

на правах рукописи

Сорокин Алексей Сергеевич

**Проявления признаков уплотнения разного генезиса в почвах степной
зоны (на примере юга Европейской территории России)**

Специальность 03.02.13-почвоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва

2016

Работа выполнена на кафедре географии почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель:

Куст Герман Станиславович, доктор биологических наук, заведующий кафедрой эрозии и охраны почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Официальные оппоненты:

Мазиров Михаил Арнольдович, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой земледелия и методики опытного дела факультета агрономии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Ковда Ирина Викторовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела географии и эволюции почв Института географии РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное учреждение науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук.

Защита состоится «17» мая 2016 г. в 15 час. 30 мин. в аудитории М-2 на заседании диссертационного совета Д 501.001.57 при МГУ имени М.В. Ломоносова на факультете почвоведения по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба присылать по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения. Факс: (495) 939-29-47; (495) 939-21-47.

Ученый секретарь
диссертационного совета:

Алла Сергеевна Никифорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из процессов деградации почв в степной зоне можно назвать уплотнение почв. Однако, в условиях агрогенеза почв выявление специфики формирования уплотненных подпахотных горизонтов нередко вызывает затруднение, а причины уплотнения горизонтов не могут быть четко определены, что в свою очередь затрудняет выбор необходимых агротехнических приемов обработки уплотненных почв. По сути, под уплотнением понимают «процесс уменьшения порозности не насыщенных водой почв под влиянием эффективного давления за счет уменьшения воздухоносной порозности в конкретных почвенных условиях, прежде всего, гранулометрического состава и влажности» (Изменение агрофизических свойств почв, 1990). Уплотнение почв является полигенетическим процессом, обусловленным антропогенными и природными явлениями. Проблеме прямого и косвенного антропогенного воздействия сельскохозяйственной деятельности на разные типы почв степной зоны посвящено много работ (например, Ачканов А.Я., Николаева С.А., 1999; Бондарев А.Г., Кузнецова И.В. и Сапожников П.М., 1994; Медведев В.В., 2011). Как известно, уплотнение почв в степной зоне в естественных условиях может быть вызвано такими процессами как слитогенез и осолонцевание (Ковда И.В., 2004; Куст Г.С., 1989; Слитоземы и слитые почвы, 1990; Хитров Н.Б., 2003). Многие почвы с признаками слитогенеза и осолонцевания, вовлеченные в пахотное земледелие, не имеют полного набора соответствующих диагностических признаков, и их зачастую относят к агроуплотненным, и наоборот.

Целью настоящих исследований явилось установить специфику формирования уплотнённых горизонтов в агрогенных почвах юга степной зоны Европейской территории России (ЕТР).

В задачи исследований входило:

1. Выявить особенности строения профиля почв, учитывая их положение в рельефе.
2. Выявить и диагностировать признаки, связанные с агроуплотнением, осолонцеванием и слитогенезом.
3. Описать особенности морфологических, физических, физико-химических и химических свойств отдельных горизонтов почв, обладающих признаками уплотнения различного генезиса.
4. Исследовать особенности состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных горизонтов разных типов почв, применяя комплекс морфометрических, микроморфологических и томографических методов.

Научная новизна. На основании изучения состава и строения агрегатов различных агрогенных почв юга степной зоны Европейской территории России показано, что комплекс исследований (от макро до микроуровня) позволяет диагностировать проявления уплотнения, обусловленные разными элементарными почвенными процессами:

осолонцеванием, слитогенезом и механическим (агро-) переуплотнением в орошаемых и богарных условиях. Впервые проведены совместные томографические и микроморфологические исследования агрегатов диаметром от 1 до 2 мм и от 3 до 5 мм из уплотненных горизонтов различных почв. Выявлены дополнительные диагностические признаки процессов осолонцевания: низкие значения видимой на томограммах открытой пористости агрегатов и заполнение существенной части внутрипедных пор подвижным веществом; и слитогенеза: большое количество видимых на томограммах внутриагрегатных тонких пор и низкое количество гумусово-глинистой плазмы во внутрипедной зоне. Показано, что при изучении порового пространства уплотненных горизонтов пахотных почв перспективно сочетание микротомографических и микроморфологических методов.

