



Научная статья

УДК 631.459.02:631.421:631.6.02

doi: 10.55186/25876740_2024_67_5_584

ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНОГО ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИИ НА ВПИТЫВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПОЧВЫ

Ю.П. Сухановский, А.В. Прущик, В.А. Вытовтов, Ю.О. Рубаник, А.Г. Титов

Курский федеральный аграрный научный центр, Курск, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты исследований долгосрочного влияния эрозии почвы на ее впитывающую способность, плотность и влажность. Результаты получены в многолетнем эксперименте по контурно-мелиоративному земледелию на двух водосборах (Курская область) в 2021-2023 гг. Исследования проведены на водосборе с агролесоландшафтным комплексом, представленным тремя водорегулирующими двухрядными лесными полосами, усиленными канавой и валом, и на контроле. Почва — чернозем типичный малогумусный тяжелосуглинистый среднесиловый (неэродированный и слабоэродированный). Использован метод ключевых участков. На каждом водосборе выбраны 2 участка: один наверху склона (почва неэродированная) другой внизу склона (почва эродированная). В 4-кратной повторности на участке отобраны монолиты для измерения впитывающей способности почвы методом дождевания, почвенные образцы для определения плотности и влажности почвы. Разность средних значений на участках оценивает последствия эрозии. Представлены 3 измеряемые величины: критическое значение индекса, когда начинается сток; средняя скорость впитывания на интервале эрозионного индекса 0-30 т-м/га; установившаяся скорость впитывания. Установлено, что на контрольном водосборе разность средних значений для установившейся скорости впитывания на эродированной почве больше на 52% по сравнению с неэродированной. На водосборе с агролесоландшафтным комплексом значения для критического индекса дождя и средней скорости впитывания на ключевых участках с эродированной почвой достоверно меньше на 39 и 30%, соответственно, по сравнению с неэродированной. На контрольном водосборе на двух участках различие плотности почвы получено в пределах 12%, а влажность в слое 10-30 см эродированной почвы достоверно меньше в интервале на 12-20%. На водосборе с агролесоландшафтным комплексом на эродированной почве плотность больше на 7-22% по сравнению с неэродированной, достоверных отличий в значениях влажности не получено.

Ключевые слова: эрозия почвы, долгосрочные последствия, почва, впитывающая способность, достоверность, водосборы

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания ФБГНУ «Курский ФАНЦ» по теме № FGZU-2022-0002.

Original article

ASSESSMENT OF THE LONG-TERM IMPACT OF EROSION ON SOIL ABSORPTION CAPACITY

Yu.P. Sukhanovskii, A.V. Prushchik, V.A. Vytovtov, Yu.O. Rubanik, A.G. Titov

Federal Agricultural Kursk Research Center, Kursk, Russia

Abstract. The article presents the results of studies of the long-term effect of soil erosion on its absorptency, density and moisture. The results were obtained in a long-term experiment on contour reclamation farming in two catchments (Kursk region) in 2021-2023. The studies were carried out in a catchment area with an agroforestry landscape complex, represented by three water-regulating two-row forest shelter-belts reinforced with a ditch and a shaft and under control. The soil is a typical low-humus, heavy-loamy medium-sized chernozem (non-eroded and slightly eroded). The method of key sections was used. Two sites are selected in each catchment area: one at the top of the slope (non-eroded soil) and the other at the bottom of the slope (eroded soil). Monoliths were selected in 4-fold repetition on the site to measure the soil absorptency by sprinkling, soil samples to determine the density and moisture of the soil. The difference in the average values on the plots assesses the effects of erosion. Three measured values are presented: the critical value of the index when runoff begins; the average absorption rate in the range of the erosion index of 0-30 t-m/ha; the steady-state absorption rate. It was found that in the control catchment area, the difference in average values for the steady-state absorption rate in eroded soil is 52% greater than in non-eroded soil. In a catchment area with an agroforestry landscape complex, the values for the critical rain index and the average absorption rate in key areas with eroded soil are significantly lower by 39 and 30%, respectively, compared with non-eroded soil. In the control catchment area at two sites, the difference in soil density was obtained within 12%, and the humidity in the 10-30 cm layer of eroded soil was significantly less in the range of 12-20%. In a catchment area with an agroforestry landscape complex on eroded soil, the density is 7-22% higher than in non-eroded soil, no significant differences in moisture values were obtained.

