

УДК 631.613

В. М. Ивонин

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

ЗАРАСТАНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ ОВРАГОВ

Цель исследования – изучение стабильности склонов оврагов на ранних стадиях развития почвы для того, чтобы обосновать устойчивость и озеленение оврагов. Методы исследований: лабораторный анализ почвенных образцов, изучение поверхностного стока и эрозии почв на склонах оврагов. Было обнаружено, что зарастание в течение 25–30 лет рыхлых горных пород склонов оврагов приводит к развитию ранних стадий онтогенеза почв. Это вызывает осыпь мелкозема верхнего слоя почвы по границе оврага, а также особенности почвообразования под влиянием ценозов многолетних трав или древесной растительности. В то же время материнская порода изменяет свое содержание микроагрегатов, обогащается перегноем и приобретает другие благоприятные свойства. Агрегирование механических элементов с увеличением содержания гумуса уменьшает плотность почвы, увеличивает пористость и водопроходимость почвенной структуры. За период 25–30 лет многолетние травы способны накопить на склонах 5,5 т/га своего воздушно-сухого веса, древесные растения – 13 т/га лесной подстилки. Уже в возрасте 15–20 лет зарастания на склонах формируется эмбриональная почва и эрозия почв полностью отсутствует. Генеральным показателем устойчивости склонов (независимо от типа растительности) является содержание гумуса (более 2,5 %) в верхнем слое почв. При содержании почвенного гумуса менее 2,5 % эрозия происходит, если коэффициент стока превышает 0,21. В результате исследований определено, что устойчивость склонов оврагов возрастает по мере их зарастания, когда формируются почвы. Это позволяет обосновать меры по обеспечению стабильности и озеленению оврагов.

Ключевые слова: овраги, зарастание склонов, онтогенез почвы, свойства почв, эрозия почвы.

V. M. Ivonin

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

OVERGROWING AND STABILITY OF RAVINE SLOPES

The aim of the research is to study stability of ravine slopes at early stages of soil development for substantiation the stability and landscaping of ravines. Investigation methods were laboratory analysis of soil samples, study of the surface runoff and erosion at ravine slopes. We have found that overgrowing during 25–30 years of the loose rock at ravine slopes led to the development of early stages of soil ontogenesis. This causes talus of fine particles of the surface soil layer at the edge of a ravine, as well as specifics of soil formation under the influence of permanent grass cenosis or woody vegetation. At the same time parent material changes its micro-aggregate content, enriches by humus, and gains other favorable properties. Aggregation of textural elements with increasing of humus content declines soil density and enlarges porosity and water-resistance of soil structure. During the period of 25–30 years permanent grasses can accumulate at the slopes 5.5 t/ha of their air-dry weight, woody vegetation – 13 t/ha of forest litter. At the age of 15–20 years of overgrowing at the slopes formed embryonic soil, and soil erosion is completely absent. The general index of slope stability

(independent from the vegetation type) is humus content (more than 2.5 %) in the top soil layer. At humus content less than 2.5 %, erosion occurs if runoff coefficient exceeds 0.21. The research identified that stability of ravine slopes increased during overgrowing at soil formation. This enables to substantiate activities for providing stability and landscaping of ravines.

Keywords: ravines, slope overgrowing, soil ontogenesis, soil properties, soil erosion.

Введение. Процессы разрушения овражных склонов (бортов, откосов) хорошо изучены при физическом моделировании [1]. При этом выяснено, что обвально-оползневые явления активизируются при подрезке склонов донным потоком (с возникновением вдоль бровки и последующим обрушением нависающих козырьков гумусового слоя), а размыв склонов – при образовании на их поверхности параллельных желобков стока, которые постепенно расчлениают овражный склон на отдельные блоки. Некоторые из этих желобков могут служить причиной возникновения овражных отвержков. Переработка и вынос донных материалов обвалов и оползней к устью оврага происходит в сопровождении попятной, глубинной и боковой эрозии.

Эти явления составляют цепь последовательных событий, протекают одновременно или спорадически опережают друг друга в приточной части оврага, ниже которой обычно формируется зона аккумуляции [2].

Эрозионные разрушения овражных склонов постепенно затухают, когда на их поверхности под влиянием различных факторов (в основном растительности) формируются эмбриональные и слаборазвитые почвы [3, 4]. Это служит общим признаком прекращения активности оврага.

Поэтому овражные склоны являются удобными объектами для изучения их устойчивости в процессе зарастания, что поможет дальнейшему развитию теории линейной эрозии и обоснованию ландшафтно-инженерных работ по закреплению и озеленению оврагов.

Материал и методы. Результаты обобщений наших исследований (1993–2013 гг.) на таких объектах представлены в настоящей статье. В районе ст. Грушевской (Аксайский район Ростовской области) на корен-

ном берегу р. Тузлов исследованиями было охвачено разнообразие почвенного онтогенеза на овражных склонах (таблица 1) при их зарастании многолетними травами и насаждениями робинии псевдоакалии (*Robinia pseudoacacia L.*). Термин «почвенный онтогенез» широко применяется в почвоведении [5–8].

Таблица 1 – Варианты исследований на овражных склонах

№ варианта	Почва на овражном склоне	Характеристика	
		склона	фитоценоза
Свежеобрушенный склон (контроль)			
1	Материнская порода	Выпукло-вогнутый, СВЭ, 35°	Свежеобрушенный склон в результате эрозионной подрезки, сухие корешки на поверхности массой 0,04 т/га
Склоны, зарастающие травянистой растительностью			
2	То же + осыпавшийся с прирочного участка мелкозем	То же	Редкие растения-пионеры: мятлик, репейник и др., воздушно-сухая масса – 0,4 т/га
3	Эмбриональная почва, развитая за 10–15 лет	То же	Несомкнутый травянистый ценоз: пижма, репейник, подорожник, вьюнок, тысячелистник, 1,75 т/га
4	То же (1-я стадия онтогенеза), сформированная за 15–20 лет	То же, крутизна 28°	Смыкающиеся травы с преобладанием корневищных злаков при участии люцерны, цикория и тысячелистника, воздушно-сухая масса – 2,5 т/га
5	Слаборазвитая почва (2-я стадия), развившаяся за 25–30 лет	Выпуклый, ЮЗЭ, 30°	Сомкнутый травянистый ценоз с преобладанием пырея ползучего, воздушно-сухая масса – 5,2 т/га
Склоны, зарастающие древесной растительностью			
6	Материнская порода + осыпавшийся мелкозем	Выпуклый, ЮЗЭ, 30°	Корневые отпрыски робинии, возраст – 5 лет, $H = 3,9$ м, $d = 2,8$ см, $n = 4100$ шт./га, запас – 11,5 т/га, воздушно-сухая масса лесной подстилки (ЛП) – 0,7 т/га
7	Эмбриональная почва (1-я стадия онтогенеза)	То же, 31°	Насаждение 10 РП, возраст – 12 лет, $H = 9$ м, $d = 7,8$ см, $n = 1820$ шт./га, запас – 42 м ³ /га, воздушно-сухая масса ЛП – 5,8 т/га
8	То же	Прямой формы, ЗЭ, крутизна 30°	Насаждение 8РП2ВП, возраст – 15 лет, $H = 11,6$ м, $d = 8,5$ см, $n = 1630$ шт./га, запас – 54,3 м ³ /га, воздушно-сухая масса (ЛП) – 5,8 т/га
9	Слаборазвитая почва (2-я стадия)	Выпуклый, ЮЗЭ, 10°	Насаждение 10РП, возраст – 31 год, $H = 10,6$ м, $d = 8,4$ см, $n = 2500$ шт./га, запас – 74,7 м ³ /га, воздушно-сухая масса ЛП – 13,4 т/га

Почвы второй стадии онтогенеза развиваются в течение 60–130 лет, третьей стадии – за период 130–230 лет, когда основные процессы почвообразования стабилизируются; после четвертой-пятой стадий (410–500 лет) почвы приобретают свойства, близкие к зональным [9].

