

**Кулунда: сельское хозяйство
и низкоэмиссионные технологии
устойчивого землепользования**

Монография



Барнаул

Издательство
Алтайского государственного
университета
2021

УДК 911.2(571.150): 332.3
ББК 26.829(2Рос-4Алт) + 65.281
К 905

Научные редакторы

В.И. Беляев, доктор технических наук, профессор;
М.М. Силантьева, доктор биологических наук, профессор;
А.М. Никулин, кандидат экономических наук;
А.А. Бондарович, кандидат географических наук

К 905 Кулунда: сельское хозяйство и низкоэмиссионные технологии устойчивого землепользования : коллективная монография / под науч. ред. В.И. Беляева, М.М. Силантьевой, А.М. Никулина, А.А. Бондаровича. – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2021. – 619 с.

ISBN 978-5-7904-2593-6.

Цель монографии – рассмотреть эволюцию ландшафта Кулундинской степи под воздействием человека, а также предложить технологические решения в области земледелия, которые позволят предотвратить эмиссию парниковых газов и одновременно адаптировать растениеводство к климатическим изменениям. В монографии затронуты не только вопросы физико-географических особенностей Кулундинской степи и истории ее освоения, но также проведен глубокий анализ социально-экономических факторов землепользования. Изучены особенности внедрения на примере модельных фермерских хозяйств низкоэмиссионных технологий земледелия. Интересен опыт по разработке и внедрению платформы, позволяющей заинтересованным сторонам осуществлять поддержку методов землепользования и управления почвами, адаптированных к местным условиям и климату.

Монография рассчитана на географов, климатологов, ботаников, почвоведов, социологов, агрономов, экономистов, политологов, фермеров, а также государственных служащих, курирующих вопросы реализации экологической и аграрной политики в России и Казахстане. Издание будет полезно студентам, а также тем, кто интересуется вопросами устойчивого и ресурсосберегающего землепользования на фоне глобальных изменений климата.

УДК 911.2(571.150):332.3
ББК 26.829(2Рос-4Алт) + 65.281

Издание опубликовано в рамках Программы развития Алтайского государственного университета на 2021–2030 гг. при поддержке Приоритет 2030. Стратегический проект «Инновационные технологические решения и продукты для устойчивого развития сельского хозяйства – АгроБиоТех» и германо-российского проекта «КУЛУНДА - Как предотвратить глобальный синдром «dust bowl» – «пыльных бурь»?» при финансировании Федерального министерства образования и научных исследований Германии (BMBWF; FKZ 01LL0905D).

ISBN978-5-7904-2593-6

© Оформление. Издательство Алтайского государственного университета, 2021

Глава 11. Физические свойства почвы и эрозия

Г. Шмидт, П. Иллигер, А.Е. Кудрявцев, Н. Бишофф,
А.А. Бондарович, Н.А. Кожанов, Н.В. Рудев

Аннотация. Черноземы и каштановые почвы широко распространены и используются для сельскохозяйственного производства в Алтайском крае. Физические свойства этих почв благоприятны для сельского хозяйства. Накопление гумуса является важным фактором для развития стабильных агрегатов почвы в процессе ее развития. Возникающие в результате этого почвы характеризуются благоприятным водным балансом, хорошей аэрацией и устойчивостью к эрозии. Из-за превращения естественной степи в пашню естественные физические свойства почвы нарушаются. Ухудшаются и другие свойства почвы (органическое вещество почвы), что влияет на ее продуктивность. Механическое напряжение можно уменьшить, применяя методы адаптированного управления почвой, что, в свою очередь, улучшает физико-химические свойства почвы и ее плодородие.

Ключевые слова: эрозия почвы, стабильность почвенных агрегатов, твердость почвы.

Введение

В процессе почвенного генезиса формируются свойства почвы, которые определяют ее плодородие, влияют на процессы деградации и определяют пригодность почвы для сельскохозяйственного производства. Как описано в главе 5 данной монографии, чернозем, а также темные и светлые каштановые почвы являются доминирующими на территории исследования (рис. 11.1), и эти же типы активно используются в сельском хозяйстве (Meinel, 2002; Frühauf, Meinel, 2014). Локальные морфологические и гидрологические характеристики определили появление различных модификаций типов почв (Базилевич, Шавригин, 1959; Почвоведение, 1988). Процесс подзолообразования широко развит под участками леса, которые распро-

странены в регионе. Солонцы развивались локально и приурочены, как правило, к морфологическим западинам с близко расположенными грунтовыми водами (Почвы..., 1959; ФАО, 2007). Территории с такими почвами, как правило, используются как пастбища.

