УДК 631.613

DOI: 10.31774/2222-1816-2020-1-52-73

В. М. Ивонин

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ РОЛИ ЛЕСНЫХ ПОЛОС НА СКЛОНАХ

Цель: исследовать противоэрозионную роль лесных полос на склонах. **Методы:** искусственное дождевание на ландшафтных профилях. **Результаты.** Определено положительное влияние лесных полос (Ростовская область) на содержание гумуса и другие свойства верхнего слоя черноземов обыкновенных, а также на формирование поверхностного стока и проявление эрозии. При удалении от одиночной лесной полосы (высотой H , м) вниз по склону содержание гумуса в верхнем слое почвы снижается по линейной зависимости, водно-физические свойства почв (плотность и пористость) изменяются по логарифмическим зависимостям. Это обеспечивает регулирование поверхностного стока возле лесной полосы и с увеличением расстояния от нее ($30 H$ и более) возрастание стока и эрозии. На участке склона между лесными полосами распределение гумуса, водопрочных агрегатов, плотности и пористости в слое почв 0–20 см характеризуется полиномиальными уравнениями. Это отображает следующую картину: изменение стока характеризуется полиномом третьего порядка, а эрозии почв – четвертого порядка (около приводораздельной и прибалочной лесных полос сток и эрозия отсутствуют, а к центру поля они возрастают). Положительное воздействие приводораздельной лесной полосы распространяется на $30\text{--}40 H$ вниз по склону, прибалочной лесной полосы – на $15\text{--}20 H$ вверх по склону. На склоне без лесных полос не отмечено существенных изменений содержания гумуса, водопрочных агрегатов и водно-физических свойств. При этом условия формирования поверхностного стока и проявления эрозии почв могут изменяться в связи с эродированностью почвы. **Выводы.** Противоэрозионное воздействие одиночной лесной полосы вниз по склону постепенно ослабевает по логарифмическим зависимостям, полностью исчезая на расстоянии $30 H$ и более. Соседние по склону лесные полосы обеспечивают свое противоэрозионное воздействие на межполосное пространство ($60 H$), которое характеризуется полиномиальными уравнениями.

Ключевые слова: лесная полоса; агролесомелиорация; агролесоводство; поверхностный сток; эрозия почв.

V. M. Ivonin

Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

RESEARCH OF EROSION-PREVENTIVE ROLE OF FOREST STRIPS ON SLOPES

Purpose: to investigate the erosion-preventive role of forest strips on the slopes. **Methods:** artificial sprinkling on landscape profiles. **Results:** the positive influence of forest belts (Rostov region) on the humus content and other properties of the upper layer of ordinary chernozems, as well as on the formation of surface runoff and the erosion occurrence was de-

terminated. When moving off from a single forest strip (height H , m) down the slope, the humus content in the upper soil layer decreases linearly, the water-physical properties of soils (density and porosity) change according to logarithmic dependencies. This ensures the surface runoff regulation near the forest strip and increase of runoff and erosion moving off it ($30 H$ or more). The distribution of humus, water-resistant aggregates, density and porosity in a soil layer of 0–20 cm on a slope section between forest strips is characterized by polynomial equations. This reflects the following picture: a change in runoff is characterized by a third-order polynomial, and soil erosion is a fourth-order one (absence of runoff and erosion near the watershed divide and ravine forest strips and their increase towards the center of the field). The positive impact of the watershed dividing forest strip extends $30\text{--}40 H$ down the slope, and the ravine forest strip $15\text{--}20 H$ up the slope. On the slope without forest strips, no significant changes in humus, water-resistant aggregates, and water-physical properties were noted. In this case the conditions for the surface runoff formation and the soil erosion occurrence may vary due to soil erosion.

Conclusions: the erosion-preventive impact of a single forest strip down the slope gradually decreases according to the logarithmic dependences, completely disappearing at a distance of $30 H$ or more. Forest belts adjacent to the slope provide their erosion-preventive effect on the space between strips ($60 H$) which is characterized by polynomial equations.

Key words: forest strip; land and forest reclamation; agroforestry; surface runoff; soil erosion.

Введение. Полезащитные лесные полосы составляют основу лесоаграрных ландшафтов, что является одним из положений современной концепции защитного лесоразведения (агролесомелиорации) [1]. Эти насаждения, являясь малоизмененными натурными (природоподобными) объектами, обеспечивают возможность создания единой, устойчивой структуры иерархического лесоаграрного ландшафта для экологической адаптации к ней сельскохозяйственного землепользования [2].

Определены особенности эколого-мелиоративного влияния полезащитных насаждений на прилегающие поля [3, 4]. Декларируется, что лесные полосы способствуют снижению поверхностного стока и накоплению почвенной влаги, сокращению эрозии (ветровой и водной) [5].

Лесомелиоративная защита полей позволяет дополнительно накапливать снег, утеплять почву, увеличивать поглощение талых вод на защищенных полях, снижать поверхностный сток [6]. Следует учитывать, что в последнее десятилетие в степной зоне эрозия почв при снеготаянии проявляется слабо (ливневая эрозия преобладает над весенним стоком).

За рубежом термин «агролесомелиорация» отождествлен с более широким понятием «агролесоводство». Системы агролесоводства являются

одним из самых известных средств обеспечения существования и устойчивого развития коренных народов Гималаев (Индия) [7]. В Южной Африке считают, что агролесоводство является беспримысленным средством смягчения последствий климатических изменений и решения проблем продовольственной безопасности [8]. На севере Китая лесомелиоративные комплексы имеют перспективы повышения продуктивности ландшафтов [9].