Практическая значимость. Выявление потенциальной склонности почв к переуплотнению, которая зависит от химического, минералогического и гранулометрического состава, содержания органического вещества, водопрочности структуры; и актуальных проявлений этого переуплотнения, то есть реальных свойств уплотненных горизонтов в конкретных физико-географических условиях позволит точнее прогнозировать развитие процессов деградации и предпринимать адекватные эффективные меры по их предупреждению и мелиорации земель.

Защищаемые положения.

Уплотнение в почвах степной зоны является полигенетическим процессом, обусловленным антропогенными (механическая обработка почв) и природными явлениями (слитизация и осолонцевание).

Генетические различия уплотнения при осолонцевании, слитогенезе и агроуплотнении связаны с особенностями строения порового пространства и заполнения пор агрегатов уплотненных горизонтов, что выявляется только при сопряженных томографических и микроморфологических исследованиях.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены на Международной научной конференции «Ресурсный потенциал почв – основа продовольственной и экологической безопасности России» (Россия, Санкт-Петербург, 2011), II Всероссийской научной конференции «Практическая микротомография» (Москва, 2013), XX Всемирном конгрессе почвоведов (Корея, Чеджу, 2014), Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле (Вена, 2014), Научно-практической конференции «Контроль деградации земель Евразийского региона» (Москва, 2014), Международном конгрессе Евроазиатской Федерации обществ почвоведов (Россия, Сочи, 2015) и на научном докладе на факультете почвоведения МГУ (Москва, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 5 тезисов и 2 статьи в журналах из списка ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 111 страницах компьютерного текста и состоит из введения (5 глав), объектов и методов, результатов и их обсуждения (6 глав), заключения и выводов, списка литературы, включающего 93 источник, из них 14 на английском языке и приложения. Работа проиллюстрирована 14 таблицами и 19 рисунками.

Благодарности: Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.б.н. Кусту Г.С.; старшим коллегам за ценные замечания и рекомендации: д.б.н. Красильникову П.В., д.б.н. Толпешта И.И., д.с.-х.н. Лебедевой М.П., д.с.-х.н. Скворцовой Е.Б., д.с.-х.н. Хитрову Н.Б., к.б.н. Орешниковой Н.В., к.б.н. Прокофьевой Т.В., к.б.н. Розову С.Ю., к.б.н. Стома Г.В., к.б.н. Шварову А.П., к.г.н. Абросимову К.Н., Лебедеву М.А., а также всем сотрудникам кафедры географии почв за внимание и помощь в работе.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Анализ литературы о природе агрогенного и природного уплотнения.
2. Выбор объектов исследования (почв) с признаками уплотнения разной природы.
- 2.1. Выбор и систематизация диагностических признаков (показателей) уплотнения.
- 2.2. Выбор методик исследования.
3. Проведение полевых исследований.
4. Описание уплотненных горизонтов и их особенностей в профиле почв.
5. Проведение лабораторных исследований.
6. Проверка рабочих гипотез о природе уплотнения. Диагностика особенностей уплотнения в разных почвах.
7. Изучение специфики строения и состава агрегатов уплотненных горизонтов.
8. Анализ полученных результатов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования. Выбор объектов для исследования проводился при работе в экспедициях факультета почвоведения МГУ в период с 2007 по 2012 гг. на территории двух субъектов Российской Федерации (Краснодарского края и Саратовской области). Всего было заложено более 40 почвенных разрезов на 13 ключевых участках. Ключевые участки закладывались в виде почвенных микрокатен в пределах отдельных сельскохозяйственных полей так, чтобы в них попали почвы, находящиеся на локальном плакорном участке, склоне и в понижении. Заложение и описание проводилось в засушливый период для того, чтобы исключить влияние увлажнения на морфологические признаки почв.

Объект № 1: «Кубань». Особенностью почвенного покрова этой территории правобережья реки Кубань является широкое участие среди черноземов и луговато-черноземных почв без признаков уплотнения отдельных участков с наличием этих признаков в верхней части гумусовых горизонтов почв. Уплотнение в наибольшей степени проявляется по

понижениям рельефа, но иногда встречается и на относительно возвышенных плакорных участках и склонах, так что говорить о строгой приуроченности уплотненных почв именно к замочаренным участкам нельзя.

Объект № 2: «Маркс». Особенностью почвенного покрова этой территории Заволжья является фрагментарное участие среди южных чернозёмов отдельных участков с признаками уплотнения в верхней части профиля почв, как правило, расположенных в полугидроморфных условиях.