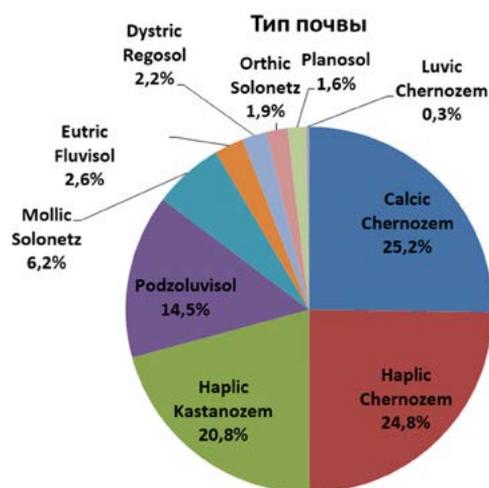


Рис. 11.1. Распределение почв в исследуемом районе (FAO, 2007)

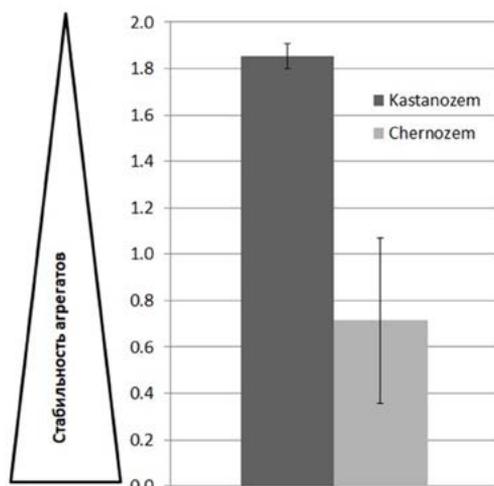


Рис. 11.2. Стабильность почвенных агрегатов черноземов (Chernozem) и каштановых почв (Kastanozem) в естественных условиях (по оси ординат – MWD (англ. mean weight diameter, русс. средний размер диаметра фракции))

Материнский материал на всей площади исследования состоит из эоловых отложений с высоким содержанием ила (45–70%) и мелкозернистого песка (10–40%). Эти отложения сильно подвержены эрозии. Благодаря луговой растительности и региональному климату большое количество органического вещества смешивается с отложениями и гумифицируется в процессе педогенеза. Минерализация органического вещества происходит очень медленно из-за сухого и холодного климата, что приводит к накоплению гумуса, который, в свою очередь, способствует образованию стабильных агрегатов почвы (Illiger et al., 2014). В результате этого черноземы и каштановые почвы достаточно устойчивы к эрозии под воздействием ветра и воды. Различия в эрозионной стойкости между каштановыми почвами и чернозёмами обусловлены различным содержанием гумуса, который является определяющим фактором формирования стабильных агрегатов почвы (см. 11.2). Устойчивость почвенных агрегатов от лесостепи к сухой степи уменьшается, соответственно, возрастает восприимчивость к эрозии (Базилевич, Шавригин, 1959; Bischoff et al., 2016; Illiger et al., 2014) (рис. 11.2).

Несмотря на один и тот же материнский материал для почвенного генезиса, черноземы демонстрируют меньшую объемную плотность, чем каштановые почвы (рис. 11.3). Это вызвано более высоким содержанием органического вещества почвы в черноземе. На объемную плотность в основном влияют глубина и интенсивность обработки почвы. Например, «минимальная» (англ. Mini-Tillage) или «нулевая» (англ. No-Tillage) обработки почвы формируют более высокую объемную плотность на поверхности, чем при обычной обработке почвы (англ. Conventional-Tillage) (Hill, Cruse, 1985; Grant, Lafond, 1993; Unger, Jones, 1998).

В природных условиях сибирской степи эрозионные процессы протекают очень медленно, динамично же проявляют себя локально. Луговая и степная растительность обеспечивает естественную защиту от эрозии. Тип и интенсивность эрозии зависят также от климата, который изменяется в направлении северо-восток–юго-запад. Осадков выпадает с 500–600 мм на северо-востоке до 250–300 мм на юго-западе (Schmidt et al., 2016). Годовое изменение температуры увеличивается с северо-востока на юго-запад. Из-за региональных климатических различий в лесостепи преобладает водная эрозия, а в сухой степи – ветровая (рис. 11.4).