В США защитные свойства лесов рассматриваются агролесоводством: на равнинах применяют ветрозащитные лесные полосы, а также пастбищезащитные лесные насаждения и др. [10]. При этом фактически не исследована противоэрозионная роль лесных полос на склонах.

Таким образом, для дальнейшего развития теории и практики агролесомелиорации (агролесоводства) необходимо продолжить исследования противоэрозионной роли лесных полос на склонах, обратив внимание на ливневую эрозию почв. При этом перспективным методом исследований является искусственное дождевание [11].

Материалы и методы. Исследовали противоэрозионную роль типичных лесных полос Доно-Донецкого лесомелиоративного района Ростовской области (Усть-Донецкий административный район, бассейн р. Кундрючья). В этих лесных полосах закладывали временные пробные площади с нахождением на каждой из них 200 деревьев преобладающей породы (сплошной пересчет). На пробных площадях определяли состав, возраст, средний диаметр и высоту пород, количество стволов, площади сечений и запас древесины. Противоэрозионную роль лесных полос изучали на ландшафтных профилях, направленных перпендикулярно лесным полосам и вдоль прямых склонов (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Характеристика ландшафтных профилей

Место отбора образца (пункт дождевания)	Характеристика пункта
1	2
Профиль А – участок склона (всходы кукурузы) с одиночной ПВП ($H = 10,9$ м), 10РБ, 28 лет	
Расстояние $2H$ от лесной полосы вниз по склону	Прямой склон, ЮЗЭ, крутизна $1,5^\circ$

Продолжение таблицы 1

1	2
То же, 5 <i>H</i>	То же
10 <i>H</i>	То же
15 <i>H</i>	То же
30 <i>H</i>	То же
Профиль В – участок склона между ПВП (<i>H</i> = 10 м) и ПБП (<i>H</i> = 10 м). Их ширина 18 м	
СРП, 10Рб, 21 год, <i>H</i> = 10 м	Лесной полог, склон ЮЗЭ, 2°50'
Расстояние 2 <i>H</i> от СРП	Черный пар, прямой склон ЮЗЭ
То же 5 <i>H</i>	
10 <i>H</i>	
30 <i>H</i> (середина поля)	
Расстояние 10 <i>H</i> от ПБП вверх по склону	
То же 5 <i>H</i>	
То же 2 <i>H</i>	
ПБП, 5Яс(з) 3Рб 2Гл + Шк(б) + Аб(о), 21 год, <i>H</i> = 10 м	Лесной полог, склон ЮЗЭ, 2°50'
Профиль С – участок склона без лесных полос	
Приводораздельный участок склона балок	Черный пар, склон СВЭ, крутизна 1,5°
100 м вниз по склону	То же 2°
То же 200 м	То же 2°40'
То же 300 м	То же
То же 400 м	То же
То же около 500 м	То же
Примечание – СРП – средозащитная полоса; ПВП – приводораздельная лесная полоса; ПБП – прибалочная лесная полоса; Рб – робиния псевдоакация; Гл – гледичия трехколючковая; Яс(з) – ясень зеленый; Шк(б) – шелковица белая; Аб(о) – абрикос обыкновенный; ЮЗЭ – юго-западная экспозиция; СВЭ – северо-восточная экспозиция.	

**Таблица 2 – Характеристика лесных полос, которые пересекают
ландшафтные профили**

Про- филь	Состав лесополосы	Поро- да	Возраст, лет	Среднее		Количество стволов, шт./га	Запас, м³/га
				высота, м	диа- метр, см		
А	10Рб, ед. Аб(о)	Рб	28	10,9	9,9	2513	108,0
		Аб	28	6,9	7,0	312	3,9
Итого						2825	111,9
В	10Рб, подлесок Кл(т)	Рб	21	10,0	9,9	1768	71,0
		Кл(т)	21	2,0	—	1023	—
Итого						2791	71,0
В	5Яс(з) 3Рб 2Гл + + Шк(б) + Аб(о)	Яс	26	8,0	8,2	1467	34,9
		Рб	24	10,0	11,0	463	22,9
		Гл	24	8,2	10,6	463	16,8
		Шк	24	4,0	6,7	227	2,0
		Аб	24	5,0	7,3	23	—
Итого						2643	76,6
Примечание – Кл(т) – клен татарский.							

Искусственное дождевание почвы проводили на пунктах учета ландшафтных профилей, пересекающих под прямым углом лесные полосы, по методике, описанной ранее [11]. На пунктах учета размещали площадки дождевания размером $1,43 \times 0,7$ м.

Применялась мобильная исследовательская капельно-струйная дождевальная установка нашей конструкции. В опытах принимали: интенсивность дождевания 2 мм/мин, средний диаметр капли – 4 мм. Это обеспечивало энергию среднего натурального ливня в регионе интенсивностью 0,7 мм/мин при среднем диаметре капли 2,9 мм/мин.

Во время дождевания определяли интенсивность впитывания осадков, объемы стока, мутность сточной воды, эрозию почв и другие характеристики. Сток учитывали на водоприемном лотке (из листового железа) объемным способом. Необходимое давление воды в установке достигалось с помощью напорного бака и вентиля-регулятора с водомером.

Рядом с площадками дождевания отбирали образцы из слоя почв 0–20 см с ненарушенным строением, которые упаковывали при помощи марли и жидкого парафина (воска) для транспортировки и хранения. В образцах определяли влажность почвы, гранулометрический и микроагрегатный состав, водопрочность агрегатов по Н. М. Бакшееву, количество гумуса, плотность и пористость почв. При этом использовали методики, изложенные в государственном стандарте ГОСТ 12071-2000¹, а также в работах А. Ф. Вадюниной и др. [12], И. С. Кауричева и др. [13].

