, т/га		
Зябь безотвальная, культуры, пастбище	0,2/0,2	82	22	0,27	4,1	1,01 (4,8)	10	0,42	6,2	1,50 (15,0)	2,51 (7,8)	
Зябь отвальная, пар чистый	0,05/0,05	70	17	0,24	2,9	1,93 (11,4)	11	0,46	5,3	3,30 (30,0)	5,23 (18,7)	
Лесной ландшафт (лес), лесные полосы	0,9/0,9	127	3	0,02	0,8	0,05 (1,7)	1	0,04	0,2	0,02 (2,0)	0,07 (1,8)	
Агроландшафт	0,1/0,1	75	31	0,41	4,3	5,10 (16,4)	10	0,24	7,6	5,80 (58,0)	10,9 26,6	
Агролесоландшафт	0,9/0,9	102	4	0,04	0,5	0,11 (2,8)	3	0,04	0,1	0,18 (6,0)	0,29 (4,1)	

*Эрозия допустимая – 0,3 т/га [3]; Ливневые осадки со стоком вероятностью превышения 50% – 24 мм; В скобках – мутность стока, г/л.

Модуль стока воды вероятностью превышения 10% [Рождественский, 2005] для строительства сбросного сооружения составляет 17 л/с-га, или 1,7 м³/с-км² (рис. 2). Важными гидрологическими показателями в расчетах противозэрозионных приемов являются максимальный суточный сток и суточная эрозия на угодьях и ландшафтах (табл. 2) [Рождественский, 2005]. Весенний максимальный суточный слой стока составляет: зяби безотвальной, пастбище, озимых – до 31 мм, (до 33% от общего слоя за весеннее половодье); зяби отвальной – 3,8 мм (41%); леса – 1,8 мм (22%).



Модуль весеннего (1) и ливневого стока (2) с лесного ландшафта
 Модуль весеннего (3) и ливневого стока (4) с агроландшафта

Рис. 2. Вероятность превышения модулей весеннего и ливневого стока с ландшафтов

Fig. 2. Probability of excess of spring and storm runoff modules from landscapes

Ливневый максимальный суточный сток меньше по сравнению с весенним и составляет: на культурах, пастбище, чистых парах – до 12 мм (до 70–82% от общего слоя). Наибольшая суточная эрозия наблюдалась на зяби отвальной за весеннее половодье и чистых парах за ливневые паводки (табл. 2).

Таблица 2

Максимальные показатели стока и эрозии на угодьях и ландшафтах за 1964–2022 гг.

Maximum indicators of runoff and erosion on land and landscapes for 1964–2022

Наименование угодий и ландшафтов	Весеннее половодье		Ливневый паводок	
	максимальный суточный сток, мм	максимальная суточная эрозия, т/га	максимальный суточный сток, мм	максимальная суточная эрозия, т/га
Зябь безотвальная, культуры, пастбище	31	1,19	12	1,34
Зябь отвальная, пар чистый	12	2,37	7	3,03
Лес, лесные полосы	7	0,05	1	0,01
Агроландшафт	20	3,43	14	4,02
Агролесоландшафт	15	0,21	6	0,08

Эрозионные процессы должны учитываться на заилении проти-
воэрозионных объектов: водозадерживающих валов, прудов, водосбро-
сов и др.

Необходимо отметить, что допустимых размеров эрозии 0,3 т/га для почв $A+B < 0,5$ м [Proezdov et al., 2021] можно достигнуть, приме-
няя безотвальную обработку между контурными лесными полосами. Вспашка с оборотом пласта требует дополнительных агролесоме-
лиоративных приемов, например, мульчированного щелевания [Proezdov et al., 2021].

Поверхность откликов для предложенных регрессионных моделей (1,2, 3,4) представляют собой сложные многомерные образования. Соот-
ветствующие гиперповерхности на плоскости изобразить невозможно, поэтому для отображения их особенностей построены отдельные трех-
мерные сечения. Регрессионно-корреляционный анализ зависимостей весенней и ливневой эрозии от коэффициента и модуля стока под влиянием
защищенности почвы от эрозии лесными полосами, сельскохозяйственными угодьями и лесом отмечает тесную связь между изучаемыми пока-
зателями: коэффициенты детерминации составляют: $R^2 = 0,82$, $R^2 = 0,96$ (рис. 3, 4).

