

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.434.2:631.6.02

ВЛИЯНИЕ НУЛЕВОЙ, МИНИМАЛЬНОЙ И КЛАССИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК НА ЭРОЗИЮ И СВОЙСТВА ПОЧВ В НИЖНЕЙ АВСТРИИ

© 2020 г. М. А. Комиссаров^{а, *}, А. Клик^б

^аУфимский институт биологии УФИЦ РАН, пр. Октября, 69, Уфа, 450054 Россия

^бУниверситет природных ресурсов и прикладных наук, Матхгассе, 18, Вена, 1190 Австрия

*e-mail: mkomissarov@list.ru

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

После доработки 03.09.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Изучено влияние длительного (около 25 лет) ведения различных систем земледелия на комплекс свойств почв и развитие эрозии в Нижней Австрии. Сравнивали три обработки: нулевую (NT), минимальную (CS) и классическую вспашку (CV). Установлено, что свойства Typic Argiudols (Luvic Phaeozems), сформированных на крутых (13.2%) склонах изменяются как в зависимости от вида обработки, так и от положения на склоне. В отличие от вспашки при почвосберегающих технологиях почвы содержали больше питательных элементов, пыли и ила, обладали лучшей водопроницаемостью и устойчивостью агрегатов к разрушению водой. Несмотря на почти в 2 раза большее количество глыбистых фракций (>10 мм), агрегатное состояние почвы при NT и CS было “отличным”. Для всех видов обработок почти все агрохимические, электро- и водно-физические показатели (за исключением рН и плотности почв) увеличивались вниз по склону, что связано с эрозией, а именно выносом взвешенных наносов водными потоками. Обнаружена тесная связь содержания $S_{орг}$ в почве с водоустойчивостью агрегатов ($r = 0.91$), концентрацией растворимых гуминовых и мелкодисперсных веществ ($r = 0.76$) и удельной электропроводностью ($r = 0.75$). Противоэрозионная эффективность обработок возрастала в ряду: CV–CS–NT. Для эрозионно-опасных склонов Альпийских предгорий рекомендуется использование нулевой или минимальной обработки почвы.

Ключевые слова: Альпийское предгорье, обработка почвы, свойства почвы, водная эрозия, Luvic Phaeozems

DOI: 10.31857/S0032180X20040073

ВВЕДЕНИЕ

Минимальная и нулевая обработки почв широко пропагандируются для уменьшения эрозии почв на склонах [3, 5, 35, 40]. По сравнению с традиционными они более экономичны [43], снижают физическую нагрузку за счет уменьшения интенсивности и глубины обработки почвы, на поверхности остается стерня и больше растительных остатков. Их наличие способствует сохранению влаги [36], улучшению структуры почвы [27, 39], ее водоустойчивости и водопроницаемости [28], тем самым снижая опасность развития эрозии [15, 19]. Клик и Еитзингер [32] считают, что противоэрозионный эффект от мульчи достигается при проективном покрытии не менее 30%, и в прямой зависимости от него уменьшается сток.

Эрозия почв является серьезной проблемой в сельском хозяйстве Австрии. Около 839000 га (25%) сельхозугодий уже эродировано, среди них на площади 248000 га потери почв превышают 6 т/га в год, что согласно европейским нормам

считается критическим уровнем [50]. Ежегодный потенциальный смыл в Австрии может достигать 8 млн т мелкозема, при этом потери питательных веществ составили бы 16000 т общего азота и 8000 т калия [49].

За последние 40 лет в австрийской части дунайского бассейна интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов увеличилась на 32%. Суммер с соавт. [53] считают, что это связано в первую очередь с увеличением сельскохозяйственной освоенности водосборных участков и в некоторой степени – изменением климата. Это, а также возрастающая экологическая нагрузка, загрязнение водных объектов из-за поверхностного стока вынудило ученых и фермеров провести переоценку классической вспашки и апробировать альтернативные способы почвосберегающей обработки земель (No-till, Strip-till и др.). В мировом аграрном секторе ресурсосберегающие технологии уже применяются на площади более 94 млн га, в основном в государствах, занимающих лидирующие позиции в области производства сель-

скохозйственной продукции (Канада, США, Бразилия, Аргентина, Новая Зеландия, Австралия и др.). На американском континенте интерес к нулевой технологии возник еще в 1931–1935 гг. после знаменитых пыльных бурь [30]. В настоящее время минимальная обработка почвы используется на 21% сельхозугодий в США и 56% – в Канаде [37]. В Южной Америке из-за резкого повышения цен на энергоносители в 1991–1995 гг. такие технологии начали широко распространяться, в Бразилии площадь сельхозугодий с их использованием достигла 60% [45], а в Аргентине – 80% [20]. В России технология No-till не так популярна и используется на относительно небольших площадях [1, 3, 11, 14, 34]. Вместе с тем, по мнению Трофимовой с соавт. [13], на черноземах применение приемов минимизации основной обработки рекомендуется только если они не деградированы или слабодеградированы, устойчивы к уплотнению, с плотностью почвы, не превышающей 1.1–1.3 г/см³, твердостью 10–30 кг/см² и содержанием глыбистой фракции не более 30%. Ретроспективный мониторинг эродированных светло-серых лесных (Eutric Retisols (Cutanic)) и черноземов оподзоленных (Luvic Greyzemis Chernozems) Южного Предуралья показал, что для приостановления эрозионных процессов на пашне и восстановления плодородия целесообразно использование почвосберегающих технологий и зернотравяных севооборотов или же временный перевод ее в залежь [4].

В Европе, в частности в Австрии, почвосберегающие технологии также мало распространены. К 2003 г. их использовали только на 15% площади сельхозугодий [31]. В Австрии исследования по влиянию No-till на свойства почв, урожайность и противоэрозионную устойчивость ведутся с середины 1990 гг. [24, 25, 32, 33, 42].