По результатам лабораторного определения гранулометрического и микроагрегатного состава рассчитывали следующие показатели:

- фактор дисперсности по Н. А. Качинскому:

$$K_d = (I_m/I_r) \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

- фактор структурности по Фагелеру:

¹ ГОСТ 12071-2000. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. – Взамен ГОСТ 12071-84; введ. 2001-07-01. – М.: Госстрой России, ЦПП, 2001. – 21 с.

$$K_c = [(I_r - I_m) / I_r] \cdot 100 \% ; \quad (2)$$

- гранулометрический показатель структурности по А. Ф. Вадюниной:

$$K_g = [(I_r + M_{\pi}) / (C_{\pi} + K_{\pi})] \cdot 100 \% ; \quad (3)$$

- степень агрегирования по Бейверу – Роадесу:

$$K_a = [(\Phi_m - \Phi_r) / \Phi_m] \cdot 100 \% . \quad (4)$$

В соотношениях (1)–(4) принято: K_d – фактор дисперсности; I_m и I_r – содержание илистых частиц соответственно при микроагрегатном и гранулометрическом анализе, %; K_c – фактор структурности; K_g – гранулометрический показатель структурности; M_{π} , C_{π} и K_{π} – содержание соответственно мелкой, средней и крупной пыли при гранулометрическом анализе, %; K_a – степень агрегирования, %; Φ_m и Φ_r – содержание фракций песка (мелкого, среднего, крупного), т. е. частиц диаметром $> 0,05$ мм, при микроагрегатном и гранулометрическом анализах, %.

Полученные данные обрабатывали с помощью компьютерных программ Microsoft Office Excel. В исследованиях принимала участие Л. В. Власова.

Результаты и обсуждение. Характеристики, зависящие от гранулометрического и микроагрегатного состава слоя почв 0–20 см, по пунктам учета ландшафтных профилей приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Факторы, зависящие от гранулометрического и микроагрегатного состава слоя почв 0–20 см, на ландшафтных профилях

Место отбора образца (пункт учета)	Фактор, %		Гранулометрический показатель структурности по Вадюниной, %	Степень агрегирования по Бейверу – Роадесу, %	Средняя разрушающая нагрузка на агрегат, кг
	дисперсности по Качинскому	структурности по Фогелеру			
1	2	3	4	5	6
Профиль А – участок склона с одиночной лесной полосой ($H = 10,9$ м)					
Вниз от лесополосы: 2 H	10,6	89,4	82,8	77,3	1,55
5 H	5,6	94,4	78,1	80,4	1,34
10 H	9,0	91,0	86,4	76,8	1,53

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
15 Н	12,0	87,9	81,2	70,2	2,20
30 Н	9,3	90,7	79,2	72,1	1,76
Профиль В – участок склона между ПВП (Н = 10 м) и ПБП (Н = 10 м)					
Полог СРП	9,1	90,9	93,8	59,5	1,99
Вниз от СРП: 2 Н	7,4	92,6	83,6	61,8	2,36
5 Н	6,8	93,2	97,7	70,8	2,78
10 Н	15,5	84,4	96,6	53,8	3,39
30 Н (центр)	4,4	95,6	78,0	62,6	1,96
Вверх от ПБП: 10 Н	6,5	93,5	90,3	40,0	2,05
5 Н	10,3	89,7	83,3	38,1	2,06
2–3 Н	6,0	94,0	87,4	75,1	1,34
Полог ПБП	11,4	88,5	81,7	66,5	1,95
Профиль С – участок склона без лесных полос					
Водораздел	10,1	89,8	101,4	69,1	1,69
100 м от водораздела	9,4	90,6	92,9	82,7	2,10
200 м от водораздела	8,4	91,6	89,8	72,0	1,92
300 м от водораздела	8,0	92,0	89,8	71,6	1,40
400 м от водораздела	6,5	93,5	91,8	67,8	1,90
Около 500 м	13,3	86,7	85,2	59,9	1,57

Факторы дисперсности и структурности представляют водоустойчивость микроагрегатов, гранулометрический показатель структурности – соотношение активных механических элементов, обладающих цементирующей способностью и принимающих участие в коагуляции, и пассивных элементов. Степень агрегирования механических элементов влияет на физические свойства: увеличивается пористость; улучшаются другие свойства почв, определяющие их противэрозионную устойчивость. Разрушающие нагрузки на агрегат может характеризовать сопротивляемость почв водной и ветровой эрозии.

По данным таблицы 3, лесные полосы оказывают слабое положительное влияние на степень агрегированности и гранулометрический показатель структурности. На остальные исследуемые факторы лесные полосы существенно не влияют, что связано с незначительным их воздействием на гранулометрический и микроагрегатный состав верхнего слоя почв прилегающих полевых участков, несмотря на то, что некоторое перераспределение илистых фракций по склону и по профилю почв может наблюдаться при местном стоке.

В то же время лесные полосы оказывают существенное влияние на содержание гумуса, водопрочность агрегатов (по Бакшееву), плотность сложения почвы и пористость верхнего слоя почв (таблица 4).