Keywords: soil erosion, long-term effects, soil, moisture, validity, watersheds

Acknowledgments: the research was carried out within the framework of the State tasks of FSBSI «Federal Agricultural Kursk Research Center» on topic No. FGZU-2022-0002.

Введение. В мире к концу 20 века было потеряно 2 млрд га плодородных земель, а использовалось 1,5 млрд га [1, 2]. По причине деградации почв площадь пашни ежегодно сокращалась на 0,47% (на 0,40% вследствие эрозионных процессов [3, 4]). Установлено [5]: человечество использует природные возобновляемые почвенные ресурсы как не возобновляемые (скорость эрозии намного больше скорости почвообразования). Это подтверждено для почв Курской области [6], где на основе прогнозов показано, что эрозию почвы можно только замедлить, а эрозионные потери невозможно восстановить. Согласно Стратегии научно-технологического развития РФ (Указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г., п. 15 г), проблема эрозии почвы относится к наиболее значимым большим вызовам. Необходима

стратегия поэтапного уменьшения скорости эрозии до скорости почвообразования. Прогноз для склона с агролесоландшафтным комплексом показал [6] уменьшение поступления смытой почвы в гидрографическую сеть в 26 раз (по сравнению с применением только агротехнических мероприятий).

На водопроницаемость почвы влияют различные факторы, например, влажность, плотность почвы и гранулометрический состав [7, 8]. Базы данных по водопроницаемости почвы получены для конкретных условий [8, 9] и не могут быть использованы повсеместно.

Цель и задачи исследования. Цель исследования — оценка долгосрочного влияния эрозии на впитывающую способность почвы. Задачи исследования — оценка влияния эрозии на

впитывающую способность, плотность и влажность почвы на двух водосборах с агролесоландшафтным комплексом и без него.

Условия проведения исследования. Исследование проведено в полевом стационарном многолетнем эксперименте по контурно-мелиоративному земледелию (ФБГНУ «Курский ФАНЦ», Курская область).

Объект исследования — чернозем типичный малогумусный тяжелосуглинистый среднесиловый неэродированный и слабоэродированный. На исследованных двух водосборах с 2012 г. велся укороченный зерновой севооборот: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) — гречиха (*Fagopyrum esculentum*) — яровой ячмень (*Hordeum distichon* L.) — гречиха (*Fagopyrum esculentum*).



Основной обработкой почвы была вспашка на глубину 20-22 см, с 2007 г. — поверхностная обработка (дискатор на глубину 10-12 см).

Опытный участок состоял из нескольких водосборов: исследования проведены на водосборе с агролесоландшафтным комплексом, представленным тремя водорегулирующими двухрядными лесными полосами, усиленными канавой и валом (площадь 38 га) и на контрольном водосборе с площадью 40 га — без лесополос. На склонах западной экспозиции выделены ключевые участки [6], расположенные вверху склона — почва незеродированная, внизу склона — слабоэродированная.

Методология проведения исследования.

За основу принят метод ключевых участков [6], основанный на документах стандартизации (РМГ-29-2013, МИ 2083-90, ГОСТ Р 8.736-2011). Ниже представлены только формулы для оценки достоверности результатов измерения. На исследуемых участках повторность измерений (отбор образцов почвы) приводит к случайной выборке измеренных значений

$$\{x_i\}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где x_i — измеренное значение в i -й точке; n — объем выборки.

Для статистического анализа выборки (1) необходимо выполнение следующих условий:

1. Почва на участке должна быть однородной.
2. Площадь необходимо разделить на одинаковые ячейки ($n \geq 4$).
3. Выборка (1) должна удовлетворять двум условиям. Первое — ее должно описывать усеченное нормальное распределение вероятности. Для проверки гипотезы использован критерий Колмогорова-Смирнова [10]. Второе — оно должно быть достаточно близко к функции нормального распределения. Из соображений репрезентативности и наименьшего количества измерений выбран квадрат со стороной 10 м, разделенный на четыре ($n=4$) одинаковые ячейки. Для участка результат измерения представлен в форме

$$\bar{x} \pm \Delta, P; \quad \Delta = t_p S_{\bar{x}}; \quad S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где \bar{x} — среднее значение выборки (1); Δ — его абсолютная погрешность; P — вероятность, соответствующая интервалу погрешности (уровень значимости $\alpha=1-P$); t_p — коэффициент Стьюдента; $S_{\bar{x}}$ — стандартное отклонение для среднего значения; S — стандартное отклонение. Если значение $\bar{x} > \Delta$, то оно достоверное.