Робиния псевдоакация – наиболее распространенный вид, применяемый для создания лесных насаждений с целью закрепления и озеленения оврагов.

Данные таблицы 1 представляют варианты исследований – стадии начального почвообразовательного процесса на обрушенных овражных склонах (рыхлые суглинистые горные породы) под влиянием дерновых (гумусово-аккумулятивных) и других процессов. Они протекают под воздействием многолетней травянистой (пробы 2, 3, 4 и 5) или древесной (пробы 6, 7, 8 и 9) растительности. Начало этих процессов связано с осыпанием мелкозема с приобочной зоны и его закреплением на овражных склонах, с утяжелением гранулометрического состава, обогащением материнской породы гумусом и благоприятными водно-физическими свойствами.

По вариантам таблицы 1 проводили дождевание на площадках размером $1,43 \times 0,70$ м с помощью мобильной исследовательской капельно-струйной установки. Она обеспечивала интенсивность дождевания около 2,0 мм/мин при среднем диаметре капли 4,0 мм, что соответствовало энергии натурального ливня интенсивностью 0,7 мм/мин при среднем диаметре капли 2,9 мм/мин. Во время дождевания определяли интенсивность впитывания, объемы стока, мутность сточной воды, эрозию почв и другие характеристики по методикам, представленным в «Лесомелиорации ландшафтов» (2003) [10].

Рядом с площадками дождевания отбирали образцы из слоя почв и пород 0–20 см. В образцах почв во время лабораторных исследований определяли влажность, гранулометрический и микроагрегатный состав, водопрочность агрегатов, гумус, водно-физические свойства. При этом ис-

пользовали методики, изложенные в государственных стандартах (ГОСТ 12071-2000¹, ГОСТ 5180-84², ГОСТ 26213-91³), а также в работах А. Ф. Вадюниной, З. А. Корчагиной (1986) [11], И. С. Кауричева, Н. П. Панова и др. (1980) [12]. При анализах водопрочности агрегатов использовали методики Н. М. Бакшеева (четырёхкратная повторность) и П. И. Андрианова – Н. А. Качинского (пятикратная повторность).

По результатам определения гранулометрического и микроагрегатного состава рассчитывали характеристики микроагрегатного состояния почв:

- фактор дисперсности по Н. А. Качинскому:

$$K_d = (I_m / I_g) \cdot 100 \%,$$

где I_m и I_g – содержание илистых частиц соответственно при микроагрегатном и гранулометрическом анализе, %;

- фактор структурности по Фагелеру:

$$K_c = [(I_g - I_m) / I_g] \cdot 100 \%;$$

- гранулометрический показатель структурности по А. Ф. Вадюниной:

$$K_g = [(I_g + M_p) / (C_p + K_p)] \cdot 100 \%,$$

где M_p , C_p , K_p – содержание соответственно мелкой, средней и крупной пыли при гранулометрическом анализе, %;

- степень агрегирования по Бевер-Родесу, %:

$$K_a = [(\Phi_m - \Phi_g) / \Phi_m] \cdot 100 \%,$$

где Φ_m и Φ_g – содержания фракций песка (мелкого, среднего, крупного), т. е. частиц диаметром $> 0,05$ мм при микроагрегатном и гранулометрическом анализах, %.

Показатель противоэрозионной стойкости (ППС) почв рассчитывали

¹ ГОСТ 12071-2000 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов»

² ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»

³ ГОСТ 26213-91 «Почвы. Методы определения органического вещества»

по А. Д. Воронину и М. С. Кузнецову:

$$\text{ППС} = K_{pa} / K_d,$$

где K_{pa} – фактор потенциальной агрегированности:

$$K_{pa} = [I_{\Gamma} / (100 - I_{\Gamma})] \cdot 100 \%$$

Полученные данные обрабатывали с помощью компьютерных программ Statistica 7.0 и Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение. Данные исследований гранулометрического и микроагрегатного состава почв и пород на овражных склонах приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Гранулометрический (числитель) и микроагрегатный (знаменатель) состав слоя 0–20 см почв на овражных склонах

Вариант зарастания склона, наземная воздушно-сухая масса трав и подстилки	Фракция, мм				
	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001
Свежеобрушенный склон (контроль)					
1 Сухие корешки; 0,04 т/га	<u>40,08</u> 59,06	<u>32,21</u> 31,27	<u>3,83</u> 3,86	<u>14,57</u> 2,76	<u>9,31</u> 3,05
Склоны, зарастающие травянистой растительностью					
2 Отдельные травы- пионеры; 0,4 т/га	<u>5,54</u> 59,06	<u>26,73</u> 31,27	<u>1,65</u> 3,86	<u>16,49</u> 2,76	<u>49,59</u> 3,05
3 Несомкнутый ценоз; 1,75 т/га	<u>6,35</u> 74,86	<u>36,76</u> 15,35	<u>1,85</u> 1,54	<u>1,15</u> 5,59	<u>53,89</u> 2,69
4 Смыкающийся ценоз; 2,5 т/га	<u>3,60</u> 57,55	<u>27,40</u> 33,06	<u>15,00</u> 4,74	<u>16,13</u> 2,20	<u>37,87</u> 2,45
5 Сомкнутый ценоз; 5,2 т/га	<u>9,79</u> 39,80	<u>31,78</u> 40,82	<u>1,55</u> 7,10	<u>4,79</u> 8,61	<u>52,09</u> 3,67
Склоны, зарастающие древесной растительностью					
6 Корневые отпрыски ро- бинии (запас – 11,5 м ³ /га); подстилка – 0,7 т/га	<u>6,80</u> 71,85	<u>36,96</u> 16,82	<u>1,67</u> 1,11	<u>2,73</u> 8,29	<u>52,44</u> 1,93
7 Насаждение робинии (запас – 42 м ³ /га); 5,8 т/га	<u>6,35</u> 64,77	<u>38,76</u> 11,96	<u>1,85</u> 11,02	<u>1,15</u> 8,98	<u>51,89</u> 3,27
8 То же (запас – 54,3 м ³ /га); 7,0 т/га	<u>5,59</u> 58,72	<u>22,39</u> 23,12	<u>14,02</u> 6,25	<u>22,60</u> 6,25	<u>35,40</u> 5,66
9 То же (запас – 74,7 м ³ /га); 13,4 т/га	<u>7,09</u> 69,54	<u>35,19</u> 8,82	<u>1,74</u> 9,92	<u>2,24</u> 9,27	<u>53,74</u> 2,45

Данные таблицы 2 показывают, что постепенное зарастание овражных склонов травянистой и древесной растительностью сопровождалось

утяжелением гранулометрического состава почв за счет задержания мелкозема, осыпавшегося с прибрежных участков склонов. Для травянистой растительности это характеризуется уравнением связи содержания физической глины в гранулометрическом составе почв (W_g , %) с наземной воздушно-сухой массой трав (m_t , т/га):

$$W_g = 57,337 \cdot m_t^{0,091} \text{ при } R^2 = 0,518.$$

Уравнение связи содержания в гранулометрическом составе почв частиц $< 0,01$ мм под пологом древесных насаждений (робинии псевдоакации) с воздушно-сухой массой лесной подстилки (m_p , т/га) имеет вид:

$$W_g = 52,288 \cdot m_p^{0,082} \text{ при } R^2 = 0,705.$$

Следует отметить, что на первых стадиях почвенного онтогенеза более высокое значение коэффициента детерминации (R^2) для связи содержания физической глины с массой лесной подстилки характеризует высокую эффективность задержания и закрепления на овражных склонах (зарастающих робинией псевдоакацией, по сравнению с многолетними травами) мелкозема, осыпавшегося с вышерасположенных обнаженных участков почв овражной бровки.