Таблица 4 – Количество гумуса, водопрочность агрегатов и водно-физические свойства в слое почв 0–20 см на ландшафтных профилях

Место отбора образца (пункт учета)	Количество гумуса, %	Водопрочность агрегатов по Бакшееву, %	Удельная масса, г/см ³	Плотность сложения почвы, г/см ³	Пористость (порозность), %
Профиль А – участок склона с одиночной лесной полосой ($H = 10,9$ м)					
Вниз от лесополосы: 2 H	3,81	35,8	2,40	0,88	63,3
5 H	3,74	22,5	2,48	0,99	60,1
10 H	3,87	24,3	2,51	0,97	61,3
15 H	3,56	51,0	2,42	1,27	47,5
30 H	3,56	31,4	2,36	1,24	47,4
Профиль В – участок склона между ПВП ($H = 10$ м) и ПБП ($H = 10$ м)					
Полог ПВП	4,40	62,8	2,43	0,83	65,8
Вниз от лесополосы: 2 H	3,87	45,6	2,36	1,20	49,1
5 H	3,76	50,8	2,41	1,02	57,7
10 H	3,23	59,7	2,46	1,11	54,9
30 H (центр поля)	3,46	25,5	2,52	1,17	53,6
Вверх от ПБП: 10 H	3,76	28,8	2,35	1,28	45,5
5 H	3,13	42,9	2,45	1,14	53,5
2 H	3,66	22,9	2,42	1,14	52,9
Полог ПБП	3,87	70,8	2,35	1,09	53,6
Профиль С – участок склона без лесных полос					
Водораздел	3,92	25,2	2,41	1,10	54,3
100 м от водораздела	3,23	49,2	2,40	1,07	55,4
200 м от водораздела	4,61	26,8	2,40	1,10	54,2
300 м от водораздела	3,71	37,0	2,40	1,03	57,1
400 м от водораздела	4,03	56,7	2,39	1,03	56,9
Около 500 м вниз по склону	3,50	36,5	2,41	1,07	55,6

Так, в профиле А (склон с одиночной лесной полосой) содержание гумуса в верхнем слое почвы снижается по мере удаления от лесного насаждения, т. е. его воздействие по этому фактору постепенно ослабевает и полностью исчезает.

Иная картина наблюдается на участке поля (ширина около 600 м) между приводораздельной и прибалочной лесными полосами (профиль В).

Здесь максимальное содержание гумуса в слое почвы 0–20 см наблюдается под пологом соседних по склону лесных полос (рисунок 1). В целом

распределение почвенного гумуса на ландшафтных профилях имеет вид:

- ландшафтный профиль А:

$$C = -0,0008 L + 3,854 \text{ при } R^2 = 0,661; \quad (5)$$

- ландшафтный профиль В:

$$C = 2E - 10L^4 - 3E - 07L^3 + 0,0001L^2 - 0,0206L + 4,3705$$

при $R^2 = 0,743;$ (6)

- ландшафтный профиль С:

$$C = -6E - 06L^2 + 0,0029L + 3,6714 \text{ при } R^2 = 0,128. \quad (7)$$

Рисунок 1 – Связь содержания гумуса в слое почв 0–20 см с расстоянием вниз по склону от приводораздельной лесной полосы (водораздела)

В уравнениях (5)–(7) принято, что C – содержание гумуса в слое почв 0–20 см, %; L – расстояние вниз по склону от приводораздельной лесной полосы (водораздела), м.

Анализируя уравнения (5)–(7), а также данные рисунка 1, заключаем, что в ландшафтном профиле А изменение содержания гумуса почвы характеризуется линейной зависимостью. По мере удаления от лесной полосы содержание гумуса в почве уменьшается с 3,8 до 3,6 % (центр поля). В ландшафтном профиле В (поле между приводораздельной и прибалоч-

ной лесными полосами) содержание гумуса изменяется по полиномиальной кривой четвертого порядка от 4,4 % (приводораздельная лесная полоса) до 3,5 % (центр поля, 30 H), а затем увеличивается (по мере приближения к прибалочной лесной полосе) до 3,8 %.

В ландшафтном профиле С (поле без лесных полос) изменение содержания гумуса почвы характеризуется полиномом второго порядка с низкой теснотой связи ($R^2 = 0,128$). Следовательно, других существенных факторов влияния на содержание гумуса в почве (кроме пестроты почвенного плодородия) не обнаруживается.

Одним из показателей противоэрозионной стойкости почв является содержание в них водопрочных агрегатов. Максимальное значение этого показателя обнаружено под пологом приводораздельной и прибалочной лесных полос ландшафтного профиля В. В ландшафтных профилях А и С каких-либо закономерностей по этому показателю не наблюдается (см. таблицу 4).

Содержание водопрочных агрегатов в слое почвы 0–20 см на пунктах учета ландшафтных профилей (рисунок 2) характеризуют уравнения связи:

- ландшафтный профиль А:

$$W = 0,0149 L + 31,009 \text{ при } R^2 = 0,024; \quad (8)$$

- ландшафтный профиль В:

$$W = 3E - 09L^4 - 1E - 06L^3 - 2E - 05L^2 - 0,0181L + 55,447$$

при $R^2 = 0,629$; (9)

- ландшафтный профиль С:

$$W = -0,0004L^2 + 0,1483L + 24,036 \text{ при } R^2 = 0,142. \quad (10)$$

В соотношениях (8)–(10) принято, что W – содержание водопрочных агрегатов по Бакшееву в слое почв 0–20 см, %.

Анализ соотношений (8)–(10) и данных рисунка 2 показал, что в ландшафтном профиле А изменение содержания водопрочных агрегатов

в верхнем слое почвы характеризуется линейной зависимостью. Однако теснота связи этой зависимости незначительна. Поэтому одиночная приводораздельная лесная полоса не оказала влияния на данный показатель противоэрозионной стойкости почв на склоне. В ландшафтном профиле В изменение содержания водопрочных агрегатов в верхнем слое почв характеризует полиномиальная кривая четвертого порядка. При этом приводораздельная лесная полоса оказывает положительное воздействие на водопрочность агрегатов вниз по склону на расстоянии более 40 м, а прибалочная лесная полоса – вверх по склону на расстоянии около 15 м. В ландшафтном профиле С изменение содержания водопрочных агрегатов в почве на склоне представлено полиномом второго порядка. Однако это уравнение характеризуется низкой теснотой связи вследствие эродированности почв на открытом склоне.