Достоверную разность средних значений для двух участков определяет выполнение неравенства

$$n > n_{\text{дос}} = t_p^2 \left(\frac{S_1 + S_2}{x_2 - x_1} \right)^2. \quad (3)$$

Для достоверной разности она рассчитана в процентах по формуле

$$\epsilon = 100 \frac{x_2 - x_1}{x_1}. \quad (4)$$

Выполнение второго условия определяет неравенство

$$P(x < 0) = N(0, \bar{x}, S) \ll \alpha/2, \quad (5)$$

здесь $P(x < 0)$ вероятность, что значение случайной величины x будет меньше 0; $N(0, \bar{x}, S)$ — функция нормального распределения вероятности, определяющая вероятность, что значение будет меньше 0.

Для получения большего количества достоверных разностей рекомендовано [6] $t_p=1$, что при $n=4$ соответствует $P=0,61$ [11] и $\alpha/2=0,2$.

Принятие для выборки (1) гипотезы об усеченном нормальном распределении означает, что выборки с одинаковым объемом, но в других точках отбора образцов почвы являются равноценными, то есть почва на участке однородная. Ключевые участки необходимо размещать за пределами окрестности влияния лесной полосы на микроклимат.

Впитывающую способность почвы определяли методом дождевания стоковых площадок с использованием лабораторно-полевой портативной дождевальной установки [6]. По результатам дождевания определяли зависимость от времени. Затем переходили к зависимости от критерия подобия для искусственных дождей, а далее — к зависимости от критерия подобия для естественных дождей [6]. В итоге получили следующую функцию

$$K = K_{кр} + (K_{кр} - K_{\infty}) \exp \left[-\alpha \frac{AI}{AI_{кр}} - 1 \right], \quad (6)$$

где K — впитывающая способность почвы, мм/мин; $K_{кр}$ — ее значение при начале стока, мм/мин; K_{∞} — установившаяся скорость впитывания, мм/мин; \exp — экспоненциальная функция; α — калибровочный параметр; AI — критерий подобия для естественных дождей, т-м/га; $AI_{кр}$ — его значение при начале стока, т-м/га.

Для каждого монолита почвы оценивали значения $K_{кр}$, K_{∞} , α и $AI_{кр}$. Для отбора монолитов почвы использовали металлические цилиндры с внутренним диаметром 25 см и высотой 20 см. Дождевание проводили в лабораторных условиях. Для измерения плотности и влажности почвы образцы отбирали буром-пробоотборником (Патент РФ № 2732907). Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом (ГОСТ 28268-89).

Результаты и обсуждение. Впитывающую способность почвы описывает функция от критериев подобия дождевых осадков. Для

статистического анализа были выбраны три величины: значение критерия подобия для естественных дождей в начале стока $AI_{кр}$, установившаяся скорость впитывания K_{∞} и среднее значение впитывающей способности почвы $K_{сред}$ на интервале от 0 до $AI_{макс}=30$ т-м/га. При значениях $t_p=1$ и $n=4$ среднее значение достоверное при выполнении неравенства

$$\bar{x} > \Delta = S/\sqrt{4}. \quad (7)$$

Для ключевых участков контрольного водосбора получили, что разности средних значений $AI_{кр}$ и $K_{сред}$ на эродированной и незеродированной почве недостоверные, то есть они находились в пределах погрешности (табл. 1). Значение установившейся скорости впитывания на эродированной почве достоверно больше на 52% по сравнению с незеродированным участком. Все выборки описывают усеченные нормальные распределения вероятности, и они достаточно близки к нормальному распределению. Средние значения достоверны. Выборки удовлетворяют условиям применения метода ключевых участков.

Для водосбора с агролесоландшафтным комплексом получено, что: ключевых участков, расположенных на эродированной почве значения $AI_{кр}$ и $K_{сред}$ достоверно меньше, соответственно, на 39 и 30%, по сравнению с незеродированными (табл. 2).

Анализ установившейся скорости впитывания показал, что разность средних значений недостоверная.

Из сравнения таблиц 1 и 2 можно заключить, что на контрольном водосборе значения параметров впитывающей способности почвы противоположны показателям на водосборе с агролесоландшафтным комплексом. Это означает, что различия в этих параметрах существуют.