Утяжеление гранулометрического состава привело к улучшению характеристик микроагрегатного состояния почв овражных склонов (таблица 3).

Таблица 3 – Характеристики микроагрегатного состояния слоя 0–20 см почв на овражных склонах

Вариант зарастания склона, наземная воздушно-сухая масса трав и подстилки	Фактор, %		K_g , %	K_a , %	ППС
	K_d	K_c			
1	2	3	4	5	6
Свежеобрушенный склон (контроль)					
1 Сухие корешки; 0,04 т/га	15,79	84,21	94,00	31,10	1,52
Склоны, зарастающие травянистой растительностью					
2 Отдельные травы-пионеры; 0,4 т/га	6,15	93,85	232,70	90,62	15,68
3 Несомкнутый ценоз; 1,75 т/га	5,18	94,82	130,61	91,52	20,82
4 Смыкающийся ценоз; 2,5 т/га	6,47	93,53	127,36	93,76	9,42
5 Сомкнутый ценоз; 5,2 т/га	7,05	92,95	170,66	75,40	15,42

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
Склоны, зарастающие древесной растительностью					
6 Корневые отпрыски робинии (запас – 11,5 м ³ /га); подстилка – 0,7 т/га	3,68	96,32	145,07	90,54	29,96
7 Насаждение робинии (запас – 42 м ³ /га); 5,8 т/га	6,31	93,70	130,61	90,19	17,09
8 То же (запас – 54,3 м ³ /га); 7,0 т/га	10,25	89,75	159,30	90,60	5,35
9 То же (запас – 74,7 м ³ /га); 13,4 т/га	4,56	95,44	151,58	89,90	25,48
Примечание – K_d – фактор дисперсности по Н. А. Качинскому; K_c – фактор структурности по Фагелеру; K_g – гранулометрический показатель структурности по А. Ф. Вадюниной; K_a – степень агрегирования по Беве-Родесу; ППС – показатель противозрозионной стойкости почв по А. Д. Воронину и М. С. Кузнецову.					

По данным таблицы 3, при зарастании овражных склонов травянистой растительностью факторы дисперсности (K_d) уменьшились с 15,75 до 5,18–7,05 %, а при зарастании древесной растительностью – до 3,68–10,25 %. Это свидетельствует в обоих случаях о постепенно возрастающей прочности макроструктуры почвы на овражных склонах.

Уравнения связи факторов дисперсности (K_d , %) с воздушно-сухой массой трав (m_t , т/га) или лесной подстилки (m_p , т/га) на овражных склонах имеют вид:

$$K_d = -1,87 \cdot \ln(m_t) + 7,75 \text{ при } R^2 = 0,691; \quad (1)$$

$$K_d = -1,39 \cdot \ln(m_p) + 8,87 \text{ при } R^2 = 0,439. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) имеют одинаковую структуру, что косвенно характеризует определенную общность процессов приобретения прочности макроструктуры под травами и насаждениями. Одновременно с уменьшением факторов дисперсности по мере нарастания на овражных склонах наземной фитомассы трав и лесной подстилки увеличиваются показатели факторов структурности (K_c , %), гранулометрические показатели структурности (K_g , %) и показатели степеней агрегирования (K_a , %):

$$K_c = 1,87 \cdot \ln(m_t) + 92,25 \text{ при } R^2 = 0,691;$$

$$K_g = 146,15 \cdot m_t^{0,07} \text{ при } R^2 = 0,158;$$

$$K_a = 10,46 \cdot \ln(m_t) + 78,59 \text{ при } R^2 = 0,585;$$

$$K_c = 1,39 \cdot \ln(m_p) + 91,13 \text{ при } R^2 = 0,440;$$

$$K_g = 9,19 \cdot \ln(m_p) + 131,1 \text{ при } R^2 = 0,719;$$

$$K_a = 9,82 \cdot \ln(m_p) + 73,12 \text{ при } R^2 = 0,777.$$

Следовательно, для многолетних трав определяющее влияние на устойчивость почв овражных склонов оказывает фактор структурности, а для древесных насаждений – гранулометрический показатель структурности и степень агрегирования.

Фактор структурности характеризует водоустойчивость микроагрегатов, гранулометрический показатель структурности – соотношение активных механических элементов, обладающих цементирующей способностью и принимающих участие в коагуляции, и пассивных элементов. Агрегирование механических элементов оказывает влияние на физические свойства: увеличивается пористость; улучшаются другие свойства почв, определяющие их противозерозионную способность. Поэтому по мере зарастания овражных склонов как травами, так и древесными насаждениями улучшается микроагрегатное состояние почв на ранних стадиях онтогенеза, что подтверждается прямой связью между показателями противозерозионной стойкости (ППС) и воздушно-сухой массой трав ($R^2 = 0,688$) и лесной подстилки ($R^2 = 0,426$).

Устойчивость зарастающих склонов оврагов повышается также с изменением характеристик формируемых почв (таблица 4).

По данным таблицы 4, с нарастанием воздушно-сухой массы трав и лесной подстилки уменьшается плотность (ρ , г/см³) и увеличивается пористость (ω , %) слоя почв 0–20 см на овражных склонах, что характеризуется зависимостями:

$$\rho = -0,055 \cdot m_t + 1,313 \text{ при } R^2 = 0,719; \quad (3)$$

$$\rho = -0,03 \cdot \ln(m_p) + 1,154 \text{ при } R^2 = 0,123; \quad (4)$$

$$\omega = 52,834 \cdot m_t^{0,058} \text{ при } R^2 = 0,729; \quad (5)$$

$$\omega = 0,644 \cdot m_p + 48,429 \text{ при } R^2 = 0,125. \quad (6)$$

Таблица 4 – Характеристики слоя 0–20 см почв овражных склонов

Вариант зарастания склона, наземная воздушно-сухая масса трав и подстилки	Плотность, г/см ³		Пористость, %	Число пластичности, %	Гумус, %	Водопрочность агрегатов, %	
	твёрдой фазы	сухой почвы				по Бакшееву (> 1 мм)	по Андрианову – Качинскому
Свежеобрушенный склон (контроль)							
1 Сухие корешки; 0,04 т/га	2,46	1,34	45,5	2,57	0,09	21,84	38,7
Склоны, зарастающие травянистой растительностью							
2 Отдельные травы-пионеры; 0,4 т/га	2,53	1,32	47,8	2,31	0,28	21,75	51,9
3 Несомкнутый ценоз; 1,75 т/га	2,44	1,23	49,6	11,59	0,67	10,91	81,7
4 Смыкающийся ценоз; 2,5 т/га	2,58	1,05	59,3	12,51	2,14	59,83	92,3
5 Сомкнутый ценоз; 5,2 т/га	2,75	1,08	60,7	14,50	3,63	84,11	95,3
Склоны, зарастающие древесной растительностью							
6 Корневые отпрыски робинии (запас – 11,5 м ³ /га); подстилка – 0,7 т/га	2,30	0,93	59,6	7,31	1,03	50,44	45,1
7 Насаждение робинии (запас – 42 м ³ /га); 5,8 т/га	2,22	1,37	38,3	24,36	3,08	73,13	89,5
8 То же (запас – 54,3 м ³ /га); 7,0 т/га	2,21	1,01	54,3	14,77	5,31	72,88	92,3
9 То же (запас – 74,7 м ³ /га); 13,4 т/га	2,72	1,04	61,8	16,41	3,08	66,63	74,4

По зависимостям (3) и (5) связи более тесные по сравнению с аналогичными связями (4) и (6). Это можно объяснить тем, что дерновый процесс более активно влияет на водно-физические характеристики почв по сравнению с процессом почвообразования под насаждениями робинии.