Влияние использования технологии No-till на свойства и плодородие почв имеет региональные особенности. Например, в условиях Аргентины длительное (с 1993 по 2015 гг.) применение этой технологии способствовало увеличению содержания органического вещества на 6%, тогда как при вспашке оно уменьшилось на 1.7%, при этом на No-till урожайность была выше в среднем на 13% независимо от сложившихся погодных условий [20]. В восточной Канаде урожайность кукурузы, сои и пшеницы при их пятилетнем возделывании на нулевой обработке была на 20% меньше, чем на вспаханых участках [38]. В Южном Предуралье (Россия) применение технологии No-till на черноземе выщелоченном (Luvic Chernozem) слабоэродированном оказалось более эффективным по сравнению с классической обработкой только в засушливые годы [2]. В Нижней Австрии система нулевой обработки почвы способствовала лишь незначительному увеличению урожайности

сти озимой пшеницы, кукурузы, сои и сахарной свеклы относительно традиционной вспашки [41].

Цель исследований – определить влияние длительного использования различных технологий обработки на комплекс свойств поверхностного слоя почв, сформированных на эрозионно-опасных склонах Альпийских предгорий. В задачи исследований входило определение водно-физических и агрохимических свойств почв в различных частях склонов, а также выявление основных факторов, определяющих устойчивость почв к водной эрозии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований явились почвы, сформированные в Альпийском предгорье Австрии в 40 км севернее г. Вены (рис. 1). Исследования проводили на малопротяженном (100 м), крутом (13.2%) склоне юго-восточной (азимут 220°) экспозиции вблизи д. Мистелбах (48°35'01" N, 16°35'16" E, ~ 252 м над ур. м.). Климат местности умеренный, со среднегодовой температурой 9.8°C и количеством годовых осадков 559 мм. Ранее почва склона была классифицирована как Typic Argiudolls [31–33, 51] или Luvic Phaeozems (WRB). Исследуемая почва характеризуется пылевато-суглинистым (silt loams) гранулометрическим составом, слабощелочной реакцией среды и низким содержанием органического вещества.

На склоне изучали три участка, одинаковые по размеру (20 × 100 м) и примыкающие друг к другу, со следующими видами обработки:

1) нулевая обработка почвы, No-till (NT) с прямым посевом сеялками Accord Optima Hard Drive и Universal Pneumatic Seeders. Технологию на участке начали применять с 1994 г.;

2) минимальная обработка почвы (CS) с культивацией ротационной бороной на глубину 8 см с 1994 г.;

3) вспашка с оборотом пласта (CV) на глубину 20–25 см с использованием отвального плуга, а также рыхление почвы на 8 см дисковой бороной в два прохода. Участок начали распахивать с 1970-х годов.

В составе зернопропашного севооборота возделывали кукурузу, подсолнечник и сахарную свеклу, с расстоянием посевных междурядий 0.5–0.8 м; зерновые были представлены озимой пшеницей, овсом и ячменем [51].

Осенью 2016 г. были отобраны образцы почв из слоя 0–5 см в верхней, средней и нижней частях склонов, каждый образец почвы был смешан из пяти точек (отбор проб осуществляли маршрутным способом поперек склона). На момент отбора проб на варианте с нулевой обработкой почвы были обнаружены пожнивные остатки пшеницы, их проективное покрытие составило 50–60%, а высо-

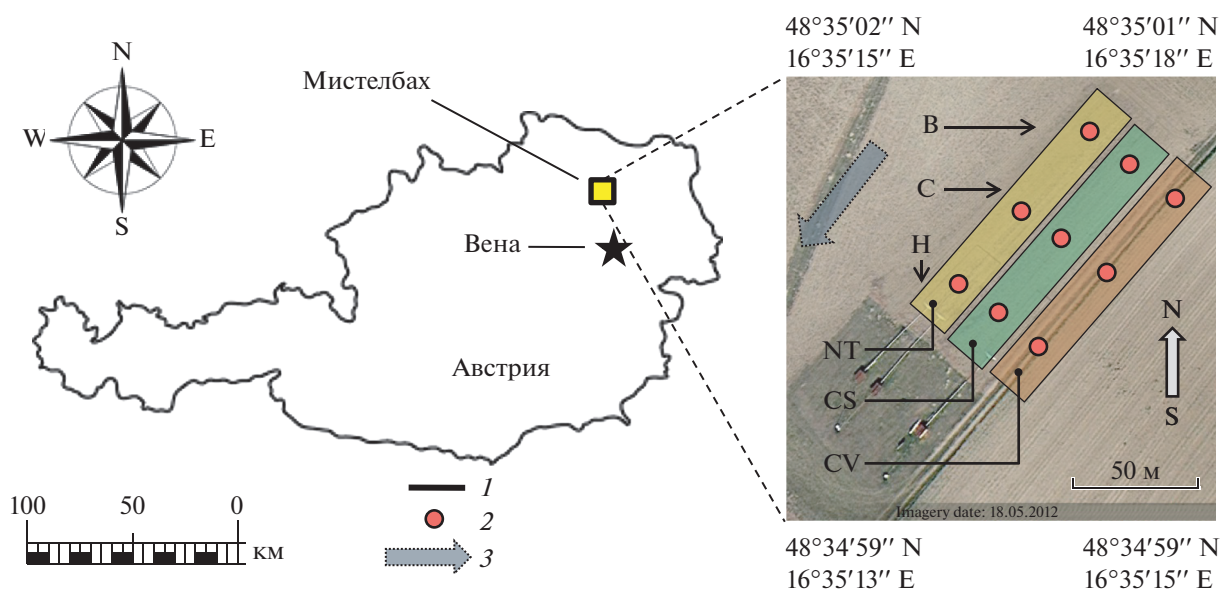


Рис. 1. Схема места проведения исследований и отбора проб. Здесь, в таблицах и рисунках: NT – нулевая обработка, CS – минимальная, CV – классическая вспашка; В – верхняя, С – средняя, Н – нижняя часть склона, сред. – среднее по склону: 1 – граница участка, 2 – место отбора проб, 3 – направление стока.