Таблица 1. Впитывающая способность почвы на контрольном водосборе
Table 1. Soil absorbency at the control catchment

| Показатель | \bar{x} | S | D | $P(x < 0)$ | $n_{\text{дос}}$ | Разность, да/нет | $\epsilon, \%$ |
|--------------------|-----------|-------|-------|---------------------|------------------|------------------|----------------|
| Верх склона | | | | | | | |
| $AI_{кр}$ т-м/га | 6,2 | 1,9 | 0,211 | 6×10^{-4} | | | |
| $K_{сред}$ мм/мин | 1,11 | 0,29 | 0,284 | 5×10^{-5} | | | |
| $K_{уст}$ мм/мин | 0,316 | 0,034 | 0,193 | 9×10^{-21} | | | |
| Низ склона | | | | | | | |
| $AI_{кр}$ т-м/га | 7,8 | 2,9 | 0,308 | 4×10^{-3} | 9 | нет | |
| $K_{сред}$ мм/мин | 1,27 | 0,25 | 0,349 | 2×10^{-7} | 12 | нет | |
| $K_{уст}$ мм/мин | 0,48 | 0,10 | 0,389 | 3×10^{-7} | 1 | да | 52 |

Примечание: \bar{x} — среднее значение; S — стандартное отклонение; D — критерий Колмогорова-Смирнова (при $D < 0,624$ принимали гипотезу об усеченном нормальном распределении); при $P(x < 0) < 2 \times 10^{-1}$ оно близко к нормальному; при объеме выборки $n=4 > n_{\text{дос}}$ разность средних значений достоверная («да»), иначе — недостоверная («нет»); ϵ — формула (4). Эти обозначения соответствуют обозначениям в других таблицах.

Таблица 2. Впитывающая способность почвы на водосборе с лесными полосами
Table 2. Absorbent capacity of soil in the catchment area with forest shelter-belts

| Показатель | \bar{x} | S | D | $P(x < 0)$ | $n_{\text{дос}}$ | Разность, да/нет | $\epsilon, \%$ |
|--------------------|-----------|------|-------|--------------------|------------------|------------------|----------------|
| Верх склона | | | | | | | |
| $AI_{кр}$ т-м/га | 9,0 | 2,3 | 0,176 | 5×10^{-5} | | | |
| $K_{сред}$ мм/мин | 1,43 | 0,29 | 0,142 | 4×10^{-7} | | | |
| $K_{уст}$ мм/мин | 0,42 | 0,07 | 0,272 | 5×10^{-9} | | | |
| Низ склона | | | | | | | |
| $AI_{кр}$ т-м/га | 5,5 | 2,0 | 0,239 | 3×10^{-3} | 2 | да | -39 |
| $K_{сред}$ мм/мин | 1,00 | 0,32 | 0,255 | 1×10^{-3} | 3 | да | -30 |
| $K_{уст}$ мм/мин | 0,36 | 0,07 | 0,227 | 5×10^{-8} | 6 | нет | |





При определении впитывающей способности почвы обязательно учитывают влажность и плотность. Для контрольного водосбора анализ данных по плотности почвы, отобранных до глубины 50 см, показал (табл. 3), что на ключевом участке, расположенном внизу склона, на эродированной почве в слоях 0-5 и 30-35 см значения достоверно меньше на 9 и 5% соответственно.

На глубине 5-25 см плотность почвы достоверно больше в интервале 3-12% по сравнению с ключевым участком, расположенным вверху склона на неэродированной почве. Для остальных глубин разность средних значений плотности достоверная.

Анализ данных для водосбора с агролесоландшафтным комплексом (табл. 4) показал, что

для двух ключевых участков, расположенных на неэродированной и эродированной почве в слоях 0-5 и 25-30 см разность средних значений плотности недостоверная, то есть ниже погрешности измерений.