11.1. Влияние управления сельскохозяйственными землями на физические свойства почвы

Распашка целинных земель стала началом серьезных изменений, которые привели к значительному преобразованию почвы в результате неуклонно растущей интенсификации ее использования (Meinel, 2002; Frühauf, Meinel, 2014). Особенно пострадали физические свойства почвы. Начало обработки почвы вызывает механические напряжения, изменяющие ее структуру, а затем и другие важные физические свойства почвы, такие как объемная плотность и стабильность агрегатов, что приводит к отрицательным трансформациям. Завершением этой цепной реакции являются экстремальные процессы деградации почвы в результате ветровой и водной эрозии.

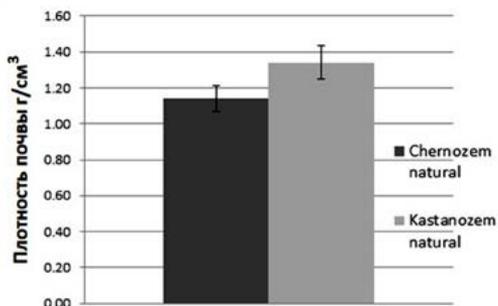


Рис. 11.3: Объемная плотность черноземов (Chernozem) и каштановых почв (Kastanozem) в естественных условиях (natural) в Алтайском крае



Рис. 11.4: Ветровая эрозия в сухой степи (Meinel, 2002)

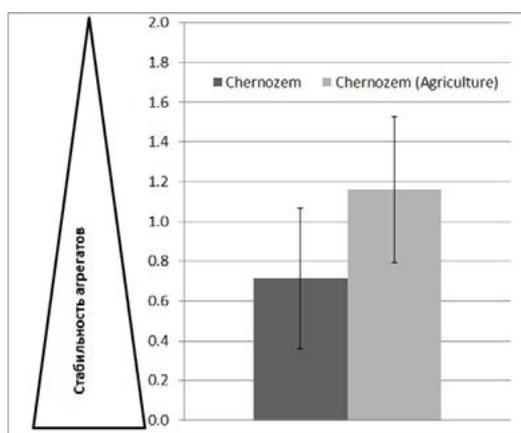


Рис. 11.5. Стабильность почвенных агрегатов черноземов в естественных условиях (Chernozem) и используемых как пашня (Chernozem Agriculture) (по оси ординат – MWD (англ. mean weight diameter, русс. средний размер диаметра фракции))

Процессы деградации почвы (среди них эрозия – наиболее экстремальная) ускоряются с началом возделывания степных почв в XVIII в., вызванные преобразованием естественных степных почв и регулярными механическими напряжениями, возникающими в результате глубокой обработки почвы. Сначала разрушается защитный растительный покров и устойчивость почвенных агрегатов (рис. 11.4). Удаление биомассы при сборе урожая приводит к уменьшению накопления органического вещества в почвах. Повторное разрушение агрегатов почвы приводит к повышенной восприимчивости почв

к эрозии. Кроме того, находясь длительное время в течение года без растительного покрова, почвы остаются незащищенными от экзогенных сил. Механическое напряжение почв также вызывает изменение их плотности и потерю гумуса. Разрушение гумуса приводит к дальнейшему снижению устойчивости агрегатов, так как гумус является важным фактором формирования стабильных агрегатов почвы. Потенциал почвенного водоудержания уменьшается, а восприимчивость к эрозии еще больше возрастает (рис. 11.5).

При традиционной отвальной вспашке плугом плотность почвы уменьшается в верхней части вспаханного горизонта из-за рыхления почвенного материала, а в результате давления рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов увеличивается на определенной глубине (Dammann et al., 2011; Grunwald et al., 2016). Механизм изменений достаточно хорошо описан на основании результатов многолетних испытаний влияния различной интенсивности обработки на физические свойства почвы (Kahlon et al., 2013). На рисунке 11.6 а,б показаны вертикальные изменения твердости почв на залежных участках и глубокой обработки почвы. Твердость почвы указывает на различия в плотности в профиле почвы, что позволяет сделать выводы о том, как влияет обработка на физические свойства почвы. Анализировались и сравнивались результаты расчетов мест «залежь» и глубокой обработки почв. В данном исследовании «залежь» – это участки, которые были однажды распашаны во время целинной кампании и далее не использовались в обороте, в результате сукцессий восстановились до естественного состояния.