та стерни 5–10 см. Агрехимические и водно-физические свойства определяли по методам [16], которые согласуются с международными: реакцию среды – портативным рН-метром (при соотношении почва : вода 1 : 2,5 в водной вытяжке), содержание карбонатов – с помощью кальциметра, удельную электропроводность почв – кондуктометром (отношение почва : вода 1 : 5 в водной вытяжке). Также определяли содержание фосфора, общего углерода и азота с использованием макроэлементарного анализатора (Vario MAX CN), концентрации растворенных органических и нерастворенных мелкодисперсных веществ в почвенной суспензии (SAK, cm^{-1} , при длине ультрафиолетовой волны 254 нм) – спектрофотометра (Hitachi UH 5300). Водоустойчивость почвенных агрегатов определяли стандартным методом мокрого просеивания [29], гранулометрический состав: песок (2.0–0.063 мм), пылеватые фракции (0.063–0.002 мм), ил (<0.002 мм) – методом пипетки на компьютеризированной установке (седиментационный метод); структурно-агрегатный состав – с использованием вибрационной установки с ситами диаметрами отверстий: 10, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 мм, водопроницаемость ненарушенных почвенных монолитов измеряли в лабораторных условиях при помощи специальных цилиндров ($d = 5$ см; $h = 5$ см) с фильтрами.

Для статистической обработки полученных результатов использовали пакет программ MS Excel 2007. В таблицах представлены средние значения и их стандартные отклонения ($M \pm SEM$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Продолжительное ведение различных систем земледелия на склоне отразилось на ряде водно-физических и агрохимических свойств почвы. Во многих работах отмечено, что при длительном использовании нулевой обработки возрастает плотность сложения почв [3, 22, 23], что способствует увеличению сопротивления почв к размыву [9]. На изученном склоне, несмотря на слабовыраженную тенденцию к уплотнению при No-till, плотность сохранялась в оптимальном для роста и развития практически всех сельскохозяйственных культур в диапазоне от 0.8 до 1.0 $\text{г}/\text{см}^3$ (табл. 1). По всей видимости это обусловлено наличием стерни и растительной мульчи при No-till на фоне относительно легкого гранулометрического состава (рис. 2). Интересно отметить, что при нулевой обработке плотность почвы, как и гранулометрический состав были одинаковыми по всему склону. При минимальной обработке и вспашке плотность сложения почвы была больше в верхней части. Книзу наблюдалось увеличение содержания средне- и мелкодисперсных фракций, причем при минимальной обработке была выражена только тенденция, а на пашне такое изменение было существенным ($p < 0.05$). В целом анализ гранулометрического состава показал приостановление передвижения пылеватых частиц и ила вниз по склону при No-till, что свидетельствует о ее противоэрозивной способности. Ранее показано [31, 51], что с 1994 по 2015 гг. на этом участке при традиционной вспашке потери почвы составляли в среднем 10.9,

Таблица 1. Свойства почв при различных видах обработки, $M \pm SEM$

Часть склона	$C_{\text{общ}}, \%$	pH H_2O	$N_{\text{общ}}, \%$	$P_{\text{общ}}, \text{мг}/100 \text{ г}$	$\text{CaCO}_3, \%$	Удельная электропроводность, мСм/м	SAK 254, см^{-1}	C/N	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
NT									
Верх	2.9 ± 0.02	8.0 ± 0.00	0.2 ± 0.00	92.3 ± 2.2	1.5 ± 0.05	16.9 ± 0.6	0.7 ± 0.02	14.5 ± 0.02	1.0 ± 0.01
Середина	3.6 ± 0.02	8.0 ± 0.01	0.3 ± 0.01	95.6 ± 3.1	1.6 ± 0.03	21.0 ± 0.1	1.3 ± 0.03	12.0 ± 0.53	1.0 ± 0.01
Низ	4.3 ± 0.02	8.0 ± 0.01	0.3 ± 0.01	98.9 ± 2.4	2.2 ± 0.05	24.4 ± 0.1	1.4 ± 0.03	14.3 ± 0.56	1.0 ± 0.01
Среднее	3.6 ± 0.07	8.0 ± 0.02	0.3 ± 0.03	95.6 ± 3.2	1.7 ± 0.21	20.8 ± 1.0	1.1 ± 0.23	13.6 ± 0.91	1.0 ± 0.05
CS									
Верх	2.7 ± 0.02	8.0 ± 0.01	0.2 ± 0.01	92.1 ± 1.3	1.2 ± 0.00	14.9 ± 0.1	0.6 ± 0.05	13.5 ± 0.10	1.0 ± 0.03
Середина	3.3 ± 0.02	8.0 ± 0.00	0.2 ± 0.00	93.1 ± 0.2	1.7 ± 0.00	17.3 ± 0.1	0.8 ± 0.02	16.5 ± 0.12	0.9 ± 0.01
Низ	3.5 ± 0.01	8.0 ± 0.01	0.3 ± 0.01	97.4 ± 1.7	2.1 ± 0.02	19.6 ± 0.9	1.0 ± 0.01	17.5 ± 0.49	0.9 ± 0.02
Среднее	3.2 ± 0.09	8.0 ± 0.02	0.2 ± 0.01	94.2 ± 2.2	1.7 ± 0.31	17.3 ± 1.2	0.8 ± 0.09	15.8 ± 1.19	0.9 ± 0.06
CV									
Верх	2.4 ± 0.01	7.9 ± 0.01	0.2 ± 0.01	88.9 ± 1.2	1.7 ± 0.07	16.6 ± 0.1	0.5 ± 0.01	12.0 ± 0.28	0.9 ± 0.01
Середина	3.1 ± 0.03	8.1 ± 0.01	0.2 ± 0.00	89.5 ± 0.3	2.1 ± 0.01	14.9 ± 0.1	0.5 ± 0.01	15.5 ± 0.41	0.8 ± 0.01
Низ	3.1 ± 0.03	8.0 ± 0.01	0.2 ± 0.01	93.1 ± 1.7	2.2 ± 0.01	15.8 ± 0.1	0.5 ± 0.04	15.5 ± 0.53	0.8 ± 0.02
Среднее	2.9 ± 0.14	8.0 ± 0.03	0.2 ± 0.01	90.5 ± 1.2	2.0 ± 0.19	15.7 ± 0.6	0.5 ± 0.03	14.3 ± 1.07	0.8 ± 0.03