Динамика чисел пластичности – разность между влажностью почв на границах текучести и раскатывания (таблица 4) – подтверждает картину

утяжеления гранулометрического состава слоя почв 0–20 см по мере прохождения стадий почвенного онтогенеза.

При этом на овражных склонах содержание гумуса в слое почв 0–20 см (θ , %) тесно связано с воздушно-сухой массой трав и лесной подстилки:

$$\theta = 0,775 \cdot m_t^{0,747} \text{ при } R^2 = 0,922; \quad (7)$$

$$\theta = 0,947 \cdot m_p^{0,665} \text{ при } R^2 = 0,941. \quad (8)$$

Следует иметь в виду, что содержание гумуса в верхнем слое почвы повышается как в результате осыпания и закрепления на склонах мелкозема из нависающих козырьков гумусового слоя почвы овражных бровок, так и за счет образования (за 30 лет) молодого гумусоподобного вещества под многолетними травами и древесными насаждениями.

Анализ степенных зависимостей (7), (8) показывает, что они имеют примерно одинаковую структуру и тесноту связей. Однако с течением времени воздушно-сухая масса лесной подстилки будет значительно превышать воздушно-сухую массу многолетних трав.

Например, за период 30 лет под пологом насаждений робинии на овражных склонах накапливается более 13 т/га (проба 9) воздушно-сухой массы лесной подстилки. К этому временному периоду воздушно-сухая масса трав на овражных склонах не превышает 5,5 т/га (проба 5).

Наличие водопрочных агрегатов в верхнем слое почв – это важнейший показатель устойчивости почв на овражных склонах.

Уравнения связи воздушно-сухой массы трав с количеством водопрочных агрегатов в слое почв 0–20 см имеют вид:

- водопрочность по Н. М. Бакшееву (V_b – агрегаты > 1 мм, %):

$$V_b = 13,17 \cdot m_t + 13,56 \text{ при } R^2 = 0,759; \quad (9)$$

- водопрочность по П. И. Андрианову – Н. А. Качинскому (V_{ak} , %):

$$V_{ak} = 12,802 \cdot \ln(m_t) + 75,64 \text{ при } R^2 = 0,919. \quad (10)$$

Связи воздушно-сухой массы лесной подстилки на овражных склонах с количеством водопрочных агрегатов в слое почв 0–20 см представлены уравнениями:

- водопрочность по Н. М. Бакшееву:

$$V_b = 46,71 \cdot m_p^{0,207} \text{ при } R^2 = 0,930; \quad (11)$$

- водопрочность по П. И. Андрианову – Н. А. Качинскому:

$$V_{ak} = 58,9 \cdot m_p^{0,152} \text{ при } R^2 = 0,810. \quad (12)$$

Анализ уравнений (9), (10) показывает, что связь воздушно-сухой массы многолетних трав с содержанием водопрочных агрегатов по Бакшееву характеризуется прямым линейным уравнением, а по Андрианову – Качинскому – логарифмическим. Аналогичные связи (11), (12) воздушно-сухой массы лесной подстилки характеризуются степенными уравнениями. Неодинаковая структура указанных зависимостей характеризует различия в процессах образования водопрочности агрегатов под многолетними травами и древесными насаждениями.

Общим критерием возникновения водопрочности (независимо от типа растительности) является содержание гумуса в слое 0–20 см почв овражных склонов:

- водопрочность агрегатов по Н. М. Бакшееву:

$$V_b = 39,02 \cdot \theta^{0,418} \text{ при } R^2 = 0,611; \quad (13)$$

- водопрочность агрегатов по П. И. Андрианову – Н. А. Качинскому:

$$V_{ak} = 66,82 \cdot \theta^{0,214} \text{ при } R^2 = 0,694. \quad (14)$$

Связи (13), (14) в графическом виде приведены на рисунке 1.

Анализ рисунка 1 показывает, что в слое 0–20 см почв овражных склонов по мере накопления гумуса увеличивается содержание водопрочных агрегатов. Практическое дублирование результатов (по Бакшееву и Андрианову – Качинскому) подтверждает справедливость заключения о том, что гумус – общий критерий образования водопрочности агрегатов

почв овражных склонов вне зависимости от типов растительности.

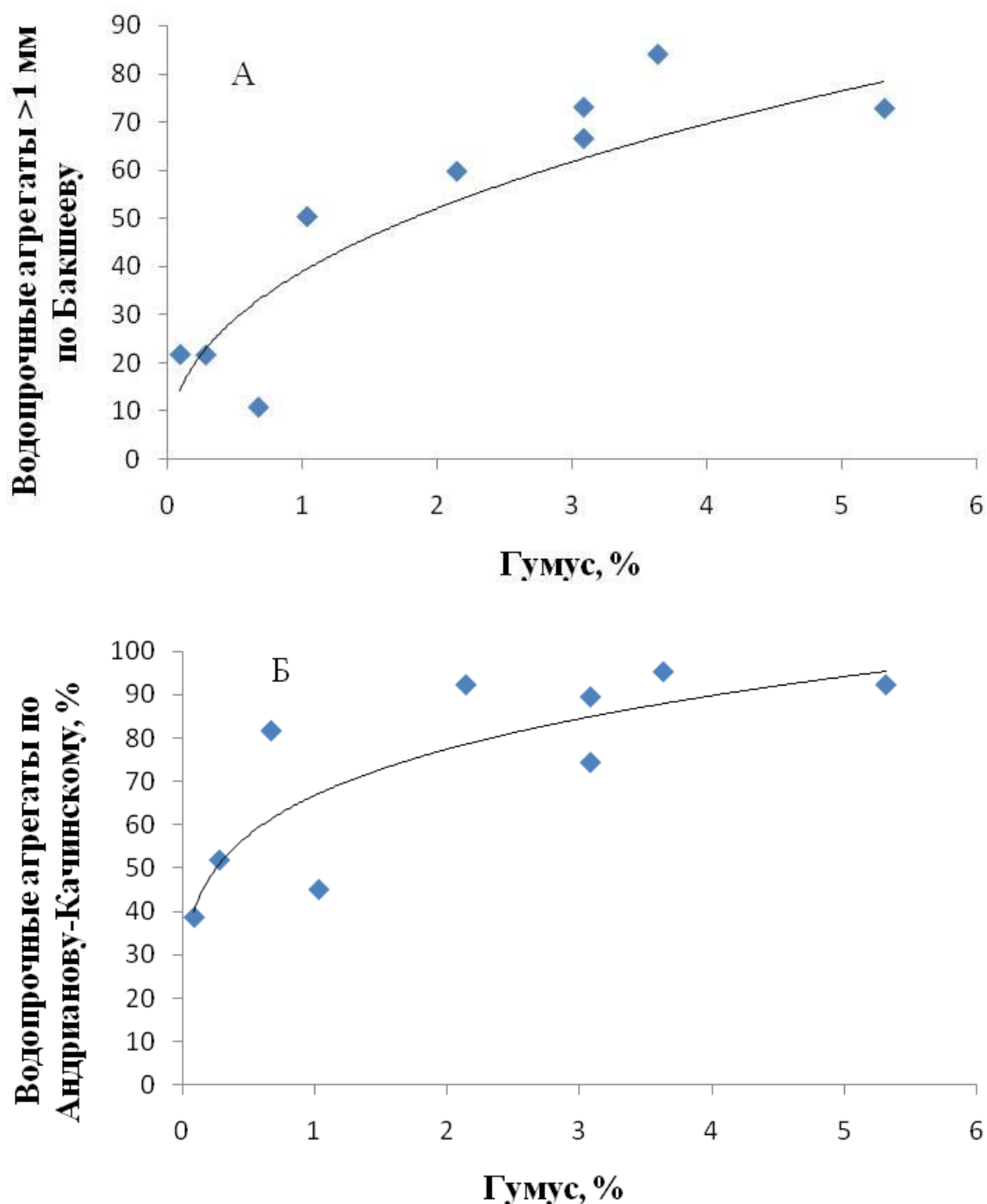


Рисунок 1 – Связи количества водопрочных агрегатов по Бакшееву (А) и Андрианову – Качинскому (Б) в слое почв 0–20 см с содержанием гумуса