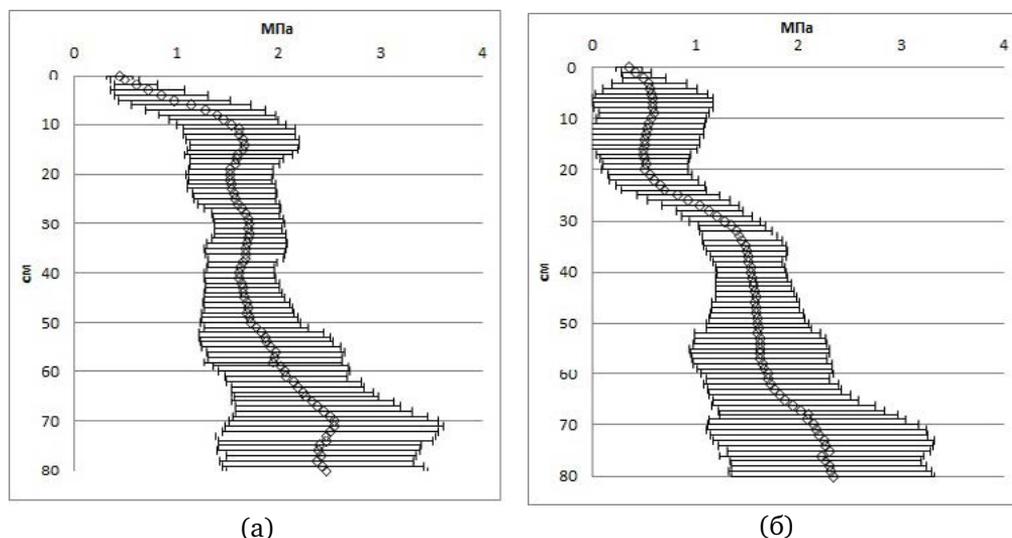


Рис. 11.6. Твердость черноземов (в мегапаскалях, МПа) «залежь» (а) и при глубокой обработке почвы (б) (измерено при помощи пенетрологгера фирмы «Eijkelkamp»)

Данные, представленные на рисунке 11.6, типичны для черноземов подзоны сухой степи и зоны степи Алтайского края. Так называемая залежь,

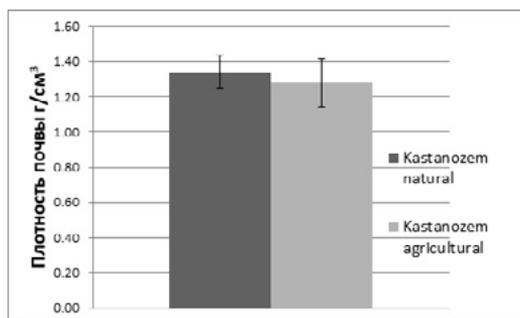


Рис. 11.7. Объемная плотность естественных (natural) каштановых почв (Kastanozem) и используемых как пашня (Kastanozem agricultural) в Алтайском крае

стабильных агрегатов почвы. Ниже следует зона уплотнения, где плотность почвы резко возрастает – это так называемая плужная подошва. Плужная подошва формирует границу, через которую трудно проникать корням растений и почвенным организмам.

Изменения почвы, вызванные обработкой, также отражаются на объемной плотности. Из-за отсутствия механических нагрузок, постоянного растительного покрова и большего количества органического вещества каштановые почвы под пастбищами имеют несколько более высокую объемную плотность (рис. 11.7), поэтому более устойчивы к эрозии.

Разрушение почвенных агрегатов и снижение объемной плотности приводит к увеличению поверхности, подверженной воздействию экзогенных сил с множеством последствий для физических, химических и биологических процессов в почве. Подача кислорода увеличивается, разрушение гумуса ускоряется, а поверхности для воздействия увеличивается и становится восприимчивой к выветриванию (Carter, 1990; Lal, 1993; Kandeler et al., 1999; Dexter 2004; McVay et al., 2005). С почвенно-физической точки зрения наиболее значительными изменениями являются разрушение агрегатов и вытекающее из этого увеличение поверхности, вызванное механическими напряжениями. Возникающая в результате этого слабая адгезия компонентов почвы увеличивает подверженность эрозии. Таким образом, компоненты почвы легко удаляются из структуры почвы и вытесняются эрозией.