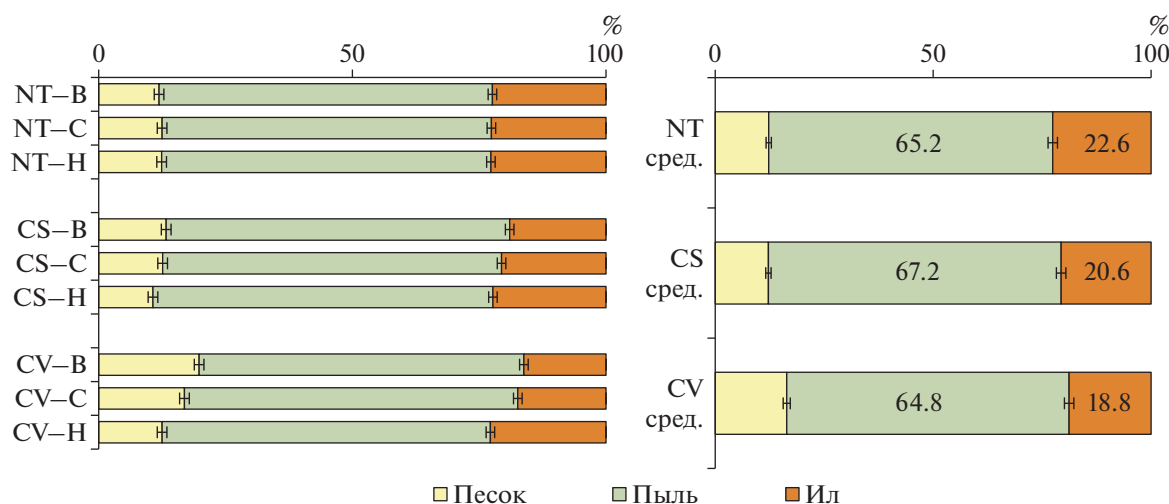


Рис. 2. Гранулометрический состав почв.

при минимальной – 1.55 и нулевой – 1.06 т/га в год, а жидкий сток 13.7, 7.7, 8.6 мм соответственно, и был обусловлен на 95% ливневыми осадками [32]. Это свидетельствует о разной скорости впитывания стока и согласуется с данными по влагозапасам: влажность почвы возрастала в ряду CV–CS–NT [31]. В целом аналогичная закономерность, а именно больший твердый сток на пашне и жидкий на залежи многолетних трав наблюдался на пологих склонах Южного Предуралья в условиях моделирования ливневых осадков [6], а также при снеготаянии [7].

Повышенный поверхностный сток на пашне обусловлен, прежде всего, ее водопроницаемостью, которая была в 1.5 раза ниже по сравнению с No-till (рис. 3). Например, в южной части Бразилии (регион Серадо) и на юге африканской Сахары длительное использование No-till также способствовало улучшению впитывания воды почвой [46, 48], тогда как в странах северо-западной Европы эта технология напротив, приводила к снижению инфильтрации [47]. Исследования [6, 8] показали, что на пашне водопроницаемость лучше, чем на необработанной почве только первые часы, затем наступает предел водовместимости пахотного слоя и резкое снижение впитываемости. Это связано с тем, что на пашне почвенные агрегаты легко разрушаются водой и происходит закупоривание макропор. В полевых условиях дополнительное снижение водопроницаемости также может быть вызвано наличием плужной подошвы, которая выступает в качестве водоупора.

По мнению Лебедевой с соавт. [9], равновесие между процессами разрушения и образования структуры в почвах устанавливается через 20 лет после начала их обработки или даже раньше. К настоящему времени структура почвы при всех видах обработки оценивается как отличное агре-

гатное состояние, при этом в среднем по склону коэффициент структурности и сумма агрономически ценных агрегатов несколько увеличивались в ряду NT–CS–CV (табл. 2). Сходная закономерность наблюдалась и для черноземов обыкновенных и выщелоченных Центрально-Черноземного района России в условиях аналогичных обработок [13]. Несмотря на повышенное содержание глыбистой фракции при нулевой обработке структурные агрегаты в целом оказались более водоустойчивыми (рис. 4) и их устойчивость оценивалась как хорошая, тогда как при минимальной она была удовлетворительной, а традиционной вспашке – неудовлетворительной. Увеличение доли водоустойчивых агрегатов и снижение эродированности почв также было отмечено и для сероземов (Calcaric Cambisol) в условиях продолжительного использования (16 лет) No-till в центральной части Китая (Лёссовое плато) [21]. Водоустойчивость в пределах исследуемого склона,

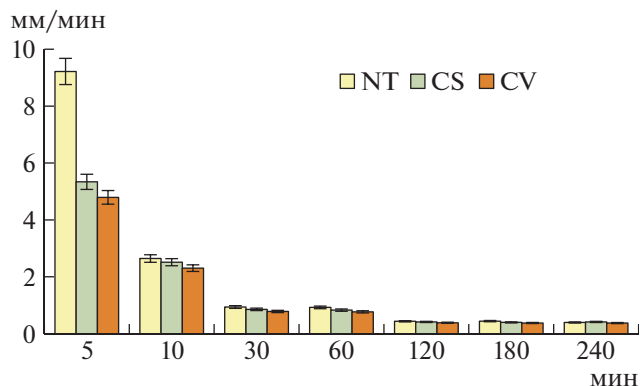


Рис. 3. Водопроницаемость почв (средние значения по склону).