Для всех остальных глубин ключевого участка, расположенного на эродированной почве внизу склона, плотность достоверно больше

Таблица 3. Плотность почвы на контрольном водосборе
Table 3. Soil density at the control catchment

| Слой почвы, см | \bar{x} , г/см ³ | S , г/см ³ | D | $P(x<0)$ | $n_{\text{дос}}$ | Разность, да/нет | ϵ , % |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------|-------|----------------------|------------------|------------------|----------------|
| Верх склона | | | | | | | |
| 0-5 | 0,968 | 0,070 | 0,359 | 6×10^{-44} | | | |
| 5-10 | 0,992 | 0,017 | 0,280 | 0 | | | |
| 10-15 | 1,067 | 0,014 | 0,221 | 0 | | | |
| 15-20 | 1,063 | 0,05 | 0,153 | 1×10^{-100} | | | |
| 20-25 | 1,126 | 0,07 | 0,229 | 2×10^{-58} | | | |
| 25-30 | 1,23 | 0,09 | 0,237 | 8×10^{-43} | | | |
| 30-35 | 1,251 | 0,04 | 0,216 | 5×10^{-215} | | | |
| 35-40 | 1,262 | 0,04 | 0,337 | 9×10^{-219} | | | |
| 40-45 | 1,29 | 0,08 | 0,434 | 9×10^{-59} | | | |
| 45-50 | 1,31 | 0,08 | 0,348 | 1×10^{-60} | | | |
| Низ склона | | | | | | | |
| 0-5 | 0,884 | 0,06 | 0,346 | 5×10^{-49} | 3 | да | -9 |
| 5-10 | 1,10 | 0,09 | 0,253 | 1×10^{-34} | 1 | да | 11 |
| 10-15 | 1,20 | 0,16 | 0,298 | 3×10^{-14} | 2 | да | 12 |
| 15-20 | 1,169 | 0,05 | 0,290 | 3×10^{-121} | 1 | да | 10 |
| 20-25 | 1,160 | 0,06 | 0,222 | 1×10^{-83} | 15 | нет | 3 |
| 25-30 | 1,23 | 0,10 | 0,433 | 5×10^{-35} | -* | нет | |
| 30-35 | 1,190 | 0,06 | 0,135 | 8×10^{-88} | 3 | да | -5 |
| 35-40 | 1,21 | 0,08 | 0,162 | 6×10^{-52} | 6 | нет | |
| 40-45 | 1,272 | 0,04 | 0,226 | 3×10^{-222} | 45 | нет | |
| 45-50 | 1,325 | 0,07 | 0,168 | 3×10^{-80} | 101 | нет | |

*Средние значения равные

Таблица 5. Влажность почвы на контрольном водосборе
Table 5. Soil moisture at the control catchment

| Слой почвы, см | \bar{x} , % | S , % | D | $P(x<0)$ | $n_{\text{дос}}$ | Разность, да/нет | ϵ , % |
|--------------------|---------------|---------|-------|----------------------|------------------|------------------|----------------|
| Верх склона | | | | | | | |
| 0-5 | 28,50 | 0,4 | 0,202 | 0 | | | |
| 5-10 | 30,8 | 2,5 | 0,582 | 4×10^{-35} | | | |
| 10-15 | 33,3 | 2,3 | 0,276 | 8×10^{-48} | | | |
| 15-20 | 31,4 | 1,8 | 0,229 | 2×10^{-68} | | | |
| 20-25 | 30,9 | 2,0 | 0,238 | 4×10^{-54} | | | |
| 25-30 | 31,0 | 2,6 | 0,233 | 4×10^{-33} | | | |
| 30-35 | 30,5 | 1,8 | 0,189 | 1×10^{-64} | | | |
| 35-40 | 29,5 | 2,2 | 0,221 | 3×10^{-41} | | | |
| 40-45 | 30,8 | 3,1 | 0,150 | 1×10^{-23} | | | |
| 45-50 | 29,7 | 1,3 | 0,269 | 8×10^{-116} | | | |
| Низ склона | | | | | | | |
| 0-5 | 27,6 | 4 | 0,136 | 3×10^{-12} | 24 | нет | |
| 5-10 | 28,4 | 5 | 0,259 | 7×10^{-9} | 10 | нет | |
| 10-15 | 26,8 | 4 | 0,200 | 1×10^{-11} | 1 | да | -20 |
| 15-20 | 26,7 | 4 | 0,286 | 1×10^{-11} | 2 | да | -15 |
| 20-25 | 27,2 | 4 | 0,180 | 5×10^{-12} | 3 | да | -12 |
| 25-30 | 27,1 | 4 | 0,218 | 6×10^{-12} | 3 | да | -13 |
| 30-35 | 29,4 | 3,1 | 0,340 | 1×10^{-21} | 20 | нет | |
| 35-40 | 29,5 | 2,2 | 0,221 | 3×10^{-41} | -* | нет | |
| 40-45 | 27,8 | 3,4 | 0,251 | 1×10^{-16} | 5 | нет | |
| 45-50 | 27,2 | 3,8 | 0,184 | 4×10^{-13} | 5 | нет | |