Рисунок 2 – Связь содержания водопрочных агрегатов в слое почв 0–20 см с расстоянием вниз по склону от приводораздельной лесной полосы (водораздела)

Плотность сложения почвы также характеризует противоэрозионную стойкость почвы, так как определяет интенсивность впитывания осадков. Минимальное значение этого показателя (максимальное впитывание) обнаружено около и под пологом лесных полос в ландшафтных

профилях А и В (см. таблицу 4). Это свидетельствует о высоком потенциале регулирования стока лесными полосами. Анализ плотности сложения почв в ландшафтных профилях проведем при рассмотрении уравнений связи:

- ландшафтный профиль А:

$$\rho = 0,1565 \ln(L) + 0,3438 \text{ при } R^2 = 0,736; \quad (11)$$

- ландшафтный профиль В:

$$\rho = -1E - 0,9L^3 - 9E - 07L^2 + 0,0012L + 0,9856 \text{ при } R^2 = 0,444; \quad (12)$$

- ландшафтный профиль С:

$$\rho = -1E - 04L + 1,091 \text{ при } R^2 = 0,335. \quad (13)$$

В соотношениях (11)–(13) принято, что ρ – плотность слоя почв 0–20 см, г/см³.

Зависимость (11) представлена логарифмическим уравнением, зависимость (12) – полиномом третьего порядка, зависимость (13) – линейным уравнением.

Графическое решение уравнений (11)–(13) приведено на рисунке 3.

Рисунок 3 – Связь плотности сложения почв в слое 0–20 см с расстоянием вниз по склону от водораздельной лесной полосы (водораздела)

Анализируя представленные уравнения и данные рисунка 3, заключаем, что логарифмическая зависимость для ландшафтного профиля А ха-

характеризует наименьшее значение плотности верхнего слоя почв около лесной полосы (менее 1 г/см^3). По мере удаления вниз по склону от лесной полосы плотность почвы увеличивается, достигая у подошвы склона значения $1,3 \text{ г/см}^3$. Это означает, что условия инфильтрации поверхностного стока ухудшаются по мере удаления от водораздельного насаждения.

Полиномиальная кривая ландшафтного профиля В также характеризует минимум плотности верхнего слоя почвы под пологом и около лесного насаждения. Увеличение этого показателя происходит только до середины межполосного поля. В дальнейшем, по мере приближения к прибалочной лесной полосе, плотность почвы уменьшается, характеризуя положительное воздействие прибалочной полосы на регулирование стока. Зона такого воздействия лесных полос вниз по склону примерно равна 30 м , вверх по склону – около 20 м .

Линейная зависимость ландшафтного профиля С характеризует незначительное варьирование плотности верхнего слоя почвы на отрезке склона от водораздела до подошвы.

Важнейшей характеристикой водно-физических свойств почв является порозность (пористость). На участках склонов с лесными полосами максимальное значение этого показателя наблюдается около и под пологом лесных полос ландшафтных профилей А и В (см. таблицу 4), что свидетельствует о высоком стокорегулирующем потенциале лесохозяйственных урочищ ландшафта. На склоне без лесных полос наблюдается незначительное варьирование этого показателя на пунктах учета ландшафтных профилей. Регрессионный анализ данных таблицы 4 по этому показателю представим в виде:

- ландшафтный профиль А:

$$\pi = -5,517 \ln(L) + 82,247 \text{ при } R^2 = 0,765; \quad (14)$$

- ландшафтный профиль В:

$$\pi = 1E - 0,7L^3 - 3E - 05L^2 - 0,0275L + 58,381 \text{ при } R^2 = 0,325; \quad (15)$$

- ландшафтный профиль С:

$$п = 0,004 L + 54,49 \text{ при } R^2 = 0,362. \quad (16)$$

В соотношениях (14)–(16) принято, что $п$ – пористость (порозность) слоя почв 0–20 см, %. Графический анализ этих уравнений приведен на рисунке 4.

Рисунок 4 – Связь пористости (порозности) слоя почв 0–20 см с расстоянием вниз по склону от приводораздельной лесной полосы (водораздела)

Анализируя данные зависимостей (14)–(16) и рисунка 4, заключаем, что логарифмическая зависимость ландшафтного профиля А характеризует наибольшее значение пористости верхнего слоя почв около лесной полосы (примерно 58 %). По мере удаления от лесной полосы вниз по склону пористость уменьшается, достигая у подошвы склона значения около 47 %. Следовательно, условия инфильтрации местного стока ухудшаются по мере удаления вниз по склону от лесохозяйственного урочища ландшафта.

Полиномиальная зависимость третьего порядка ландшафтного профиля В также характеризует максимум пористости верхнего слоя почвы под пологом и около лесной полосы. Вниз по склону происходит снижение этого показателя до середины межполосного поля (30–35 H). По мере приближения к прибалочной лесной полосе пористость почвы начинает увеличиваться. Зона положительного воздействия лесных полос на пористость почв вниз по склону примерно равна 35 H , вверх по склону – около 15 H .

На склоне без лесных полос (ландшафтный профиль С) наблюдается устойчивое снижение пористости почвы по мере удаления от водораздела к подошве склона, что, возможно, объясняется соответствующими изменениями эродированности почвы.