Таблица 2. Структурно-агрегатный состав (%) 0–5 см слоя почвы в зависимости от положения на склоне и вида обработки, M ± SEM

Часть склона	Фракция, мм							K _{стр}	Σ (0.25–10.0 мм)	
	>10	10–8	8–4	4–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25			<0.25
	NT									
Верх	15.8 ± 1.9	6.4 ± 0.5	17.6 ± 1.2	18.7 ± 0.2	18.1 ± 0.7	13.8 ± 0.4	6.5 ± 0.4	3.2 ± 0.2	4.3 ± 0.5	81.0 ± 1.7
Середина	26.2 ± 2.2	14.1 ± 1.7	22.5 ± 0.3	20.0 ± 1.4	9.5 ± 1.5	4.6 ± 0.6	1.8 ± 0.2	1.2 ± 0.1	2.6 ± 0.3	72.6 ± 2.1
Низ	28.2 ± 3.6	13.4 ± 0.9	23.4 ± 1.7	18.1 ± 1.2	8.7 ± 0.7	5.0 ± 0.3	2.0 ± 0.2	1.2 ± 0.8	2.4 ± 0.4	70.6 ± 3.5
Среднее	23.4 ± 4.9	11.3 ± 3.1	21.2 ± 2.3	19.0 ± 1.0	12.1 ± 3.7	7.8 ± 3.7	3.4 ± 1.9	1.9 ± 1.1	3.1 ± 0.8	74.7 ± 4.2
	CS									
Верх	10.2 ± 3.1	2.2 ± 0.7	16.5 ± 1.6	20.8 ± 2.9	19.8 ± 1.3	17.7 ± 3.4	8.8 ± 2.3	3.8 ± 1.1	6.1 ± 1.4	86.0 ± 2.7
Середина	31.6 ± 1.4	7.2 ± 0.9	18.9 ± 1.4	15.9 ± 0.5	12.8 ± 1.0	8.7 ± 0.3	3.5 ± 0.2	1.5 ± 0.1	2.0 ± 0.1	66.9 ± 1.3
Низ	17.4 ± 1.2	6.9 ± 0.1	23.5 ± 1.5	20.5 ± 2.2	15.2 ± 2.5	10.7 ± 0.1	4.1 ± 0.2	1.7 ± 0.1	4.2 ± 0.3	80.9 ± 1.2
Среднее	20.5 ± 7.4	5.5 ± 2.0	21.0 ± 2.8	20.9 ± 3.2	14.8 ± 3.1	11.1 ± 3.4	4.5 ± 2.1	1.6 ± 1.0	4.1 ± 1.6	77.9 ± 6.8
	CV									
Верх	7.7 ± 1.0	2.7 ± 0.8	18.7 ± 0.9	21.5 ± 2.1	25.7 ± 2.5	15.5 ± 0.6	5.9 ± 0.3	2.3 ± 0.1	9.0 ± 0.9	90.0 ± 0.9
Середина	11.4 ± 2.1	4.1 ± 0.2	13.9 ± 1.9	17.2 ± 1.8	22.3 ± 0.8	20.2 ± 1.6	7.6 ± 1.5	3.4 ± 0.8	5.8 ± 0.8	85.2 ± 1.8
Низ	10.5 ± 0.7	2.6 ± 0.6	15.7 ± 1.6	16.7 ± 0.9	23.6 ± 0.9	20.0 ± 1.2	8.0 ± 0.6	3.1 ± 0.4	6.4 ± 0.3	86.5 ± 0.6
Среднее	11.9 ± 1.8	3.7 ± 0.9	15.9 ± 2.3	19.6 ± 2.3	22.1 ± 2.0	17.2 ± 2.4	6.9 ± 1.2	2.7 ± 0.6	7.1 ± 1.3	87.2 ± 1.8

Примечание. K_{стр} – коэффициент структурности; Σ (0.25–10.0 мм) – сумма агрономически ценных агрегатов.

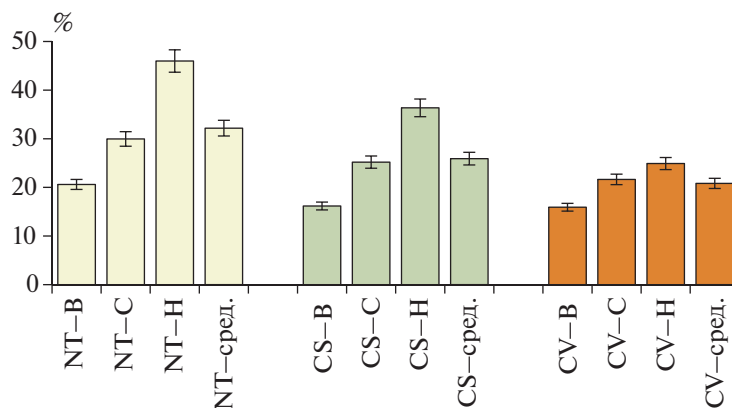


Рис. 4. Водостойчивость почвенных агрегатов в зависимости от вида обработки и элемента рельефа.

как и содержание ила и пыли, последовательно возрастали к нижней части. Рядом авторов показано существенное увеличение водостойчивых агрегатов с увеличением содержания физической глины [17, 54] и органического вещества [18, 26, 46] в почве. В наших исследованиях содержание водостойчивых агрегатов (y) в большей степени коррелировало с количеством органического вещества (x) $y = 16.46x - 26.66$, $p < 0.001$, $r = 0.91$, чем с илом (z) $y = 0.16z - 0.18$, $p < 0.1$, $r = 0.59$.