Характеристики формирования поверхностного стока и проявления эрозионных процессов на овражных склонах по мере их зарастания приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики стока и эрозии почв на овражных склонах (слой дождя – 60 мм, интенсивность – 2,4 мм/мин)

Вариант зарастания склона, наземная воздушно-сухая масса трав и подстилки	Слой, мм		Коэффициент стока	Средняя мутность стока, г/л	Эрозия почв, т/га	Влажность слоя почв 0–20 см, %
	впитывания	стока				
Свежеобрушенный склон (контроль)						
1 Сухие корешки; 0,04 т/га	33,5	26,5	0,44	521,4	138,17	12,8
Склоны, зарастающие травянистой растительностью						
2 Отдельные травы-пионеры; 0,4 т/га	35,7	24,3	0,41	180,4	43,84	8,2
3 Несомкнутый ценоз; 1,75 т/га	46,0	14,0	0,23	11,85	1,66	11,4
4 Смыкающийся ценоз; 2,5 т/га	58,8	1,2	0,02	0,75	0,01	19,8
5 Сомкнутый ценоз; 5,2 т/га	60,0	0	0	0	0	22,3
Склоны, зарастающие древесной растительностью						
6 Корневые отпрыски робинии (запас – 11,5 м ³ /га); 0,7 т/га	50,3	9,7	0,16	34,45	3,34	18,7
7 Насаждение робинии (запас – 42 м ³ /га); 5,8 т/га	56,4	3,6	0,06	3,20	0,11	19,6
8 То же (запас – 54,3 м ³ /га); 7,0 т/га	60,0	0	0	0	0	36,5
9 То же (запас – 74,7 м ³ /га); 13,4 т/га	60,0	0	0	0	0	28,7

Условия формирования стока и проявления эрозии почв были следующими.

При дождевании свежеобрушенного овражного склона (проба 1) сток на водосливном лотке появился через 20 с после начала дождя в сопровождении оползания материнской породы. При этом зафиксировано разбрызгивание частиц грунта под ударным воздействием дождевых капель. К окончанию дождевания на поверхности возникли два параллельных желобка стока шириной от 8 до 10 см и глубиной от 4 до 6 см. У каждого из желобков перед водосливным лотком образовались конусы выноса. Время добегания стока после окончания дождя составило 30 с. Средняя мутность стока на водосливном лотке была очень высокой, смыв достиг величины 138 т/га.

Наличие растений-пионеров на поверхности склона (проба 2) привело к тому, что сток возник через 1 мин 30 с после начала дождевания. В ходе дождевания резко снизились оползневые процессы. Поэтому эрозия уменьшилась в 3 раза по сравнению с контрольным вариантом дождевания, но параметры поверхностного стока практически не изменились. Время добегания стока по окончании дождевания равнялось 25 с. Следовательно, уменьшение эрозии в этом варианте произошло в основном под влиянием отдельных травянистых растений-пионеров, наземная масса которых сокращала ударное воздействие дождевых капель.

Несомкнутый травянистый ценоз (проба 3) способствовал тому, что сток сформировался на четвертой минуте дождевания, а время добегания воды составило 50 с. В результате произошло не только уменьшение поверхностного стока, но и сокращение эрозии почв (за счет наземной и корневой фитомассы травянистого ценоза).

Смыкающийся травянистый ценоз (проба 4) практически ликвидировал сток (коэффициент стока равен 0,02, добегания воды по окончании дождя не было) и эрозию почвы (0,01 т/га), а сомкнутый ценоз (проба 5) полностью предотвратил сток за счет вышеуказанных причин.

При зарастании овражных склонов древесной растительностью уже при воздушно-сухой массе лесной подстилки 0,7 т/га (проба 6) коэффициент стока составил 0,16, смыв – 3,34 т/га, а добегания стока после окончания дождевания не было.

При воздушно-сухой массе лесной подстилки 5,8 т/га (проба 7) коэффициент стока снизился до 0,06, а смыв – до 0,11 т/га. Дальнейшее увеличение воздушно-сухой массы лесной подстилки с возрастом насаждений (пробы 8 и 9) способствовало полному зарегулированию стока на овражных склонах. Даже полное удаление лесной подстилки не привело к формированию стока при дождевании, что косвенно подтверждает влияние корненасыщенности и соответствующих водно-физических свойств слоя

почв 0–20 см в этих пробах.

Регрессионный анализ данных таблицы 5 позволил получить уравнения связи коэффициентов стока (σ) с воздушно-сухой массой трав (m_t) и лесной подстилки (m_p):

$$\sigma = -0,091 \cdot m_t + 0,4 \text{ при } R^2 = 0,811; \quad (15)$$

$$\sigma = -0,076 \cdot \ln(m_p) + 0,174 \text{ при } R^2 = 0,972. \quad (16)$$

Графическое решение уравнений (15) и (16) приведено на рисунке 2.