Таким образом, исследование свойств верхнего слоя почв в ландшафтных профилях показало, что в профиле А по мере удаления от одиночной лесной полосы вниз по склону содержание гумуса в почве линейно уменьшается. При этом одиночная лесная полоса не влияет на содержание водопрочных агрегатов почвы прилегающего участка склона. Одновременно выявлены логарифмические зависимости, показывающие увеличение плотности сложения и уменьшение пористости верхнего слоя почв по мере удаления от одиночной лесной полосы. В профиле В по мере удаления от водораздельной и приближения к прибалочной лесной полосе содержание гумуса и водопрочных агрегатов в почве вначале уменьшается, а затем увеличивается по полиномиальным кривым (максимальные значения этих показателей зафиксированы под пологом лесных полос).

В профиле С исследуемые характеристики почв по мере удаления от водораздела и приближения к подошве склона представлены зависимостями с незначительной теснотой связи или уравнениями, существенные связи которых определяются эродированностью почвы.

Аналогичным образом на пунктах учета ландшафтных профилей изменяются показатели местного стока и эрозии почв (таблица 5).

**Таблица 5 – Показатели искусственного дождевания почв
(слой дождя 60 мм, интенсивность дождя 2 мм/мин)**

Пункт учета	Влажность слоя почвы 0–20 см, %	Слой, мм		Коэф- фици- ент стока	Средняя мут- ность стока, г/л	Модуль стока взвешен- ных нано- сов, т/га
		стока	ин- филь- трации			
1	2	3	4	5	6	7
Профиль А – участок склона с одиночной лесной полосой ($H = 10,9$ м)						
Вниз от лесополосы: 2 H	19,8	14,8	45,2	0,247	32,12	4,75
5 H	19,4	12,5	47,5	0,208	20,00	2,50

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7
10 <i>H</i>	19,7	21,9	38,1	0,365	29,08	6,37
15 <i>H</i>	23,5	24,0	36,0	0,400	86,36	20,73
30 <i>H</i>	23,2	24,5	35,5	0,408	61,92	15,17
Профиль В – участок склона между ПВП (<i>H</i> = 10 м) и ПБП (<i>H</i> = 10 м)						
Полог ПВП	22,4	0	60,0	0	0	0
Вниз от СРП: 2 <i>H</i>	22,3	6,3	53,7	0,105	21,32	1,34
5 <i>H</i>	24,5	5,8	54,2	0,097	39,88	5,21
10 <i>H</i>	24,3	7,6	52,4	0,127	53,28	4,05
30 <i>H</i> (центр поля)	21,2	15,3	44,7	0,255	43,80	6,70
Вверх от ПБП: 10 <i>H</i>	17,9	9,3	50,7	0,155	174,84	16,26
5 <i>H</i>	20,9	12,7	47,3	0,212	49,36	6,27
2–3 <i>H</i>	23,5	5,9	54,1	0,099	14,52	0,86
Полог ПБП	15,8	0	60,0	0	0	0
Профиль С – участок склона без лесных полос						
Водораздел	24,0	14,7	45,3	0,245	91,88	13,51
100 м от водораздела	22,3	17,9	42,1	0,298	58,44	10,46
200 м от водораздела	24,5	15,1	44,9	0,252	141,36	21,34
300 м от водораздела	23,2	18,5	41,5	0,308	69,48	12,85
400 м от водораздела	25,5	18,0	42,0	0,300	81,84	14,73
Около 500 м вниз по склону	23,9	15,6	44,4	0,260	92,56	14,44

По данным таблицы 5 изменения коэффициентов стока на пунктах учета ландшафтных профилей можно отобразить в виде:

- ландшафтный профиль А (логарифмическая зависимость):

$$\sigma = 0,0763 \ln(L) - 0,0194 \text{ при } R^2 = 0,734; \quad (17)$$

- ландшафтный профиль В (полиномиальная кривая):

$$\sigma = -3E - 09L^3 + 5E - 07L^2 + 0,0009L + 0,043 \text{ при } R^2 = 0,759; \quad (18)$$

- ландшафтный профиль С (линейное уравнение):

$$\sigma = 4E - 05L + 0,2674 \text{ при } R^2 = 0,069. \quad (19)$$

В уравнениях (17)–(19) принято, что σ – коэффициент стока.

Графические решения зависимостей (17)–(19) приведены на рисунке 5.

Зависимости (17), (18) характеризуются высокой теснотой связи, а уравнение (19) – низкой. Это свидетельствует о существенном влиянии лесных полос (в ландшафтных профилях А и В) на сток при искусственном дождевании и об отсутствии существенного влияния на сток каких-либо факторов в ландшафтном профиле С.

Рисунок 5 – Связь коэффициентов стока с расстоянием вниз по склону от приводораздельной лесной полосы (водораздела)

Так, в профиле А сток около одиночной лесной полосы практически отсутствует, но на расстоянии 30 м и более от лесной полосы коэффициент стока возрастает до 0,42 и более.

В профиле В коэффициент стока около верхней лесной полосы не превышает 0,05, а на расстоянии 35 м он достигает максимума (0,27). Далее по мере приближения к нижней (прибалочной) лесной полосе коэффициент стока вновь постепенно снижается до 0,04.

Поверхностный сток на пашне обычно связан с эрозией почвы. Поэтому связи коэффициентов стока и показателей эрозии с расстояниями от приводораздельной лесной полосы (водораздела) аналогичны друг другу. Связи модулей стока взвешенных наносов (M , т/га) с расстоянием от приводораздельной лесной полосы (водораздела) отображают равенства:

- ландшафтный профиль А:

$$M = 5,421 \ln(L) - 14,636 \text{ при } R^2 = 0,5238; \quad (20)$$

- ландшафтный профиль В:

$$M = -3E - 09L^4 + 3E - 06L^3 - 0,0008L^2 + 0,0995L + 0,2873$$

при $R^2 = 0,8067;$ (21)

- ландшафтный профиль С:

$$M = 0,0031 L + 13,568 \text{ при } R^2 = 0,0317. \quad (22)$$

В графическом виде уравнения (20)–(22) приведены на рисунке 6.