11.2. Степень эрозии и последствия эрозии почвы

Эрозионные процессы в Алтайском крае зависят от почвенно-климатических условий. Алтайский край разделен на различные агроэкологические зоны. Выделение таких зон имеет давние традиции в российских аграрных

однажды распаханная во время освоения целины почва, демонстрирует повышенную твердость первые 10 см, которая потом практически не изменится до глубины 50 см, затем твердость плавно нарастает до глубины 70 см. Почва, подвергаемая глубокой обработке, имеет пониженную твердость и начинает нарастать на глубине около 25 см. Регулярная обработка нарушает структуру почвы на этой глубине и препятствует образованию

исследованиях, подобное районирование разрабатывалось с целью оптимизации региональной дифференциации аграрного производства (Bulgakov et al., 2016). В таблице 11.1 приведены данные по видам эрозии и их распространённости на сельскохозяйственных угодьях различных агроэкологических зон Алтайского края (Беляев, Вольнов, 2010).

Таблица 11.1

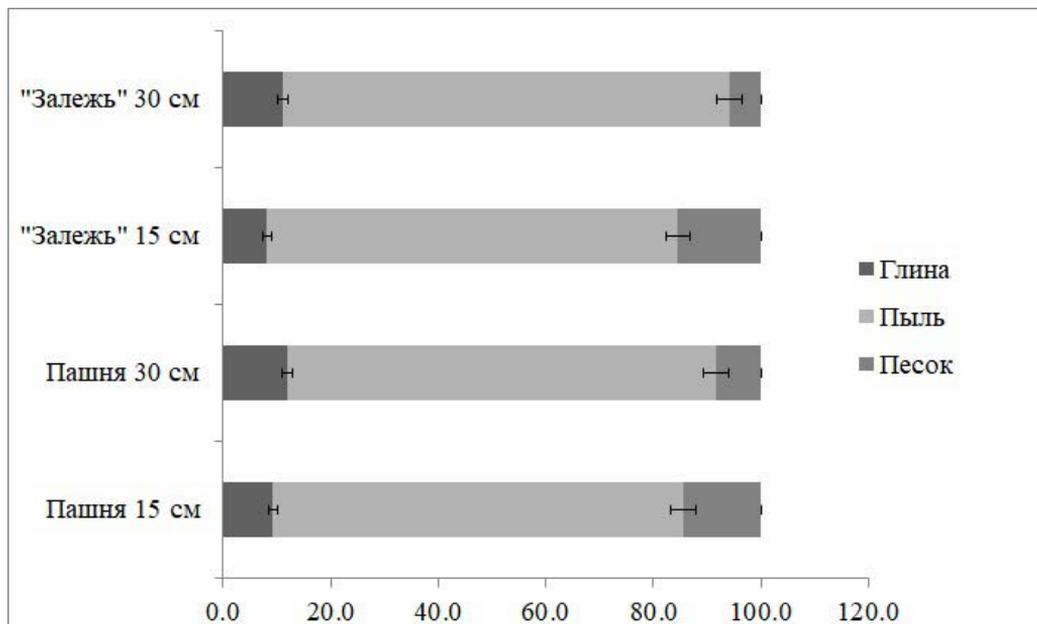
Сельскохозяйственные земли и эрозия почв в различных агроэкологических зонах Алтайского края

Показатели	Агроэкологические зоны		
	Кулундинская	Приалейская	Приобская
Площадь пашни, тыс. га	2166,3	1171,2	1243,8
Осадки за год (I-XII), мм	230-350	330-435	324-450
Гумус в пахотном слое почвы, %	2,5-5,1	4,0-5,1	5,2-5,6
Ветровая эрозия, %	91,8	78,8	50,9
Водная эрозия, %	0,7	27,9	31,9

Каштановые почвы более подвержены ветровой эрозии, чем черноземы, из-за меньшего количества органического вещества, следовательно, меньшей устойчивости агрегатов. Для защиты каштановых почв в сухой степи используются ветрозащитные лесные полосы, но они не всегда эффективны из-за крупных полей площадью от 50 до 200 га (Meinel, 2002; Meyer et al., 2008; Theisel, 2013). Высота деревьев слишком мала по отношению к большим расстояниям между ветровыми полосами, чтобы ветрозащитные полосы могли быть эффективными. Поэтому большие площади поля подвергаются воздействию ветра. Согласно исследованию, только 22% территорий, подверженных риску ветровой эрозии, защищены ветрозащитными лесными полосами (Theisel, 2013).