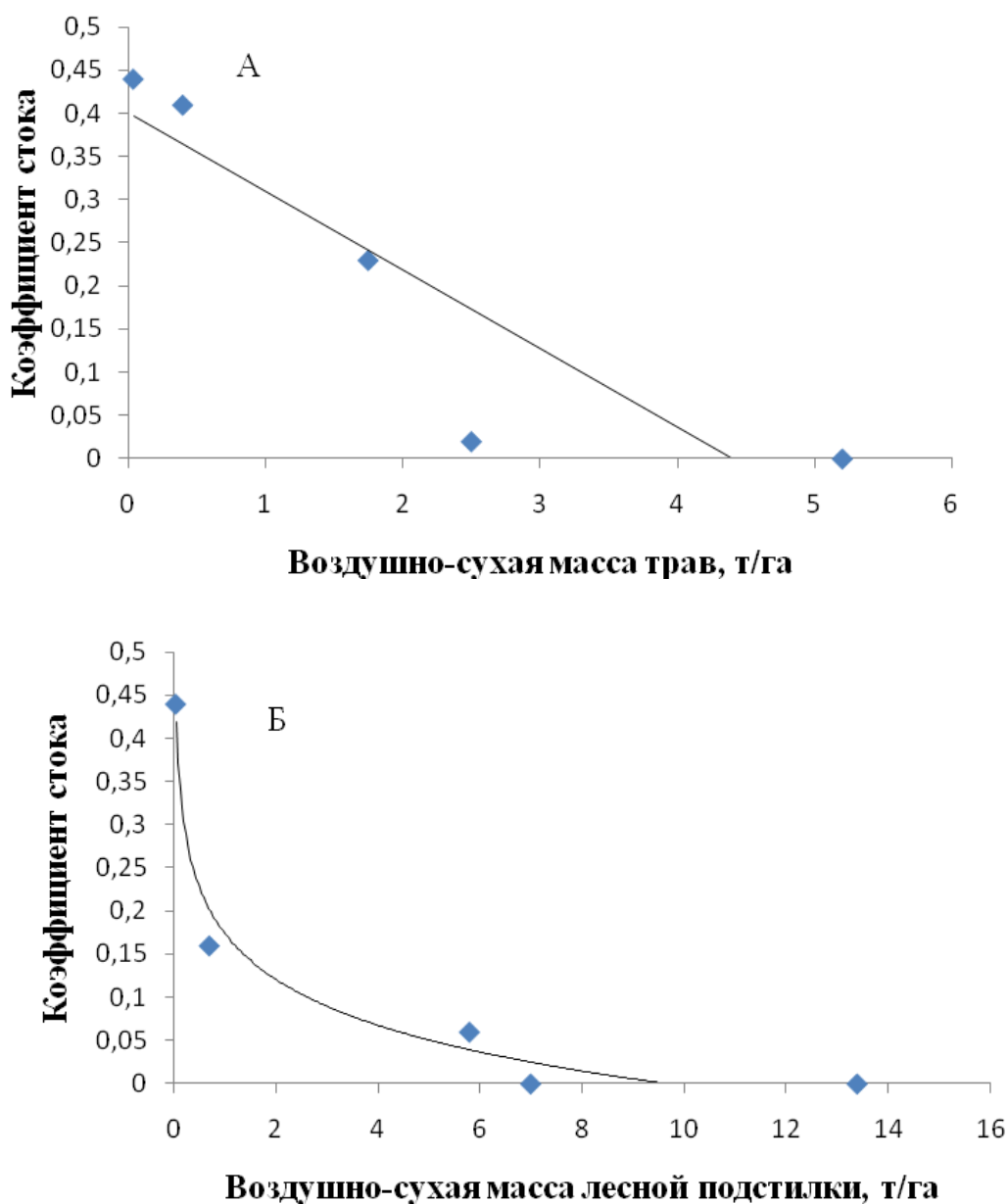


Рисунок 2 – Связь коэффициентов стока с воздушно-сухой массой трав (А) и лесной подстилки (Б) на овражных склонах

Анализ уравнений (15), (16) и данных рисунка 2 показывает, что полное зарегулирование стока происходит при наличии на овражных склонах воздушно-сухой массы многолетних трав более 4,4 т/га; лесной подстилки – 9,5 т/га. Причем на первой стадии почвенного онтогенеза (таблица 1) регулирование стока на площадках с лесной подстилкой происходит более эффективно по сравнению с площадками под многолетними травами.

Причины этого рассмотрим при анализе множественных связей условий формирования стока на овражных склонах в процессе их зарастания.

Так, при зарастании склонов многолетними травами связь коэффициентов стока (σ) с независимыми друг от друга факторами дернового процесса (плотностью почвы и содержанием гумуса) представим как

$$\sigma = 1,302 \cdot \rho - 0,024 \cdot \theta - 1,315 \text{ при } R^2 = 0,993. \quad (17)$$

При зарастании древесными насаждениями аналогичное уравнение связи с независимыми друг от друга переменными (содержанием гумуса и гранулометрическим показателем структурности) имеет вид:

$$\sigma = 0,839 - 0,005 \cdot K_g - 0,033 \cdot \theta \text{ при } R^2 = 0,947. \quad (18)$$

Уравнение (17) характеризует прямую связь коэффициентов стока с плотностью верхнего слоя почв и обратную связь с содержанием гумуса. Основное влияние на формирование стока оказывает плотность, которая способствует увеличению пористости по мере развития фитоценозов многолетних трав. Значительное влияние на сток при этом оказывает и содержание гумуса, которое увеличивается по мере прохождения стадий почвенного онтогенеза.

Уравнение (18) показывает, что существенным фактором формирования поверхностного стока на овражных склонах, зарастающих древесной растительностью, является содержание гумуса в верхнем слое почв. Это подчеркивает общность процессов регулирования стока, происходящих как под травами, так и под древесными насаждениями. Общая связь коэффициентов стока и содержания гумуса в почве овражных склонов имеет вид:

$$\sigma = -0,127 \cdot \ln(\theta) + 0,174 \text{ при } R^2 = 0,945. \quad (19)$$

Графическая форма уравнения (19) приведена на рисунке 3.

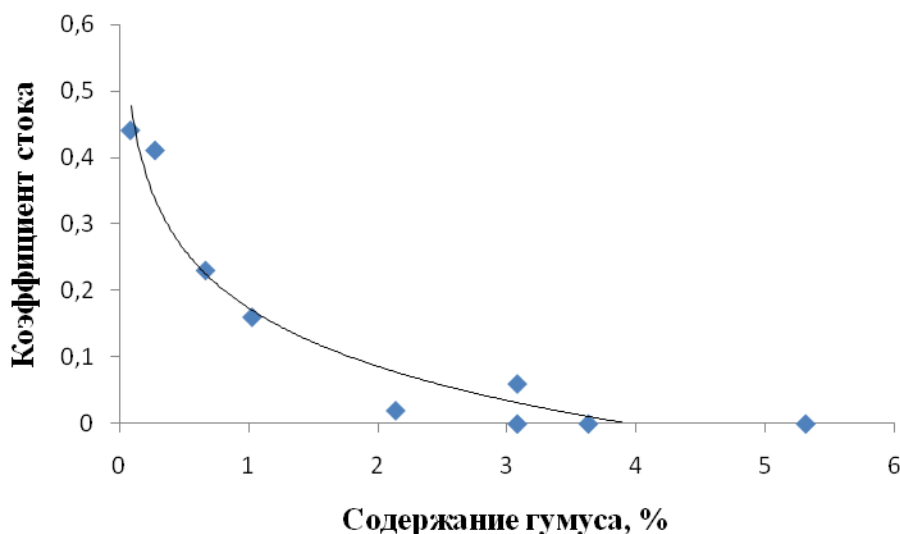


Рисунок 3 – Связь коэффициентов стока с содержанием гумуса в слое почв 0–20 см зарастающих овражных склонов

По данным рисунка 3, на зарастающих овражных склонах поверхностный сток полностью регулируется тогда, когда содержание гумуса в слое почв 0–20 см достигнет 4 %, независимо от типа растительности.

Однако существуют и отличия в факторах регулирования стока на овражных склонах: под древесными насаждениями существенное влияние на сток оказывает еще и гранулометрический показатель структурности (зависимость (18), а под многолетними травами – плотность верхнего слоя почв [уравнение (17)].

По результатам анализа данных таблицы 5 получены уравнения связи эрозии почв (ε , т/га) с воздушно-сухой массой трав и лесной подстилки:

$$\varepsilon = -30,06 \cdot \ln(m_t) + 30,66 \text{ при } R^2 = 0,941; \quad (20)$$

$$\varepsilon = -23,12 \cdot \ln(m_p) + 40,92 \text{ при } R^2 = 0,801. \quad (21)$$

Уравнения (20) и (21) имеют общую структуру, характеризую отсутствие эрозии почв на овражных склонах при воздушно-сухой массе трав, равной 2,7 т/га, и воздушно-сухой массе лесной подстилки 5,9 т/га (рисунок 4).