Рисунок 6 – Связь модулей стока взвешенных наносов с расстоянием вниз по склону от приводораздельной лесной полосы (водораздела)

Анализ данных рисунка 6 и зависимостей (20)–(22) показал, что связь уравнения (22) несущественна, а уравнений (20), (21) – тесная.

В профиле А около одиночной лесной полосы эрозия почв отсутствует, но по мере удаления от нее она увеличивается до 16 т/га и более (расстояние $\geq 30 H$). В профиле В эрозия почв отсутствует под пологом и около приводораздельной лесной полосы, по мере удаления от нее на расстояние 45 H эрозия увеличивается до 14 т/га, но при приближении к прибалочной лесной полосе эрозия вновь отсутствует.

Следовательно, по мере удаления от приводораздельной (одиночной) лесной полосы коэффициент стока и эрозия почв при дождевании увеличиваются по логарифмическим зависимостям; на участке склона между лесными полосами (приводораздельной и прибалочной) коэффициент стока отображается полиномом третьего порядка, а эрозия почв – четвертого порядка.

Выводы. Лесные полосы на склонах не оказывают существенного влияния на противоэрозионные факторы, связанные с гранулометрическим и микроагрегатным составом слоя почв 0–20 см, но положительно влияют

на содержание гумуса, водопрочность агрегатов (по Бакшееву), плотность сложения и пористость верхнего слоя почв, что определяет условия формирования поверхностного стока и проявления эрозии.

По мере удаления от одиночной лесной полосы (высотой H , м) вниз по склону содержание гумуса в верхнем слое почвы снижается по линейной зависимости. При этом водно-физические свойства почв (плотность и пористость) на расстоянии $30 H$ и более изменяются по логарифмическим зависимостям, характеризуя ухудшение условий инфильтрации поверхностного стока.

На участке склона между лесными полосами содержание гумуса и водопрочных агрегатов в верхнем слое почвы характеризуется полиномиальными кривыми четвертого порядка. С удалением от приводораздельной лесной полосы к центру поля содержание их уменьшается, а затем, по мере приближения к прибалочной лесной полосе, – увеличивается.

Плотность и пористость верхнего слоя почв на склоне между лесными полосами изменяются также по полиномиальным зависимостям. При этом положительное воздействие приводораздельной лесной полосы вниз по склону оказывается примерно на $30\text{--}40 H$, прибалочной лесной полосы вверх по склону примерно на $15\text{--}20 H$. Это создает довольно сложную картину формирования стока и проявления эрозии почв: по мере удаления от приводораздельной и приближения к прибалочной лесной полосе коэффициенты стока характеризуются полиномом третьего порядка, эрозия почв – четвертого порядка (около приводораздельной и прибалочной лесных полос сток и эрозия отсутствуют, при приближении к центру поля они существенно возрастают).

На участке склона без лесных полос при удалении от водораздела вниз по склону не отмечено существенных изменений в содержании гумуса, водопрочных агрегатов, водно-физических свойствах верхнего слоя почв или эти изменения определяются степенью эродированности почв.

Таким образом, противоэрозионное воздействие приводораздельной лесной полосы вниз по склону постепенно ослабевает, полностью исчезая на расстоянии 30 *H* и более. Система приводораздельной и прибалочной лесных полос (расстояние между ними 60 *H*) обеспечивает стыковку соседних полей воздействия, образуя устойчивую структуру.

Список использованных источников

- 1 ВНИАЛМИ – лидер агролесомелиоративной науки России: современная концепция защитного лесоразведения / К. Н. Кулик, Н. Н. Дубенок, А. С. Рулев, А. М. Пугачева // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки. – 2015. – № 3(13). – С. 108–114.
- 2 Ivonin, V. M. Theoretical concept of adaptive forest land reclamation of agricultural landscapes / V. M. Ivonin, I. V. Voskoboinikova, E. Yu. Matvienko // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, № 13. – P. 95–103.
- 3 Михин, Д. В. Эколого-мелиоративные особенности полезащитных насаждений Воронежской области / Д. В. Михин // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=11575>.
- 4 Медведев, И. Ф. Эколого-мелиоративные особенности развития почвенной системы в зоне влияния лесных полос / И. Ф. Медведев, Д. А. Анисимов, А. А. Бочков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2013. – № 11. – С. 3–9.
- 5 Кундиус, В. В. Роль агролесомелиорации в повышении экологической устойчивости и экономической эффективности агроландшафтов / В. В. Кундиус // Природообустройство. – 2010. – № 4. – С. 92–95.
- 6 Петелько, А. И. Влияние основных природных факторов на формирование поверхностного стока талых вод в лесомелиорированных агроландшафтах в лесостепной и степной зонах европейской части России / А. И. Петелько, В. И. Панов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2019. – Т. 43, № 1. – С. 16–29.
- 7 Parihaar, R. S. Status of an indigenous agroforestry system: A case study in Kumaun Himalaya, India / R. S. Parihaar, K. Bargal, S. S. Bargal // Indian Journal of Agricultural Sciences. – 2015. – № 85(3). – P. 442–447.
- 8 The potential of using agroforestry as a win-win solution to climate change mitigation and adaptation and meeting food security challenges in Southern Africa / S. Syampungani, P. W. Chirwa, F. K. Akinnifesi, O. C. Ajayi // Agric J. – 2010. – № 5. – P. 80–88.
- 9 Liu, T. X. Agroforestry Systems in Northern Temperate Zone and Productive Perspectives / T. X. Liu, S. W. Zhang // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 304. – P. 253–258.
- 10 Agrawal, A. Governing agriculture-forest landscapes to achieve climate change mitigation / A. Agrawal, E. Wollenberg, L. Persha // Global Environmental Change. – 2014, Nov. – Vol. 29. – P. 270–280.
- 11 Ивонин, В. М. Лесомелиорация ландшафтов / В. М. Ивонин, Н. Д. Пеньковский. – Ростов н/Д.: СКНЦ ВШ, 2003. – 151 с.
- 12 Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв: монография / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
- 13 Практикум по почвоведению / И. С. Кауричев, Н. П. Панов, М. В. Стратонович, И. П. Гречин, В. И. Савич, Н. Ф. Ганжара, А. П. Мершин; под ред. И. С. Кауричева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1980. – 272 с.