Поскольку интенсивность эрозионных процессов на склоне различалась в зависимости от вида обработки, это отразилось на агрохимических свойствах почвы. В целом почва всех вариантов характеризовалась низким содержанием органического вещества, низкой и очень низкой обогащенностью его азотом. В почве пашни в среднем по склону было меньше питательных элементов, чем при почвосберегающих системах земледелия. Так, органического вещества было на 10–20% меньше, а фосфора на ~5%. Вместе с водно-эрозионными потоками при классической обработке немного сильнее вымывался и азот. Различия в содержании $C_{\text{орг}}$, фосфора и азота в почве при минимальной и нулевой обработке были незначительны. Содержание $CaCO_3$ и реакция среды почв по всем вариантам обработки существенно не различались. Концентрация растворимых гуминовых и мелкодисперсных веществ (SAK) в почвенной суспензии тесно связана с $C_{\text{орг}}$ ($r = 0.76$, $p < 0.05$), и при No-till она была в 2 раза выше, чем при вспашке, и на треть – минимальной. Удельная электропроводность почвы при нулевой обработке была на 17% выше, чем при минимальной и на 22% – классической. Было обнаружено, что она также имеет высокую силу связи с $C_{\text{орг}}$ ($r = 0.75$, $p < 0.05$). Обычно удельная электропроводность зависит от многих факторов: состава и структуры почвы, плотности, влажности, температуры, наличия примесей: солей, кислот, щелочей [12]. Способность почвы проводить

электрический ток при всех обработках, как и отмеченные выше свойства почв (содержание тонких фракций, водостойчивость агрегатов, $C_{\text{орг}}$ и SAK), увеличивалась вниз по склону. Аналогичная тенденция распределения была выявлена и по содержанию общего фосфора и карбонатов. Это свидетельствует о продолжении передвижения почвенно-эрозионного материала по склону, но интенсивность этих процессов снижается от классической обработки к минимальной и нулевой.

Интересно отметить, что ранее [31] на исследуемом склоне потери с пашни азота, фосфора и органического углерода составляли 24.0, 14.3 и 180.3 кг/га, а при минимальной – 9.4, 3.4, 53.2 кг/га и нулевой – 5.1, 1.9, 29.0 соответственно. По всей видимости, со временем смыв почвы на склоне снижался, а противоэрозионный эффект почвосберегающих обработок возрастал. Согласно расчетам по эрозионным моделям [44], темпы эрозии почв, как при традиционной системе земледелия, так и с применением почвосберегающих технологий в условиях изменения климата будут снижаться, и это в первую очередь связано с уменьшением эрозионного индекса дождя и вариативностью ливней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжительное (25 лет) ведение различных систем земледелия на крутом склоне повлияло на комплекс свойств и развитие эрозии по-разному. По сравнению с почвосберегающими технологиями на пашне произошли существенные изменения в водно-физических и агрохимических свойствах: в почве склона увеличилось содержание песка в гранулометрическом составе, а в структурно-агрегатном – доли агрегатов размером 1–2 мм, снизились влагозапасы [31], водостойчивость и водопроницаемость почв; содержание $C_{\text{орг}}$, питательных элементов (N, P) и соотношение C/N уменьшилось на 5–20%, удельная электропро-

водность снизилась на 25%, а САК – в 2 раза. Эти изменения связаны как с особенностями технологии обработки почвы (механическое воздействие орудий техники), а также с эрозией. На всех вариантах обработки было обнаружено увеличение вышеперечисленных показателей вниз по склону в соответствии с эрозионным транспортом мелкодисперсных фракций почвы. В отношении сохранения питательных элементов и противоэрозионной устойчивости минимальная обработка была несколько хуже, чем No-till, но значительно лучше пашни. Таким образом, при возделывании сельскохозяйственных культур на эрозионно-опасных склонах в Нижней Австрии рекомендуется использовать прямой посев, а при технологической необходимости – минимальную. No-till по сравнению с классической вспашкой более эффективна и имеет ряд преимуществ: сохраняется плодородие почвы, снижается эрозия и несколько повышается урожайность [51], при этом происходит снижение трудозатрат, количества используемых орудий и техники, их воздействий на почву (проходов), экономия топлива.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность М. Faulhammer за помощь в проведении агрохимических анализов и F. Forster при ассистировании в лаборатории физики почв. Особая признательность И.М. Габбасовой, Т.Т. Гарипову.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке фонда OeAD (Австрийское агентство по международному сотрудничеству в образовании и исследованиях) по гранту “Ernst Mach”, а также в рамках государственного задания Минобрнауки России № 075-00326-19-00 по теме № АААА-А18-118022190102-3.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Коротких Н.А.* Проблемы и перспективы разработки и освоения технологии No-till на черноземах лесостепи западной Сибири // *Достижения науки и техники АПК.* 2013. № 9. С. 16–19.
2. *Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Гарипов Т.Т., Комиссаров М.А., Сидорова Л.В., Галимзянова Н.Ф., Либельт Р., Абакумов Е.В., Гималетдинова Г.А., Простякова З.Г.* Использование местных удобрений, почвенного гриба *Trichoderma koningii oudet* и No-till обработки для улучшения агрочернозема в Южном Предуралье // *Сельскохозяйственная биология.* 2018. Т. 53. № 5. С. 1004–1012. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.5.1004rus>
3. *Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Хабиров И.К., Комиссаров М.А., Гарипов Т.Т., Сидорова Л.В., Асылбаев И.Г., Рафиков Б.В., Яубасаров Р.Б.* Оценка состояния агрочерноземов Зауральской степи в условиях использования системы обработки почвы No-till // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук.* 2014. № 6. С. 32–36. <https://doi.org/10.3103/S1068367415010061>
4. *Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Хабиров И.К., Комиссаров М.А., Фрюауф М., Либельт П., Гарипов Т.Т., Сидорова Л.В., Хазиев Ф.Х.* Изменение эродированных почв во времени в зависимости от их сельскохозяйственного использования в Южном Предуралье // *Почвоведение.* 2016. № 10. С. 1277–1283. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16100075>
5. *Завалин А.А., Дридигер В.К., Белобров В.П., Юдин С.А.* Азот в черноземах при традиционной технологии обработки и прямом посеве (обзор) // *Почвоведение.* 2018. № 12. С. 1506–1516. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18120146>
6. *Комиссаров М.А., Габбасова И.М.* Эрозия агрочерноземов при орошении дождеванием и моделировании осадков в Южной лесостепи Башкирского Предуралья // *Почвоведение.* 2017. № 2. С. 264–272. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020071>
7. *Комиссаров М.А., Габбасова И.М.* Эрозия почв при снеготаянии на пологих склонах в Южном Предуралье // *Почвоведение.* 2014. № 6. С. 734–743. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14060057>
8. *Комиссаров М.А., Оеура Ш.* Эффективность отвальной вспашки при дезактивации и реабилитации радиационно-загрязненных пастбищ Северной Японии // *Почвоведение.* 2018. № 8. С. 1014–1021. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18080051>
9. *Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В., Судницын И.И.* Влияние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межагрегатных связей // *Почвоведение.* 2017. № 3. С. 354–359. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010099>
10. *Лебедева И.И., Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Гребенников А.М., Маркина Л.Г.* Структурное состояние миграционно-мицелярных (типичных) агрочерноземов каменной степи в условиях разновозрастной пашни // *Почвоведение.* 2017. № 2. С. 227–238. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020095>
11. *Лицуков С.Д., Титовская А.И., Акинчин А.В., Сегидин А.Н.* Микробиологическая активность почвы при различных системах земледелия // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии.* 2013. № 8. С. 57–60.
12. *Поздняков А.И., Елисеев П.И., Поздняков Л.А.* Электрофизический подход к оценке некоторых элементов окультуренности и плодородия легких почв гумидной зоны // *Почвоведение.* 2015. № 7. С. 832–842. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15050068>
13. *Трофимова Т.А., Коржов С.И., Гулевский В.А., Образцов В.Н.* Оценка степени физической деградации и пригодности черноземов к минимизации основной обработки почвы // *Почвоведение.* 2018. № 9. С. 1125–1131. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18090125>