Для сравнения, меньшая область находится под риском водной эрозии, которая проявляется в большей степени в лесостепи с ее более значительными осадками (Беляев, 2015; Theisel, 2013). Здесь более 30% сельскохозяйственных земель подвержены водной эрозии. Водная эрозия в сухой степи проявляется себя наиболее ощутимо только весной, во время быстрого таяния снега на еще мерзлых землях. В результате эрозионных процессов в ландшафте возникают различные формы рельефа. Последствия водной эрозии более ощутимы, чем ветровой, и довольно легко диагностируются в рельефе – это промоины и овраги. Подветренная сторона ветрозащитных лесных полос является зоной накопления для выдуваемого ветром почвенного материала. Более того, продувка приводит к разделению по размеру зерен в верхних слоях почвы в местах воздействия (рис. 11.8).

(а)



(б)

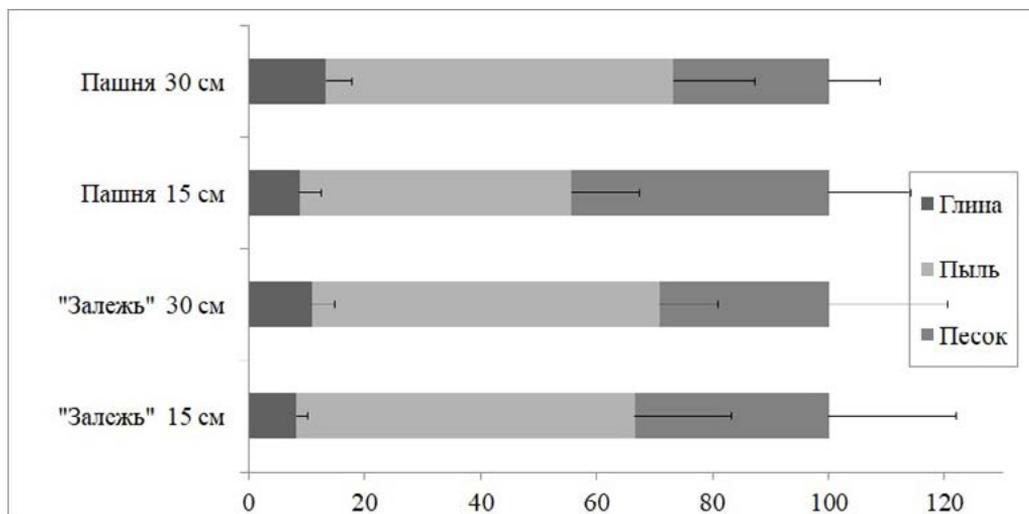


Рис. 11.8. Распределение частиц различной размерности на поле в зависимости от расстояния до ветрозащитной лесной полосы залежи и пашни: а) черноземы; б) каштановые почвы

На рисунке 11.8 четко показан результат дестабилизации почвы, вызванной постоянными механическими напряжениями. Верхние 15 см пахотных почв имеют большее количество песка, чем верхние слои почв под пастбищами. Эта разница не отмечается на глубине 30 см. Накопление песка

в верхнем слое почвы происходит в результате ветровой и водной эрозии или вымывания преобладающих минеральных илов и органических веществ. Этот процесс в большей степени влияет на каштановые почвы, чем на черноземы. Накопление песка отрицательно сказывается на водоудерживающей способности и доступности питательных веществ для растений, что является проблемой, касающейся защиты почвы, сельскохозяйственного производства и аспектов смягчения последствий изменения климата (Mikheeva, 2010).

11.3. Варианты методов устойчивого землепользования для сокращения масштабов эрозии

Однако эрозионные процессы и их негативные последствия возможно предотвратить, используя адаптированные методы управления почвой. В частности, ожидается, что снижение интенсивности и частоты обработки почвы сведет к минимуму механическую нагрузку на почву. Примеры твердости почвы и распределения частиц показывают, что применение адаптивных методов управления почвой, таких как «минимальная обработка» или «нулевая обработка» (прямой посев), значительно улучшаются физические свойства почвы.

В рамках многолетних полевых экспериментов были испытаны различные интенсивные методы для анализа и сравнения влияния обработки почвы на физические свойства почвы. После всего лишь трех лет нулевой обработки верхние слои почвы медленно стабилизировались, а значения по твердости стали сравнимы с показателями по фону «залежь» (рис. 11.9).