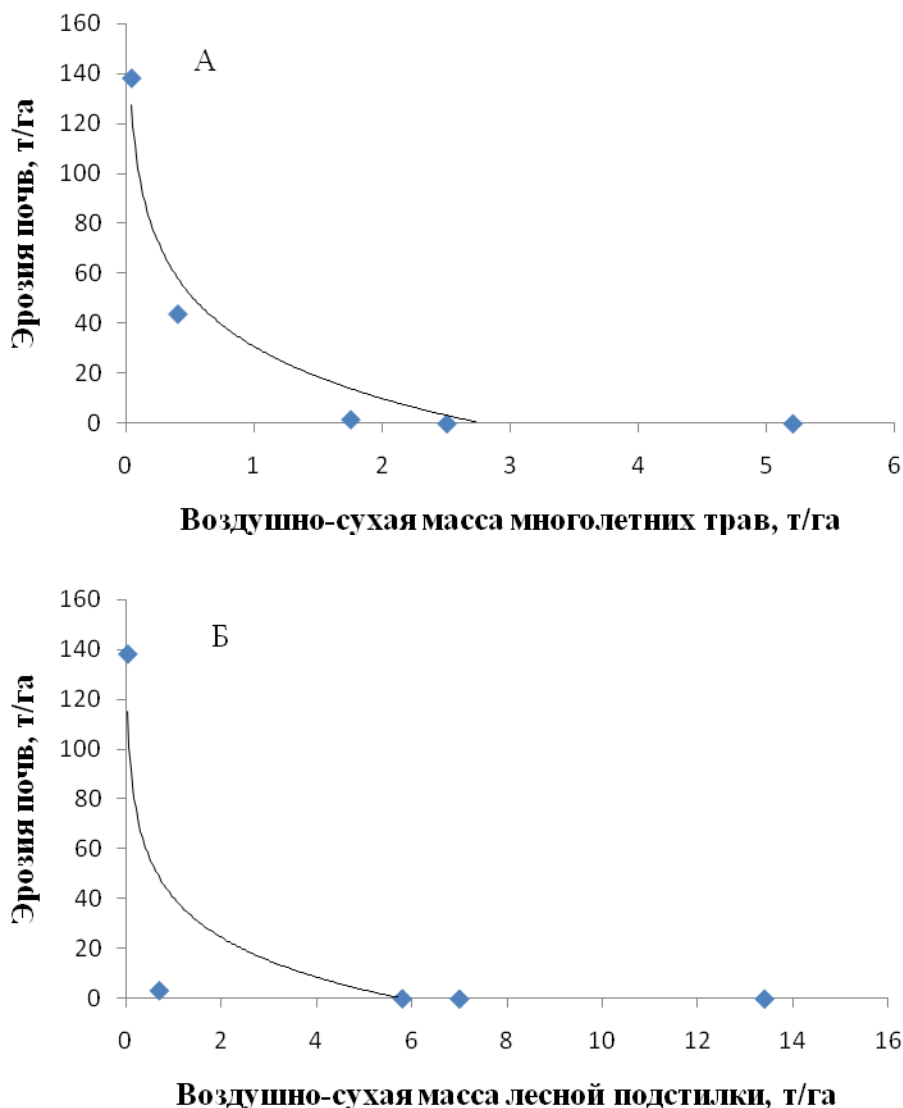


Рисунок 4 – Связь эрозии почв с воздушно-сухой массой трав (А) и лесной подстилки (Б) на зарастающих овражных склонах

Такая масса многолетних трав и лесной подстилки на овражных склонах характеризует первую стадию почвенного онтогенеза, т. е. уже к возрасту 15–20 лет зарастания на овражных склонах эрозия отсутствует.

Основные факторы, определяющие эрозию почв на зарастающих овражных склонах, характеризуют следующие уравнения множественной регрессии:

$$\text{- травы } \varepsilon = 132,53 - 19,37 \cdot \theta - 5,52 \cdot \text{ППС} \text{ при } R^2 = 0,915; \quad (22)$$

$$\text{- подстилка } \varepsilon = 209,15 - 0,73 \cdot \theta - 2,28 \text{ при } R^2 = 0,999. \quad (23)$$

Анализ уравнений (22), (23) показывает, что при зарастании склонов

травами основным фактором эрозии является гумус, а при зарастании древесной растительностью – степень агрегирования. При этом гумус служит генеральной характеристикой противоэрозионной устойчивости почв при зарастании склонов как травами, так и древесной растительностью (рисунок 5), что характеризует зависимость:

$$\varepsilon = -29,11 \cdot \ln(\theta) + 26,99 \text{ при } R^2 = 0,728.$$

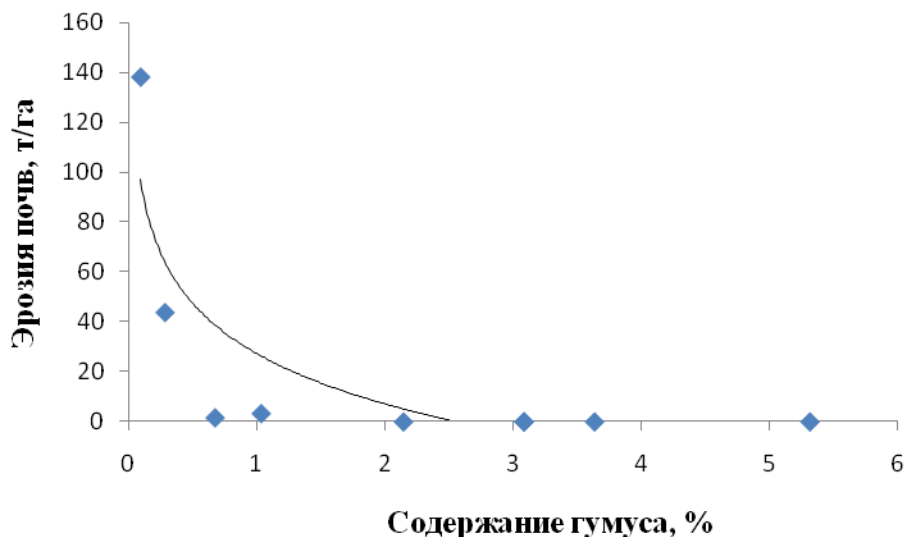


Рисунок 5 – Связь эрозии почв с содержанием гумуса в слое почв 0–20 см зарастающих овражных склонов

Это подтверждается теснотой прямой связи гранулометрического состава почв (содержание частиц < 0,01 мм) с наземной воздушно-сухой массой многолетних трав ($R^2 = 0,518$) и воздушно-сухой массой лесной подстилки ($R^2 = 0,705$).

Данные рисунка 5 показывают, что при зарастании овражных склонов (независимо от типа растительности) с увеличением содержания гумуса в верхнем слое почвы более 2,5 % эрозия почв при ливнях прекращается.

Очевидно, что на зарастающих овражных склонах существует связь между коэффициентами стока и эрозией почв:

$$\varepsilon = 1054,3 \cdot \sigma^2 - 235,1 \cdot \sigma + 3,24 \text{ при } R^2 = 0,825. \quad (24)$$

Графическое решение уравнения (24) приведено на рисунке 6.

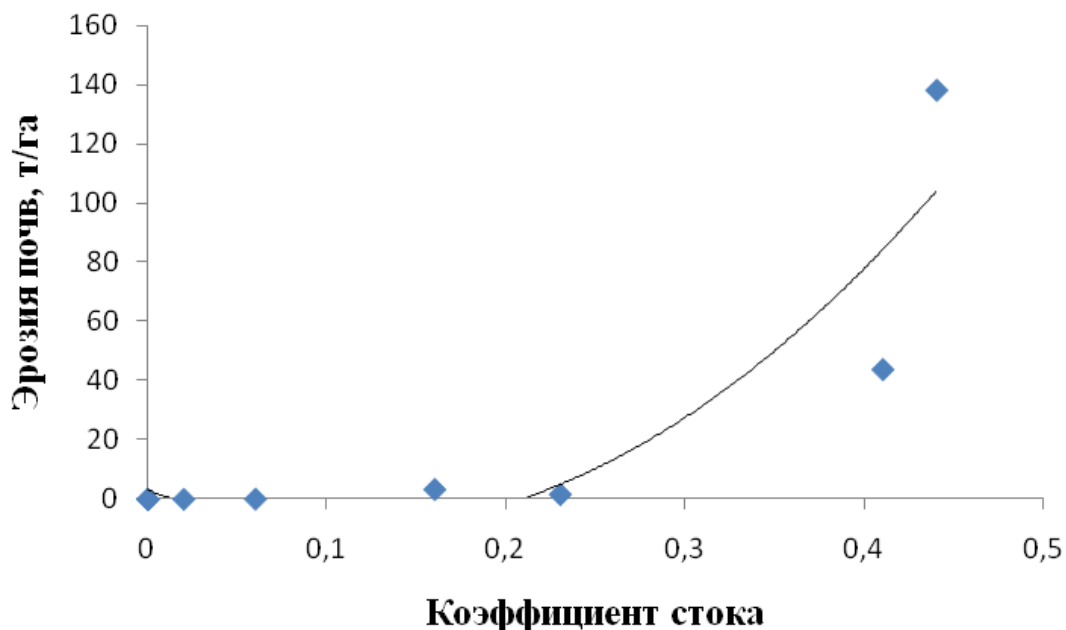


Рисунок 6 – Связь эрозии почв с коэффициентами стока на зарастающих овражных склонах

При анализе рисунка 6 заключаем, что эрозия почв полностью отсутствует при коэффициенте стока, равном 0,208. Это значение является нижним пределом применения уравнения (24).