Объект № 3: «Энгельс». Особенностью почвенного покрова этой территории Заволжья является фрагментарное участие среди южных чернозёмов отдельных участков с признаками уплотнения в верхней части профиля почв, как правило расположенных в полугидроморфных условиях. Однако, в отличие от объекта «Маркс» почвенный покров данной территории имеет проградационный характер эволюции при орошении: гумусонакопление, усиление выщелачивания.

Методы исследования. При морфологическом полевом исследовании особое внимание уделяли стратификации и отдельному описанию признаков уплотнения в верхней части профиля: пахотного горизонта, подпахотного горизонта или слоя и нижележащего гумусированного либо срединного горизонта (согласно Классификация и диагностика почв России, 2004). Подтверждение морфологических проявлений уплотнения и дезагрегации почвенной массы верхней части профиля исследованных почв искали в особенностях основных генетически значимых свойствах: исследовали плотность почвы (буровым методом); гранулометрический состав (методом пипетки с пирофосфатной пробоподготовкой); плотность твердой фазы почв (пикнометрическим методом); пористость агрегатов (методом парафинирования), пористость и межагрегатная пористость (расчетным методом); набухание почв нарушенного сложения на ПНГ (методом Васильева); содержание водно-пептизированного ила (ВПИ) («мягким» способом по Горбунову); pH -водный; состав обменных катионов (методом Пфееффера); содержание органического углерода (методом Тюрина).

Для выявления особенностей состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных горизонтов разных типов почв были применены следующие методы исследования: морфометрические (Скворцова Е.Б., 1994); микроморфологические, выполненные по классическим методикам (Stoops G., 2003); томографические, выполненные руководствуясь работами (Герке К.М., Скворцова Е.Б. и Корост Д.В., 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая комплексный характер явлений, для диагностики процесса уплотнения недостаточно одного какого-либо показателя, а необходим комплекс взаимосвязанных показателей: условий и следствий почвообразовательного процесса, взаимодействие которых происходит во времени и отражает процессы, происходящие в почвенном теле (Куст Г.С.,

1985). Для этих целей совокупность возможных характеристических признаков уплотнения целесообразно разделить на такие категории, которые отражали бы потенциальную склонность почв к уплотнению и актуальные проявления этого процесса. Потенциальная склонность зависит от химического, минералогического и гранулометрического состава, содержания органического вещества, водопрочности структуры. Актуальные проявления - это реальные свойства уплотненных горизонтов в конкретных физико-географических условиях, которые могут испытывать сезонные колебательные изменения в процессе уплотнения и разуплотнения почв в результате увлажнения-иссушения и агротехнических мероприятий (Ковда И.В., 1995). Сочетание показателей из этих двух групп признаков, указывающих на потенциальную склонность и отражающих актуальные проявления уплотнения, в свою очередь, может служить комплексным диагностическим критерием (Хитров Н.Б., 2003).

Морфологические особенности почв. Актуальные проявления уплотнения в исследуемых почвах отмечены как в пахотных, так и подпахотных горизонтах. Среди них при морфологическом полевом исследовании почв выделяются такие показатели, как стратификация верхней части профиля почв на (под)горизонты с различиями в структуре и в сложении, и их мощность; сочетание видов структур, качество структуры; плотность и пористость почвы; форма агрегатов, выраженность ребер и граней, характер распространения корней.

Стратификация верхней части профиля в почвах объектов «Кубань» и «Энгельс» выражена в том, что верхняя часть мощной гумусовой толщи (до 120 см) разделена на следующие горизонты: пахотный (Ap), подпахотный (A_{pd}) и собственно гумусовый (A). В отличие от них, почвы объекта «Маркс», имея меньшую мощность гумусовой толщи (до 50 см), стратифицируются по-другому: верхняя часть профиля разделена на горизонты: пахотный (Ap), подпахотный (который может быть, как частью гумусовой толщи (A_{pd}), так и срединным горизонтом (B_d)) и собственно срединный (B) – (согласно Классификация и диагностика почв России, 2004). Наибольший интерес для нас составлял «подпахотный» горизонт, так как его морфологические признаки различались в пределах одной микрокатены, как между объектами исследования, так и для одного объекта. Таким образом, его генезис был неоднозначен – важно было понять каковы основные причины уплотнения: природные, агрогенные или их сочетание.