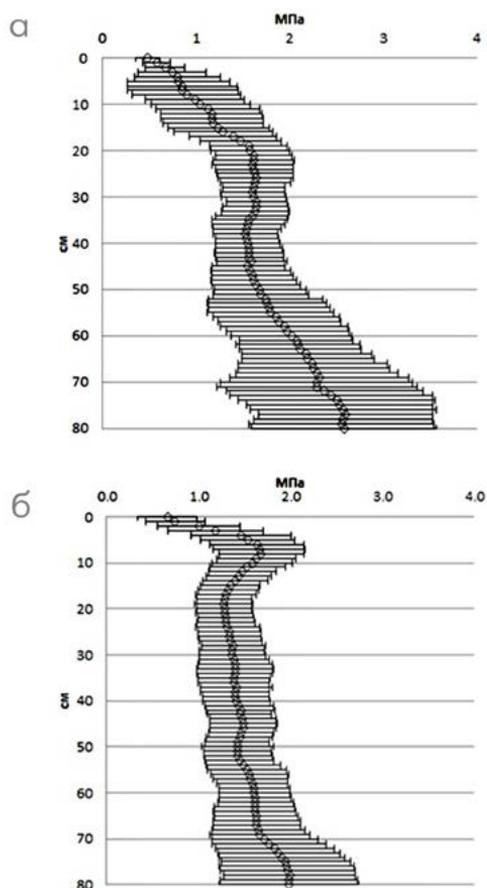


Рис. 11.9: Твердость черноземов под пастбищем (а) и «нулевой обработкой» (б)

Результаты также показывают положительное влияние на стабильность агрегатов, объемную плотность и гранулометрический состав, но изменения были менее выражены, чем изменения твердости почв, что можно объяснить коротким временем проведения экспериментов. Из-за короткого времени наблюдения, составляющего 4 года, текущие данные не позволяют сделать детальных выводов относительно улучшения физических свойств почвы с помощью адаптированных методов управления почвой в регионе.

Выводы

Естественный природный ход процессов в почвах Алтайского края был нарушен в период целинной кампании середины 1950-х гг. В результате механического воздействия глубокой обработки в первую очередь пострадала структура почв. Изменилась стабильность агрегатов, произошло увеличение содержания песчаных фракций в верхних почвенных горизонтах, что привело к снижению аэрации, водоудерживающей и водоподъемной способности почв. С физической точки зрения самым тяжелым последствием механических нагрузок является разрушение стабильных агрегатов почвы и, как следствие, повышение потенциала эрозионной опасности. Результаты длительных полевых испытаний проекта показывают, что структуру почвы можно стабилизировать за счет снижения интенсивности обработки.

Благодарность

Глава основана на исследованиях, проведенных в рамках российско-германского проекта сотрудничества «Кулунда» (KULUNDA) при финансовой поддержке Федерального министерства образования и научных исследований Германии (BMBF; FKZ 01LL0905D). Мы высоко ценим сотрудничество со всеми немецкими и российскими учреждениями-партнерами. Особую благодарность мы хотели бы выразить всем фермерам Алтайского края, которые оказали нам поддержку, за их гостеприимство.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Алтайского края в рамках научного проекта № 19-45-220011 р_а «Реакция полезационных лесных полос сухостепной зоны Алтайского края на изменения климата».

Библиографический список

Базилевич Н.И. Почвы каштановой зоны сухой степи // Почвы Алтайского края. М. : Изд-во АН СССР, 1959. С. 31–46.

Базилевич Н.И., Шаврыгин П.И. Почвы черноземной зоны засушливой, умеренно засушливой и колючей степи // Почвы Алтайского края. М. : Изд-во

АН СССР, 1959. С. 46–66.

Беляев В.И., Вольнов В.В. Ресурсосберегающие технологии возделывания зерновых культур в Алтайском крае: монография. Барнаул : Изд-во АГАУ, 2010. 178 с.

Беляев В.И. Рациональные параметры технологии «no-till» и прямого посева при возделывании сельскохозяйственных культур в Алтайском крае // Вестник Алтайской науки. 2015. № 1. С. 7–12.

Почвоведение : учебник : 2 ч. / под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1: Почва и почвообразование / Г.Д. Белицина, В.Д. Васильевская, Л.А. Гришина и др. М. : Высш. шк., 1988. 400 с.

Почвы Алтайского края / АН СССР ; Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1959. 382 с.