14. Чекаев Н.П., Власова Т.А., Кочмина Е.О. Изменение агрофизических показателей чернозема выщелоченного и урожайности яровой пшеницы в условиях внедрения технологии No-till // Нива Поволжья. 2015. № 2(35). С. 74–79.
15. Adekalu K.O., Okunade D.A., Osunbitan J.A. Compaction and mulching effects on soil loss and runoff from two southwestern Nigeria agricultural soils // Geoderma. 2006. V. 137. P. 226–230. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.012>
16. Applied Soil Physics, LV-Nr. 815306; Physical and selected chemical methods of soil analysis, LV-Nr. 815313. <https://manualzz.com/doc/4710797/lv-nr.-815306-applied-soil-physics-lv>
17. Attou F., Bruand A., Le Bissonnais Y. Effect of clay content and silt-clay fabric on stability of artificial aggregates // Eur. J. Soil Sci. 1998. V. 49. P. 569–577. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.4940569.x>
18. Belaid H., Habaieb H. Soil aggregate stability in a Tunisian semi-arid environment with reference to fractal analysis // J. Soil Sci. Environ. Managem. 2015. V. 6. P. 16–23. <https://doi.org/10.5897/JSSEM2012.0360>
19. Edwards L., Burney J.R., Richter G., MacRae A.H. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada // Agriculture, Ecosystems Environment. 2000. V. 81. P. 217–222. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00162-6)
20. Fernandez R., Frasier I., Noellemeyer E., Quiroga A. Soil quality and productivity under zero tillage and grazing on Mollisols in Argentina – A long-term study // Geoderma Regional. 2017. V. 11. P. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.09.002>
21. Gao L., Wang B., Li S., Wu H., Wu X., Liang G., Gong D., Zhang X., Cai D., Degre A. Soil wet aggregate distribution and pore size distribution under different tillage systems after 16 years in the Loess Plateau of China // Catena. 2019. V. 173. P. 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.043>
22. Girardello V.C., Amado T.J.C., Nicoloso R.S., Horbe T.A.N., Ferreira A.O., Tabaldi F.M., Lanzanova M.E. Changes in physical properties of a red Oxisol and of soybean yield under no-tillage affected by chisel plow types // Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 2011. V. 35. P. 2115–2126. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600026>
23. Gozubuyuk Z., Sahin U., Ozturk I., Celik A., Adiguzel M.C. Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate // Catena. 2014. V. 118. P. 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.006>
24. Himmelbauer M.L., Sobotik M., Loiskandl W. No-tillage farming, soil fertility and maize root growth // Archives of Agronomy and Soil Science. 2012. V. 58 (Suppl. 1). P. 151–157. <https://doi.org/10.1080/03650340.2012.695867>
25. Hosl R., Strauss P. Conservation tillage practices in the alpine forelands of Austria—Are they effective? // Catena. 2016. V. 137. P. 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.009>
26. Jensen J.L., Schjonning P., Watts C.W., Christensen B.T., Peltre C., Munkholm L.J. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability // Geoderma. 2019. V. 337. P. 834–843. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.034>
27. Jordan A., Zavala L.M., Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain // Catena. 2010. V. 81. P. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.007>
28. Kahlon M.S., Lal R., Varughese M.A. Twenty-two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio // Soil Tillage Res. 2013. V. 126. P. 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.001>
29. Kandeler E., Murer E. Aggregate stability and soil processes in a soil with different cultivation // Geoderma. 1993. V. 56. P. 503–513. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90130-D](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90130-D)
30. Kimberlin L.W., Hidlebaugh A.L., Grunewald A.R. The potential wind erosion problem in the United States // Transactions Am. Soc. Agricul. Eng. 1977. V. 20. P. 873–879.
31. Klik A. Einfluss unterschiedlicher bodenbearbeitung auf oberflächenabfluss, bodenabtrag sowie auf nährstoff- und pestizidaustrage // Osterreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. 2003. V. 55. P. 89–96.
32. Klik A., Eitzinger J. Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria // J. Agricul. Sci. 2010. V. 148. P. 529–541. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000158>
33. Klik A., Strohmeier S.M. Reducing soil erosion by using sustainable soil management systems // Wasserwirtschaft. 2011. V. 101. №. 9. P. 20–24.
34. Kuhling I., Redozubov D., Broll G., Trautz D. Impact of tillage, seeding rate and seeding depth on soil moisture and dryland spring wheat yield in Western Siberia // Soil Tillage Res. 2017. V. 170. P. 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.02.009>
35. Lenka N.K., Lal R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system // Soil Tillage Res. 2013. V. 126. P. 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.011>
36. Liebelt P., Fruhauf M., Suleymanov R., Komissarov M., Yumaguzhina D., Galimova R. Causes, consequences and opportunities of the post-Soviet land use changes in the forest-steppe zone of Bashkortostan // GEOÖKO. Goettingen, 2015. V. XXXVI. P. 77–111.
37. Malhi S.S., Legere A., Vanasse A., Parent G. Effects of long-term tillage, terminating no-till and cropping system on organic C and N, and available nutrients in a Gleysolic soil in Quebec, Canada // J. Agricul. Sci. 2018. V. 156. P. 472–480. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000448>
38. Morrison M.J., Cober E.R., Gregorich E.G., Voldeng H.D., Ma B., Topp G.C. Tillage and crop rotation effects on the yield of corn, soybean, and wheat in eastern Canada // Can. J. Plant Sci. 2018. V. 98. № 1. P. 183–191. <https://doi.org/10.1139/cjps-2016-0407>
39. Mulumba L.N., Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties // Soil Tillage Res. 2008. V. 98. P. 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.011>
40. Myers J.L., Waggoner M.G. Runoff and sediment loss from three tillage systems under simulated rainfall // Soil Tillage Res. 1996. V. 39. P. 115–129. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(96\)01041-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01041-0)