*Средние значения равные

Таблица 4. Плотность почвы на водосборе с лесными полосами
Table 4. Soil density in the catchment area with forest shelter belts

| Слой почвы, см | \bar{x} , г/см ³ | S , г/см ³ | D | $P(x<0)$ | $n_{\text{дос}}$ | Разность, да/нет | ϵ , % |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------|-------|----------------------|------------------|------------------|----------------|
| Верх склона | | | | | | | |
| 0-5 | 0,968 | 0,070 | 0,359 | 9×10^{-44} | | | |
| 5-10 | 0,992 | 0,017 | 0,280 | 0 | | | |
| 10-15 | 1,067 | 0,014 | 0,221 | 0 | | | |
| 15-20 | 1,063 | 0,05 | 0,153 | 1×10^{-100} | | | |
| 20-25 | 1,126 | 0,07 | 0,229 | 2×10^{-58} | | | |
| 25-30 | 1,23 | 0,09 | 0,237 | 8×10^{-43} | | | |
| 30-35 | 1,056 | 0,03 | 0,223 | 1×10^{-271} | | | |
| 35-40 | 1,065 | 0,04 | 0,341 | 2×10^{-156} | | | |
| 40-45 | 1,09 | 0,07 | 0,435 | 6×10^{-55} | | | |
| 45-50 | 1,11 | 0,07 | 0,347 | 6×10^{-57} | | | |
| Низ склона | | | | | | | |
| 0-5 | 1,000 | 0,15 | 0,259 | 1×10^{-11} | 48 | нет | |
| 5-10 | 1,07 | 0,02 | 0,210 | 0 | 1 | да | 8,1 |
| 10-15 | 1,14 | 0,03 | 0,169 | 0 | 1 | да | 7,0 |
| 15-20 | 1,198 | 0,06 | 0,333 | 5×10^{-89} | 1 | да | 13 |
| 20-25 | 1,322 | 0,04 | 0,303 | 8×10^{-240} | 1 | да | 17 |
| 25-30 | 1,32 | 0,08 | 0,310 | 2×10^{-61} | 4 | нет | |
| 30-35 | 1,284 | 0,06 | 0,228 | 7×10^{-102} | 1 | да | 22 |
| 35-40 | 1,17 | 0,04 | 0,160 | 2×10^{-188} | 1 | да | 10 |
| 40-45 | 1,248 | 0,05 | 0,299 | 8×10^{-138} | 1 | да | 14 |
| 45-50 | 1,267 | 0,01 | 0,227 | 0 | 1 | да | 14 |

Таблица 6. Влажность почвы на водосборе с лесными полосами
Table 6. Soil moisture in the catchment area with forest shelter belts

| Слой почвы, см | \bar{x} , % | S , % | D | $P(x<0)$ | $n_{\text{дос}}$ | Разность, да/нет | ϵ , % |
|--------------------|---------------|---------|-------|----------------------|------------------|------------------|----------------|
| Верх склона | | | | | | | |
| 0-5 | 29,76 | 0,4 | 0,282 | 0 | | | |
| 5-10 | 30,2 | 1,0 | 0,179 | 1×10^{-200} | | | |
| 10-15 | 31,5 | 1,6 | 0,273 | 1×10^{-86} | | | |
| 15-20 | 31,1 | 0,8 | 0,292 | 0 | | | |
| 20-25 | 29,8 | 1,8 | 0,274 | 7×10^{-62} | | | |
| 25-30 | 28,4 | 2,4 | 0,246 | 1×10^{-32} | | | |
| 30-35 | 28,2 | 2,8 | 0,231 | 4×10^{-24} | | | |
| 35-40 | 30,6 | 1,7 | 0,136 | 1×10^{-72} | | | |
| 40-45 | 28,9 | 1,0 | 0,255 | 6×10^{-184} | | | |
| 45-50 | 28,2 | 1,4 | 0,211 | 2×10^{-90} | | | |
| Низ склона | | | | | | | |
| 0-5 | 26,3 | 5 | 0,226 | 7×10^{-8} | 3 | да | -12 |
| 5-10 | 28,4 | 5 | 0,259 | 2×10^{-9} | 11 | нет | |
| 10-15 | 29,9 | 2,2 | 0,148 | 2×10^{-42} | 6 | нет | |
| 15-20 | 28,7 | 4 | 0,151 | 4×10^{-13} | 4 | нет | |
| 20-25 | 27,3 | 4 | 0,257 | 4×10^{-12} | 6 | нет | |
| 25-30 | 27,3 | 4 | 0,190 | 4×10^{-12} | 34 | нет | |
| 30-35 | 21,9 | 11 | 0,189 | 2×10^{-2} | 5 | нет | |
| 35-40 | 31,0 | 3,0 | 0,213 | 2×10^{-25} | 139 | нет | |
| 40-45 | 29,0 | 3,7 | 0,165 | 2×10^{-15} | 2209 | нет | |
| 45-50 | 26,1 | 7 | 0,224 | 1×10^{-4} | 17 | нет | |