References

- 1 Kulik K.N., Dubenok N.N., Rulev A.S., Pugacheva A.M., 2015. *VNIALMI – lider agrolesomeliativnoy nauki Rossii: sovremennaya kontseptsiya zashchitnogo lesorazvedeniya* [All-Russian scientific research amelioration institute – the leader of the Russian agroforestry science: the modern concept of protective afforestation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 11, Estestvennye nauki* [Bull. of Volgograd State University. Series 11: Natural Sciences], no. 3(13), pp. 108-114. (In Russian).
- 2 Ivonin V.M., Voskoboinikova I.V., Matvienko E.Yu., 2018. Theoretical concept of adaptive forest land reclamation of agricultural landscapes. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 9, no. 13, pp. 95-103.
- 3 Mikhin D.V., 2013. *Ekologo-meliativnye osobennosti polezashchitnykh nasa-zhdeniy Voronezhskoy oblasti* [Ecological and reclamation features of field protection plantings of Voronezh region]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], no. 6, available: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=11575>. (In Russian).
- 4 Medvedev I.F., Anisimov D.A., Bochkov A.A., 2013. *Ekologo-meliativnye osobennosti razvitiya pochvennoy sistemy v zone vliyaniya lesnykh polos* [Ecological and reclamation features of the development of the soil system in the zone of influence of forest strips]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N. I. Vavilova* [Bull. of Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov], no. 11, pp. 3-9. (In Russian).
- 5 Kundius V.V., 2010. *Rol' agrolesomeliatsii v povyshenii ekologicheskoy ustoychivosti i ekonomicheskoy effektivnosti agrolandshaftov* [The role of agroforestry in increasing environmental sustainability and economic efficiency of agrolandscapes]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 92-95. (In Russian).
- 6 Petel'ko A.I., Panov V.I., 2019. *Vliyanie osnovnykh prirodnikh faktorov na formirovanie poverkhnostnogo stoka talykh vod v lesomeliyrovannykh agrolandshaftakh v lesostepnoy i stepnoy zonakh evropeyskoy chasti Rossii* [Influence of the main natural factors on the formation of surface runoff of meltwater in forest-reclaimed agrolandscapes in the forest-steppe and steppe zones of the European part of Russia]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* [Bull. of Belgorod State University. Series: Natural Sciences], vol. 43, no. 1, pp. 16-29. (In Russian).
- 7 Parihaar R.S., Bargal K., Bargal S.S., 2015. Status of an indigenous agroforestry system: A case study in Kumaun Himalaya, India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, no. 85(3), pp. 442-447.
- 8 Syampungani S., Chirwa P.W., Akinnifesi F.K., Ajayi O.C., 2010. The potential of using agroforestry as a win-win solution to climate change mitigation and adaptation and meeting food security challenges in Southern Africa. *Agric J.*, no. 5, pp. 80-88.
- 9 Liu T.X., Zhang S.W., 2011. Agroforestry Systems in Northern Temperate Zone and Productive Perspectives. *Advanced Materials Research*, vol. 304, pp. 253-258.
- 10 Agrawal A., Wollenberg E., Persha L., 2014. Governing agriculture-forest landscapes to achieve climate change mitigation. *Global Environmental Change*, Nov., vol. 29, pp. 270-280.
- 11 Ivonin V.M., Pen'kovsky N.D., 2003. *Lesomeliyatsiya landshaftov* [Forest Reclamation]. Rostov-on-Don, North Caucasus Scientific Centre of Higher School Publ., 151 p. (In Russian).
- 12 Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., 1986. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv: monografiya* [Methods for Studying Physical Properties of Soil: monograph]. Moscow, Agropromizdat Publ., 416 p. (In Russian).
- 13 Kaurichev I.S., Panov N.P., Stratonovich M.V., Grechin I.P., Savich V.I., Ganzhara

N.F., Mershin A.P., 1980. *Praktikum po pochvovedeniu* [Workshop on Soil Science]. 3rd ed., rev. and add. Moscow, Kolos Publ., 272 p. (In Russian).

Ивонин Владимир Михайлович

Ученая степень: доктор сельскохозяйственных наук

Ученое звание: профессор

Должность: профессор кафедры лесоводства и лесных мелиораций

Место работы: Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет»

Адрес организации: ул. Пушкинская, 111, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346428

E-mail: Ivoninfores@yandex.ru

Ivonin Vladimir Mikhaylovich

Degree: Doctor of Agricultural Sciences

Title: Professor

Position: Professor of the Chair of Forestry and Forest Melioration

Affiliation: Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University

Affiliation address: st. Pushkinskaya, 111, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346428

E-mail: Ivoninfores@yandex.ru