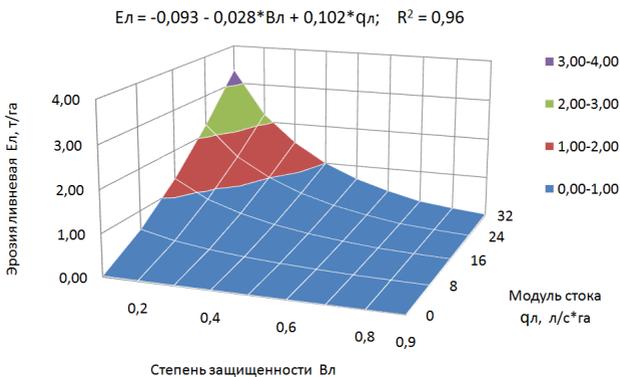


Рис. 3. Зависимость ливневой эрозии от модуля стока и степени защищенности и модуля стока почвы угодьями и лесными полосами

Fig. 3. Dependence of storm erosion on the runoff modulus and the degree of protection and modulus of soil runoff by land and forest strips

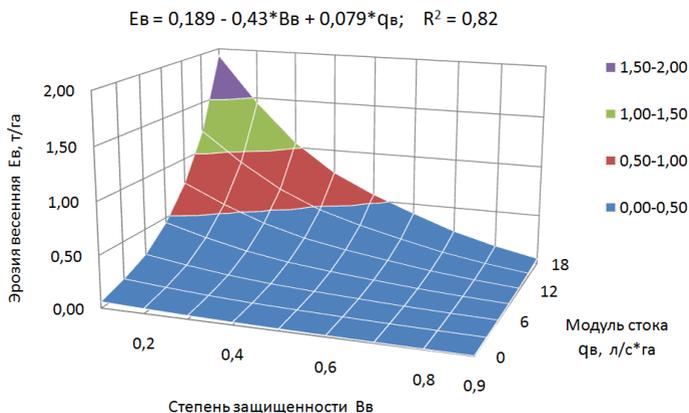


Рис. 4. Зависимость весенней эрозии от модуля стока и степени защищенности почвы угодьями и лесными полосами

Fig. 4. Dependence of spring erosion on the runoff modulus and the degree of soil protection by land and forest strips

Заключение, рекомендации. Для содержания земель на допустимом уровне эрозии на эрозионно опасных склонах 3–5° рекомендуются контурные лесные полосы с расстоянием 300–250 м и межполосным применением безотвальной технологии возделывания культур севооборота. Вспашка с оборотом пласта требует, кроме вышеуказанных лесных полос, применения между лесными полосами дополнительных агромеридионных приемов. Модули стока для расчетов сбросных противозерозионных сооружений в зависимости от угодий и ландшафтов принимают, исходя из значения вероятности превышения: 10% – 1,7 м³/с·км², 1% – 3 м³/с·км².

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Балакай Н.И., Балакай Г.Т., Полуэктов Е.В. Особенности стока талых вод с рыхлой и уплотненной пашни на черноземах обыкновенных в условиях Ростовской области // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2016. № 3(26). С. 66–82. URL: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec429-field6.pdf.

Боголюбова И.В., Бобровицкая Н.Н., Дьяков В.Н. и др. Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва почв при изучении водной эрозии. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 88 с.

Кузник И.А., Лысов А.В. Опыт изучения стока и эрозии на Приволжской возвышенности // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. 1974. № 6. С. 84–91.

Кулик К.Н., Дубенок Н.Н., Рулев А.С., Пугачева А.М. ВНИАЛМИ-лидер агролесомелиоративной науки России: современная концепция защитного лесоразведения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11. Естественные науки. 2015. № 3(13). С. 108–114.

Павловский Е.С., Долгиевич М.И. и др. Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов. ВАСХНИЛ, ВНИАЛМИ. М., 1985. 112 с.

Петелько А.И., Барабанов А.Т. Влияние контурных стокорегулирующих лесных полос из дуба на эрозионно-гидрологические показатели на Среднерусской возвышенности // Земледелие. 2018. № 2. С. 26–29.

Рождественский А.В. (ред.) Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Государственный Гидрологический институт, 2005. 123 с.

Agrawal A., Wollenberg E., Pezsha L. Governing agriculture-forest landscapes to achieve climate change mitigation // Global Environmental Change. 2014. Nov. Vol. 29. P. 270–280.

Parihaar R.S., Bargal K. Status of an indigenous agroforestry system: A case study in Kumaun Himalaya, India // Indian Journal of Agricultural Sciences. 2015. No. 85 (3). P. 442–447.