Такой коэффициент стока соответствует воздушно-сухой массе трав, равной 2,1 т/га, и воздушно-сухой массе лесной подстилки около 1 т/га (рисунок 2).

Исследование устойчивости овражных склонов в процессе их зарастания и прохождения ранних стадий онтогенеза почв позволяет обосновать мероприятия по закреплению и озеленению оврагов.

Так, были разработаны различные способы ускоренного зарастания овражных склонов при формировании на их поверхности плодородного слоя почв [13–15]. К таким способам относят отсыпку овражных склонов гумусовым слоем почвы, срезанным с прибрежной полосы; отсыпку склонов при создании прочностных связей между отсыпанным почвогрунтом и коренным дном с помощью живых кольев легкоукореняющихся древесных видов; «шахматное» выполаживание склонов с последующим проведением мероприятий по озеленению оврагов и др.

Выводы

1 Зарастание рыхлых горных пород овражных склонов в течение 25–30 лет способствует проявлению ранних стадий почвенного онтогенеза. Это связано с осыпанием мелкозема, обнаженного слоя почвы в прибровочной зоне, а также с особенностями почвообразовательного процесса под многолетними травами и древесными насаждениями.

2 На ранних стадиях почвенного онтогенеза происходят изменения микроагрегатного состояния материнской породы: уменьшение факторов дисперсности по Н. А. Качинскому; увеличение факторов структурности по Фагелеру, гранулометрического показателя структурности по А. Ф. Вадюниной и степени агрегирования по Бевер-Роадесу. При этом увеличиваются гранулометрические показатели противозерозионной стойкости по А. Д. Воронину и М. С. Кузнецову.

3 Агрегирование механических элементов сопровождается увеличением содержания гумуса в верхнем слое эмбриональных и слабо развитых почв, что оказывает положительное влияние на их водно-физические свойства (уменьшается плотность и увеличивается пористость), а также на водопрочность почвенной структуры.

4 Получена система уравнений, раскрывающая связи воздушно-сухой массы многолетних трав, а также лесной подстилки на овражных склонах с водно-физическими свойствами, содержанием гумуса и водопрочных агрегатов в верхнем слое развивающихся почв. За период 25–30 лет при зарастании склонов древесными насаждениями накапливается более 13 т/га воздушно-сухой массы лесной подстилки, а при зарастании многолетними травами – 5,5 т/га их воздушно-сухой массы.

5 Получены уравнения множественных связей показателей поверхностного стока с независимыми друг от друга факторами: при зарастании склонов многолетними травами – плотность почвы и содержание гумуса; при зарастании древесными насаждениями – содержание гумуса и грануло-

метрический показатель структурности. Общий связующий фактор характеризует полное регулирование поверхностного стока при содержании гумуса в слое почв 0–20 см, равном 4 %, независимо от типа растительности.

6 Эрозия почв полностью отсутствует к 15–20 годам зарастания овражных склонов, когда формируются эмбриональные почвы, характеризующиеся следующими независимыми факторами: под многолетними травами – содержанием гумуса и гранулометрическим показателем противоэрозионной стойкости; под древесной растительностью – содержанием гумуса и степенью агрегирования. Генеральным показателем устойчивости овражных склонов при их зарастании (независимо от типа растительности) является содержание гумуса (более 2,5 %) в формируемых почвах. При этом обнаружено, что эрозия проявляется тогда, когда коэффициенты стока превышают 0,21.

7 Результаты исследований устойчивости овражных склонов в процессе их зарастания и прохождения ранних стадий развития почв позволяют обосновать мероприятия по закреплению и озеленению оврагов.

Список литературы

1 Ивонин, В. М. Методика и результаты физического моделирования оврагообразования / В. М. Ивонин, А. В. Прахов, Ю. М. Суковатов // Геоморфология. – 1987. – № 2. – С. 23–29.

2 Ivonin, V. M. Changes in soil erosion on gully slopes in the course of their overgrowing / V. M. Ivonin, I. V. Revyako, N. S. Chyryev // Eurasian Soil Science. – 1996. – Т. 28, № 10. – P. 396–409.

3 Семёнова-Тяньшанская, А. М. Растительность и оврагообразование / А. М. Семёнова-Тяньшанская // Труды юбилейной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения В. В. Докучаева. – М. – Л.: АН СССР, 1949. – С. 41–54.

4 Ивонин, В. М. Изменение почвогрунтов овражных склонов в связи с их зарастанием / В. М. Ивонин, И. В. Ревяко, Н. С. Чырыев // Почвоведение. – 1995. – № 8. – С. 1003–1010.

5 Геннадиев, А. Н. Почвы и время: модели развития / А. Н. Геннадиев. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 232 с.

6 Махонина, Г. И. Начальные процессы почвообразования в техногенных экосистемах Урала: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.27 / Махонина Галина Ивановна. – Томск, 2004. – 12 с.

7 Гагарина, Э. И. Онтогенез почв на земляных белигеративных сооружениях Ленинградской области / Э. И. Гагарина, Н. Шелемина, Е. В. Абакумов // Вестник Санкт-Петербургского университета / Сер. 3. – 2011. – Вып. 1. – С. 100–107.

8 Изменение некоторых физических свойств почв в хроносерии участков самозарастания карьерно-отвального комплекса Соколов, Чехия / В. Курач, И. Фроуз, М. Курач [и др.] // Почвоведение. – 2012. – № 3. – С. 1–8.

9 Овражная эрозия / Б. Ф. Косов, Е. Ф. Зорина, В. П. Любимов [и др.]; под ред. Р. С. Чалого. – М.: МГУ, 1989. – 168 с.

10 Ивонин, В. М. Лесомелиорация ландшафтов / В. М. Ивонин, Н. Д. Пеньковский. – Ростов н/Д.: СКНЦ ВШ, 2003. – 151 с.

11 Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.

12 Практикум по почвоведению / И. С. Кауричев, Н. П. Панов, М. В. Стратонович [и др.]; под ред. И. С. Кауричева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1980. – 272 с.

13 Ивонин, В. М. Предупреждение разрушительных процессов на откосах оврагов / В. М. Ивонин, Г. И. Васенков // Лесное хозяйство. – 1981. – № 6. – С. 24–26.

14 Калиниченко, Н. П. Противоэрозионная лесомелиорация / Н. П. Калиниченко, И. Г. Зыков. – М.: Агропромиздат, 1986. – 277 с.

15 Ивонин, В. М. Эрозиоведение: учеб. / В. М. Ивонин, В. А. Тертерян; под ред. В. М. Ивонина. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ, 2014. – 216 с.

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 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донской государственной аграрный университет»

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

E-mail: Ivoninforest@yandex.ru

Ivonin Vladimir Mikhaylovich

Degree: Doctor of Agricultural Sciences

Title: Professor

Position: Professor of the Chair of Forestry and Forest Melioration

Affiliation: Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute of Don State Agrarian University

Affiliation address: str. Pushkinskaya, 111, Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation, 346428

E-mail: Ivoninforest@yandex.ru