в интервале 7,0-22% по сравнению с незэродированной почвой.

Из сравнения данных таблиц 3 и 4 следует, что на эродированной почве по сравнению с незэродированной плотность почвы на водосборе с агролесоландшафтным комплексом достоверно выше, чем на контрольном водосборе.

Анализ влажности почвенных образцов, отобранных на ключевых участках контрольного водосбора, показал, что на эродированной почве в слоях 10-30 см влажность достоверно меньше в интервале 12-20% (табл. 5).

Для остальных глубин почвы разность средних значений влажности между ключевыми участками не отличается в пределах достоверности определения.

Для контрольных участков водосбора с агролесоландшафтным комплексом получили, что: на эродированной почве, расположенной внизу склона в слое 0-5 см, влажность достоверно меньше на 12% по сравнению с незэродированными участками (табл. 6).

Для остальных глубин разность средних значений недостоверна. Из сравнения данных таблиц 5 и 6 для эродированной почвы следует, что на контрольном водосборе влажность почвы ниже в слое 10-30 см по сравнению с незэродированной почвой ключевого участка. На водосборе с агролесоландшафтным комплексом значения этого показателя между ключевыми участками практически не изменялись.

Область применения результатов. Предложенная методология ключевых участков необходима для исследования разных последствий эрозии почвы. Ее можно использовать для исследования последствий разных агротехнологий.

Выводы. Средняя скорость впитывания на водосборе с агролесоландшафтным комплексом на ключевых участках с эродированной почвой меньше на 30% по сравнению с ключевыми участками с незэродированной почвой. На контрольном водосборе эта величина одинакова для двух ключевых участков в пределах погрешности. Влажность эродированной почвы по сравнению с незэродированной на контрольном водосборе была достоверно меньше на 12-20% в слоях почвы 10-30 см, для остальных

глубин влажность была одинакова в пределах погрешности измерений. На водосборе с агролесоландшафтным комплексом влажность была практически одинакова. Размещение агролесоландшафтного комплекса, представленного двухрядными лесными полосами, положительно отразилось на увеличении влажности почвы и плотности почвы в слое 35-50 см на 10-22%. Необходимо продолжение исследований для разных агрофонов и метеорологических условий и совершенствование методологии.

Список источников

1. Полуэктов Е.В. Эрозия почв и плодородие: монография. Новочеркасск: Лик, 2020. 229 с.
2. Shuai, Ma, Liang-Jie, Wang, Hui-Yong, Wang et al. (2023). Impacts of land use land cover and soil property changes on soil erosion in the black soil region, China. *Journal of Environmental Management*, vol. 328. no 117024. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972202597X> (accessed: 19.02.2024).
3. Litvin, L.F., Kiryukhina, Z.P., Krasnov, S.F. et al. (2017). Dynamics of agricultural soil erosion in European Russia. *Eurasian Soil Science*, vol. 50, no. 11, pp. 1344-1353. doi: 10.1134/S1064229317110084
4. Litvin, L.F., Kiryukhina, Z.P., Krasnov, S.F. et al. (2021). Dynamics of agricultural soil erosion in Siberia and Far East. *Eurasian Soil Science*, vol. 54, no. 1, pp. 150-160. doi: 10.1134/S1064229321010075
5. Rome, Italy (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR) — main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 650 p. (electronic journal). Available at: <http://www.fao.org/3/i5199e/i5199E.pdf> (accessed: 07.03.2024).
6. Сухановский Ю.П., Прущик А.В. (2023). *Моделирование водной эрозии почв: монография*. Курск: Курский ФАНЦ, 2023. 175 с.
7. Elhakim, Amr. (2016). Estimation of soil permeability. *AEJ — Alexandria Engineering Journal*, vol. 55. doi: 10.1016/j.aej.2016.07.034. Available at: https://www.researchgate.net/publication/306537902_Estimation_of_soil_permeability.
8. Полуэктов Е.В., Батищев И.В. Мониторинг водопроницаемости и эрозионных процессов при различных способах основной обработки черноземов юга России // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11. № 2. С. 158-173. doi: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-158-173
9. Kim, B., Lee, J., Park, K. et al. (2024). Characterizing coefficient of permeability based on response of groundwater level to river stage using regional database. *Environ Earth Science*, vol. 83, p. 88. doi: 10.1007/s12665-023-11379-z