Proezdov P., Eskov D., Rozanov A., Sviridov S. Regularities of spring runoff formation and erosion under the influence of forest and agro technical reclamation in the southern chernozem of the Volga region // Proceedings of IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 723 (ESDCA 2021). 032096, Bristol, UK, England: IOP Publishing, 2021.

References

Agrawal A., Wollenberg E., Pezsha L. Governing agriculture-forest landscapes to achieve climate change mitigation. *Global Environmental Change*, 2014, nov., vol. 29, pp. 270–280.

Balakay N.I., Balakay G.T., Poluektov E.V. Features of meltwater runoff from loose and compacted arable land on ordinary chernozems in the Rostov region. *Scientific journal of the Russian research Institute of problems of reclamation* [Electronic resource], 2016, no. 3(26), pp. 66–82. URL: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec429-field6.pdf (In Russ.)

Bogolyubova I.V., Bobrovitskaya N.N., Dyakov V.N. et al. Methodical recommendations on the account of surface runoff and soil washout in the study of water erosion. L.: Hydrometeoizdat, 1975. 88 p. (In Russ.)

Kulik K.N., Dubenok N.N., Rulev A.S., Pugacheva A.M. VNIАLMI-leader of agroforestry science in Russia: modern concept of protective afforestation. *Bulletin of Volgograd state University. Series 1 I. Natural Sciences*, 2015, no. 3(13), pp. 108–114. (In Russ.)

Kuznik I. A., Lysov A.V. Experience of studying runoff and erosion on the Volga upland, *Izvestiya Akademii nauk USSR. Geographical series*, 1974, no. 6, 1974, pp. 84–91. (In Russ.)

Parihaar R.S., Bargal K. Status of an indigenous agroforestry system: A case study in Kumaun Himalaya, India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, no. 85. (3), pp. 442–447.

Pavlovsky E.S., Dolgilevich M.I. et al. Methodology of system studies of forest-agrarian landscapes. VASHNIL, VNIALMI. M., 1985. 112 p. (In Russ.)

Petelko A.I., Barabanov A.T. Influence of contour flow-regulating forest strips from oak on erosion-hydrological indicators on the Middle Russian upland. *Agriculture*, 2018, no. 2, pp. 26–29. (In Russ.)

Proezdov P., Eskov D., Rozanov A., Sviridov S. Regularities of spring runoff formation and erosion under the influence of forest and agro technical reclamation in the southern chernozem of the Volga region. *Proceedings of IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 723 (ESDCA 2021), 032096, Bristol, UK, England: IOP Publishing, 2021.

Rozhdestvensky A.V. (ed.) Methodological recommendations for determining calculated hydrological characteristics in the presence of hydrometric observations// St. Petersburg: State Hydrological Institute, 2005. 123 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 26.07.2023

Проездов П.Н., Есков Д.В., Розанов А.В., Свиридов С.В. Закономерности формирования стока и эрозии под влиянием угодий и лесных полос на южном черноземе для обоснования противозерозионных приемов // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 160–170.* DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.160-170

Цель исследования – установление закономерностей формирования расходов стока и эрозии под влиянием леса, лесных полос и сельскохозяйственных угодий в степи Приволжской возвышенности. Методика исследования базировалась на рекомендациях профильных НИИ и ученых России. Водные запасы снега, сток, модуль стока, эрозия претерпевают значительные изменения под влиянием сельскохозяйственный угодий, лесных полос и леса. Лесные полосы и лес снижают коэффициенты весеннего и ливневого стока по сравнению с сельскохозяйственными угодьями в 10,5–13,5 раза, соответственно показатели модуля стока в 5,1–31,0. Параметры модуля стока необходимы для создания сбросных противозерозионных сооружений. Эрозия под воздействием лесных полос на полях с безотвальной технологией возделывания культур севооборота и с лесных угодий принимает допустимые размеры менее 0,3 т/га для почв А+В<0,5м. Отвальная технология, кроме лесных полос, требует применения дополнительных агротехнических приемов, например, мульчированного щелевания. Из сложного многообразия воздействия природно-антропогенных факторов на эрозию преобладающими выделены коэффициент и модуль

поверхностного стока, степень защищенности почвы угодьями. Регрессионно-корреляционный анализ отмечает тесную взаимосвязь между эрозией, параметрами поверхностного стока и применяемыми лесными полосами с коэффициентами детерминации 0,82–0,96. Многолетние исследования на склонах 3–5° позволили рекомендовать: расстояния между контурными лесными полосами 300–250 м; безотвальную технологию возделывания культур севооборота; модуль стока воды на агроландшафтах для сбросных противозерозионных сооружений 10% вероятности превышения $1,7 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$.