Bischoff N., Mikutta R., Shibistova O., Puzanov A.V., Reichert E., Silanteva M.M., Grebennikova A., Schaarschmidt F., Heinicke S., Guggenberger G. (2016) Land-use change under different climatic conditions: consequences for organic matter and microbial communities in Siberian steppe soils. *Agr Ecosyst Environ* 235. P. 253–264.

Bulgakov D.S, Rukhovich D.I., Shishkonakova E.A., Vil'chevskaya E.V. (2016) Separation of agroclimatic areas for optimal crop growing within the framework of the natural–Agricultural Zoning of Russia. *Eurasian Soil Sci* 49(9). P. 1049–1060.

Carter M.R. (1990) Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can J Soil Sci* 70(3). P. 425–433.

Dammann S., Meinel T., Beljaev V.I., Frühauf M. (2011) Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden auf Bodenwasserhaushalt und Pflanzenproduktion in Trockengebieten. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*. 32(33). P. 33–48.

Dexter A.R. (2004) Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120(3–4). P. 201–214.

FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007) Digital soil map of the world. Version: 3.6. 1:5.000.000. ESRI-shp-Format. <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>. Accessed 14 March 2018.

Frühauf M., Meinel T. (2014) Ökosystemkonversion in den temperierten Grasländern Südwestsibiriens: Steuerfaktoren, Etappen und Geoökologische Konsequenzen. *Geoöko* 35(1–2). P. 5–38.

Grant C.A., Lafond G.P. (1993) The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Can J Soil Sci* 73(2). P. 223–232.

Grunwald L.C., Belyaev V.I., Hamann M., Illiger P., Stephan E., Bischoff N., Rudev N.V., Kozhanov N.A., Schmidt G., Frühauf M., Meinel T. (2016) Modern cropping systems and technologies for soil conservation in siberian agriculture. In: Mueller L, Sheudshen A.K., Eulenstein F. (eds) *Novel methods for monitoring*

- and managing land and water resources in Siberia. Springer, Cham. P. 681–715.
- Hill R.L., Cruse R.M. (1985) Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. *Soil Sci Soc Am J* 49(5). P. 1270–1273.
- Illiger P., Frühauf M., Schmidt G., Meinel T., Belyaev V.I., Silanteva M.M., Kasarjyan M. (2014) Ökosystemkonversion und ihre Folgen Bezüglich der Kohlenstoffsenken-Funktion in der westsibirischen Kulundasteppe. *BfN-Skripten* 373. P. 300–319.
- Kandeler E., Tschirko D., Spiegel H. (1999) Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralization and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biol Fertil Soils* 28(4). P. 343–351.
- Kahlon M.S., Lal R., Ann-Varughese M. (2013) Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil Tillage Res* 126. P. 151–158.
- Lal R. (1993) Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil and Tillage Research* 28(1–4). P. 1–8.
- McVay K.A., Budde J.A., Fabrizzi K., Mikha M.M., Rice C.W., Schlegel A.J., Peterson D.E., Sweeney D.W., Thompson C. (2005) Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Sci Soc Am J* 70(2). P. 434–438.
- Meinel, T. (2002). Die geökologischen Folgewirkungen der Steppenumbrüche in den 50er Jahren in Westsibirien. Ein Beitrag für zukünftige Nutzungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung der Winderosion. Dissertation. Halle-Wittenberg: Martin Luther University.
- Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A. (2008) Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia. *Arch Agron Soil Sci* 54. P. 585–603.
- Mikheeva I.V. (2010) Changes in the probability distributions of particle size fractions in chestnut soils of the Kulunda Steppe under the effect of natural and anthropogenic factors. *Eurasian Soil Sci* 43(12). P. 1351–1361.
- Schmidt G., Bondarovich A.A., Scherbinin V.V., Ponkina E.V., Harlamova N.F., Matsyura A.V., Stephan E., Illiger P., Rudev N.V., Kozhanov N.A. (2016) Results of operation of the international agricultural–meteorological and soil–hydrological monitoring network in the Kulunda plain (south of Western Siberia, 2013–2015). *Acta Biologica Sibirica* 2. P. 89–102.
- Theisel T. (2013) Entwicklung übertragbarer Kartierungsverfahren zur automatisierten Ableitung von Bodendegradationsprozessen in einem semi-ariden Steppen-Ökosystem. Master's Thesis, Friedrich Schiller University Jena (неопубликовано).
- Unger P.W., Jones O.R. (1998) Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil Tillage Res* 45(1–2). P. 39–57.