10. Афи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982. 488 с.

References

1. Poluehktov, E.V. (2020). *Ehroziya pochv i plodorodie: monografiya* [Soil erosion and fertility: monograph]. Novocherkassk, Lik Publ., 229 p.
2. Shuai, Ma, Liang-Jie, Wang, Hui-Yong, Wang et al. (2023). Impacts of land use land cover and soil property changes on soil erosion in the black soil region, China. *Journal of Environmental Management*, vol. 328. no 117024. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972202597X> (accessed: 19.02.2024).
3. Litvin, L.F., Kiryukhina, Z.P., Krasnov, S.F. et al. (2017). Dynamics of agricultural soil erosion in European Russia. *Eurasian Soil Science*, vol. 50, no. 11, pp. 1344-1353. doi: 10.1134/S1064229317110084
4. Litvin, L.F., Kiryukhina, Z.P., Krasnov, S.F. et al. (2021). Dynamics of agricultural soil erosion in Siberia and Far East. *Eurasian Soil Science*, vol. 54, no. 1, pp. 150-160. doi: 10.1134/S1064229321010075
5. Rome, Italy (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR) — main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 650 p. (electronic journal). Available at: <http://www.fao.org/3/i5199e/i5199E.pdf> (accessed: 07.03.2024).
6. Sukhanovskii, Yu.P., Prushchik, A.V. (2023). *Modelirovanie vodnoi ehrozii pochv: monografiya* [Modeling of soils water erosion: monograph]. Kursk, Federal Agricultural Kursk Research Center, 175 p.
7. Elhakim, Amr. (2016). Estimation of soil permeability. *AEJ — Alexandria Engineering Journal*, vol. 55. doi: 10.1016/j.aej.2016.07.034. Available at: https://www.researchgate.net/publication/306537902_Estimation_of_soil_permeability.
8. Poluehktov, E.V., Batishev, I.V. (2021). Monitoring vodopronitsaemosti i ehroziionnykh protsessov pri razlichnykh sposobakh osnovnoi obrabotki chernozemov yuga Rossii [Monitoring of water permeability and erosion processes in various methods of basic processing of chernozems in the south of Russia]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii* [Scientific journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], vol. 11, no. 2, pp. 158-173. doi: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-158-173
9. Kim, B., Lee, J., Park, K. et al. (2024). Characterizing coefficient of permeability based on response of groundwater level to river stage using regional database. *Environ Earth Science*, vol. 83, p. 88. doi: 10.1007/s12665-023-11379-z
10. Afii, A., Ehizen, S. (1982). *Statisticheskii analiz: Podkhod s ispol'zovaniem EHVМ* [Statistical analysis: A computer-based approach]. Moscow, Mir Publ., 488 p.

Информация об авторах:

Сухановский Юрий Петрович, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1782-501X>, soil-er@kursknet.ru

Прущик Анастасия Викторовна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9010-5548>, model-erosion@mail.ru

Витовтов Владимир Алексеевич, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3098-5053>, v.a.vitovtov@mail.ru

Рубаник Юлия Олеговна, младший научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0896-2306>, j.r.97@mail.ru

Титов Александр Григорьевич, научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3110-5481>, titov_a_g@mail.ru

Information about the authors:

Yurii P. Sukhanovskii, doctor of agricultural sciences, leading researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1782-501X>, soil-er@kursknet.ru

Anastasia V. Prushchik, candidate of agricultural sciences, senior researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9010-5548>, model-erosion@mail.ru

Vladimir A. Vitovtov, senior researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3098-5053>, v.a.vitovtov@mail.ru

Yulija O. Rubanik, researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0896-2306>, j.r.97@mail.ru

Alexandr G. Titov, researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3110-5481>, titov_a_g@mail.ru