Ключевые слова: Степь Поволжья, чернозем южный, сток, эрозия, лесные полосы, лес, угодья, ковариация.

Proezdov P.N., Eskov D.V., Rozanov A.V., Sviridov S.V. Patterns of runoff formation and erosion under the influence of lands and forest strips on southern chernozem to justify anti-erosion techniques. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehničeskoj Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 160–170 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.160-170

The purpose of the study is to establish the regularities of the formation of maximum flow rates and erosion under the influence of forests, forest strips and agricultural lands in the steppe of the Volga upland. The research methodology was based on the recommendations of specialized research institutes and scientists of Russia. Water supply, runoff, maximum runoff modulus, erosion undergo significant changes under the influence of agricultural land, forest strips and forests. Forest strips and forests reduce the coefficients of spring and stormwater runoff in comparison with agricultural land by 10.5–13.5 times, accordingly, the indicators of the maximum flow modulus are 5.1–31.0 times. The parameters of the drain module are necessary for the creation of discharge anti-erosion structures. Erosion under the influence of forest strips in fields with non-fallow technology of cultivation of crops of crop rotation of forest lands applies permissible sizes of less than $0.3 \text{ t} / \text{ha}$ for soils $A + B < 0.5 \text{ m}$. Dump technology, in addition to forest strips, requires the use of additional agrotechnical techniques, for example, mulched slitting. From the complex variety of the impact of natural and anthropogenic factors on erosion, the coefficient and modulus of surface runoff, the degree of protection of the soil by land are the predominant ones. Regression-correlation analysis notes a close relationship between erosion, surface runoff parameters and the forest strips used with the coefficient of determination of the relationship of features. Long-term studies on the slopes of 3–5° allowed us to recommend: the distances between the forest strips of 300 m, 250 m – a fall-free technology for cultivating crop rotation crops, the water flow module on agricultural landscapes for discharge erosion control structures has a 10% probability of exceeding $1.7 \text{ м}^3/\text{s} \cdot \text{км}^2$.

Keywords: Volga steppe, southern chernozem, runoff, erosion, forest strips, forest, land, covariance.

ПРОЕЗДОВ Петр Николаевич – профессор Вавиловского университета, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 8889-6020, ORSID: 0000-0002-5992-8167.

410012, Театральная пл., д. 1а, г. Саратов, Россия. E-mail: toxa_19@mail.ru

PROEZDOV Pyotr N. – DSc (Agricultural), Professor, Vavilovsky University. SPIN-code: 8889-6020, ORCID: 0000-0002-5992-8167.

410012. Theater sqr. 1a. Saratov. Russia. E-mail: toxa_19@mail.ru

ЕСКОВ Дмитрий Владимирович – доцент Вавиловского университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 3970-3967.

410012, Театральная пл., д. 1а, г. Саратов, Россия. E-mail: eskovdv@rambler.ru

ESKOV Dmitry V. – PhD (Technical), Associate Professor, Vavilovsky University. SPIN-code: 3970-3967.

410012. Theater sqr. 1a. Saratov. Russia. E-mail: eskovdv@rambler.ru

РОЗАНОВ Александр Владимирович – доцент Вавиловского университета, кандидат физико-математических наук. SPIN-код: 5330-6012.

410012, Театральная пл., д. 1а, г. Саратов, Россия. E-mail: arosanov@yandex.ru

ROZANOV Alexander V. – PhD (Physical and Mathematical), Associate Professor, Vavilovsky University. SPIN-code: 5330-6012.

410012. Theater sqr. 1a. Saratov. Russia. E-mail: arosanov@yandex.ru

СВИРИДОВ Сергей Владимирович – младший научный сотрудник, «ФНЦ агроэкологии РАН». SPIN-код: 6192-4997, ORSID: 0000-0002-8885-9906

400062, пр. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия. E-mail: svsvms@mail.ru

SVIRIDOV Sergey V. – Junior Researcher, FRC of Agroecology of the RAS. SPIN-code: 6192-4997, ORSID: 0000-0002-8885-9906.

400062. Universitetskiy av. 97. Volgograd. Russia. E-mail: svsvms@mail.ru