41. Neugschwandtner R.W., Kaul H.P., Liebhard P., Wagen-tristl H. Winter wheat yields in a long-term tillage experiment under Pannonian climate conditions // *Plant, Soil Environ.* 2015. V. 61. P. 145–150. <https://doi.org/10.17221/820/2014-PSE>
42. Neugschwandtner R.W., Liebhard P., Kaul H.P., Wagen-tristl H. Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment // *Plant, Soil and Environ.* 2014. V. 6. P. 57–62. <https://doi.org/10.17221/879/2013-PSE>
43. Rosner J., Zwatz E., Klik A., Gyuricza C. Conservation tillage systems—soil—nutrient—and herbicide loss in lower Austria and the mycotoxin problem // 15th International Congress of ISCO. Geographical Research Institute, Hungary, 2008.
44. Scholz G., Quinton J.N., Strauss P. Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. *Catena*. 2008. V. 72. P. 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.04.005>
45. Silva F.A.M., Naudin K., Corbeels M., Scopel E., Affholder F. Impact of conservation agriculture on the agronomic and environmental performances of maize cropping under contrasting climatic conditions of the Brazilian Cerrado // *Field Crops Res.* 2019. V. 230. P. 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.009>
46. Sithole N.J., Magwaza L.S., Thibaud G.R. Long-term impact of no-till conservation agriculture and N-fertilizer on soil aggregate stability, infiltration and distribution of C in different size fractions // *Soil Tillage Res.* 2019. V. 190. P. 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.004>
47. Skaalsveen K., Ingram J., Clarke L.E. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review // *Soil Tillage Res.* 2019. V. 189. P. 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.004>
48. Souza L.H.C., Matos E.D.S., Magalhaes C.A.D.S., de la Torre E.R., Lamas F.M., Lal R. Soil carbon and nitrogen stocks and physical properties under no-till and conventional tillage cotton-based systems in the Brazilian Cerrado // *Land Degradation Development.* 2018. V. 29. №. 10. P. 3405–3412. <https://doi.org/10.1002/ldr.3105>
49. Stalzer W. Rahmenbedingungen für eine gewässer-ertragliche Landbewirtschaftung. In: Bundesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): *Gewässer-ertragliche Landbewirtschaftung. Konsequenzen für die Land-, Forst- und Wasserwirtschaft. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft.* Bd. 1. 1995. P. 1–24.
50. Strauss P., Klaghofer E. Austria. In *Soil erosion in Europe*. Chichester: Wiley, 2006. P. 205–212.
51. Strohmeier S., Laaha G., Holzmann H., Klik A. Magnitude and occurrence probability of soil loss: a risk analytical approach for the plot scale for two sites in Lower Austria // *Land Degradation Development.* 2016. V. 27. P. 43–51. <https://doi.org/10.1002/ldr.2354>
52. Strudley M.W., Green T.R., Ascough J.C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science // *Soil Tillage Res.* 2008. V. 99. P. 4–48. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.007>
53. Summer W., Klaghofer E., Zhang W. (Eds.). *Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes.* International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publications. Wallingford, 1998. V. 249. 453 p.
54. Vaezi A., Eslami S., Keesstra S. Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls // *Catena*. 2018. V. 167. P. 385–398. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.003>

Impact of No-Till, Conservation and Conventional Tillage on Erosion and Soil Properties in Lower Austria

M. A. Komissarov^{1,*} and A. Klik²

¹*Ufa Institute of Biology UFRC, Russian Academy of Science, Ufa, 450054 Russia*

²*Institute of Hydraulics and Rural Water Management, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, 1190 Austria*

*e-mail: mkomissarov@list.ru

The effect of long-term (about 25 years) management of various farming systems on the complex of soil properties and the development of erosion in Lower Austria has been studied. Three treatments were compared: zero (NT), minimum (CS) and classical plowing (CV). It has been established that the properties of Typic Argiudols (*Luvic Phaeozems*) formed on steep slopes vary both depending on the type of treatment and on the position on the slope. Unlike of plowing, the soil under soil-saving technologies contained more nutrients, silt and clay, had better water permeability and resistance of the aggregates to water destruction. Despite the fact that the amount of lumpy fractions almost doubled, the aggregate state of the NT and CS soil was “excellent”. For all types of treatments, almost of all agrochemical, electro- and water-physical parameters (with the exception of pH and bulk density) increased down the slope, which is associated with erosion, namely the removal of suspended sediment by water flows. A close relationship was found between the C_{org} content in the soil and the water resistance of the aggregates ($r = 0.91$), SAK ($r = 0.76$) and electrical conductivity ($r = 0.75$). Anti-erosion effectiveness of treatments increased in the series: CV–CS–NT. For erosion-prone slopes of the Alpine foothills, zero or minimal tillage is recommended.

Keywords: Alpine foothills, tillage, soil properties, water erosion, *Luvic Phaeozems*