Проявления уплотнения в исследованных почвах и их горизонтах неодинаковы как в качественном, так и в количественном отношении. Их группировка по характеру и выраженности морфологических признаков уплотнения представлена в табл. 1 (выраженность возрастает в рядах для пахотных горизонтов от уплотненного ореховатого (1a) к переуплотненному монолитному (1в), и для подпахотных горизонтов от уплотненного фрагментарного (2a) к переуплотненному монолитному (2г)).

Таблица 1. Группировка уплотненных горизонтов почв по морфологическим признакам.

Показатель	Группа: индекс, название						
	1а, уплотненный ореховатый	1б, уплотненный глыбистый	1в, переуплотненный монолитный	2а, уплотненный фрагментарный	2б, уплотненный сплошной	2в, переуплотненный сплошной	2г, переуплотненный монолитный
Горизонт	Ap			Apd			
Число образцов в группе, шт. (%)	24 (56%)	10 (23%)	9 (21%)	10 (23%)	6 (14%)	17 (40%)	10 (23%)
Мощность, см	11-25	10-27	20-22	7-10	9-13	11-16	10-20
Структура	комковато- ореховатый	комковато- глыбистый	глыбистый комковато - ореховатый	комковато– крупно- ореховатый	крупно- ореховатый	призмовидно – глыбистый	призмовидно - ореховатый
Твердость	Твердоватый	Твердоватый	Твердый	Твердоватый	Твердоватый	Твердый	Очень твердый (слитой)
Плотность	Плотноваты й	Плотный	Очень плотный	Плотноватый	Плотноватый	Плотный	Очень плотный
Пористость	Много средних и мелких	Много мелких	Средне мелких и тонких	Пористый	Мелкопористый	Мелкопористый	Единичные тонкие
Трещины	Мелкие и крупные	Крупные	Средние и крупные	Единичные транзитные	Средне мелких транзитных	Единичные транзитные	Тонко трещиноватый, единичные транзитные
Корни	Много по всей глубине	Много по всей глубине	Много в первых 10 см, ниже мало крупных	Много корней	Много корней	Мало корней	Редкие корни
Положение в рельефе (в скобках – число образцов данной категории)	Автономное (14), транзитное (10)	Автономное (4), транзитное (2), аккумулятивное (4)	Автономное (1), аккумулятивное (8)	Автономное (5), Транзитное (5)	Автономное (4), транзитное (1), аккумулятивное (1)	Автономное (10), транзитное (6), аккумулятивное (1)	Аккумулятивное (10)

Как видно из представленной табл. 1, в исследованных почвах усиление морфологических признаков уплотнения в основном проявляется в увеличении плотности и твердости, уменьшении количества и размера округлых пор и трещин, увеличении элементов глыбистости и крупной ореховатости в структуре при одновременном усилении резкости граней структурных отдельностей. Мощность горизонтов при этом существенного значения не имеет: яркие признаки уплотнения с равной вероятностью отмечались как в маломощных, и даже фрагментарных горизонтах, так и в более мощных сплошных подпахотных горизонтах. Обращают на себя внимание особенности проявления морфологических признаков уплотнения в пахотных и подпахотных горизонтах в зависимости от положения почв в рельефе: максимально выраженные признаки уплотнения в пахотных и подпахотных горизонтах характерны для почв пониженных элементов рельефа, хотя отмечены и исключения для пахотных горизонтов; почвы с менее выраженными признаками уплотнения не имеют строгой приуроченности к рельефу.

Для проверки генезиса уплотнения с помощью лабораторных исследований были выбраны почвы микрокатен таким образом, чтобы в них отмечались почвы с наиболее ярко выраженными морфологическими признаками уплотнения (согласно табл. 1 – отнесенные к группам 1в, 2в и 2г).

Проверка генезиса уплотнения. Диагностика агроуплотнения. Плотность почвы, как отмечал Бондарев А.Г. (1990), справедливо считается одним из важнейших показателей при определении агроуплотнения, являясь в значительной мере интегральным показателем физического состояния почвы. При этом доминирующей в научной литературе точкой зрения является то, что воздействие техники приводит к увеличению плотности на всех почвах (Переуплотнение пахотных почв: причины, следствия, пути уменьшения, 1987). Однако потенциально более подверженными уплотнению являются почвы суглинистого и глинистого гранулометрического состава, содержание гумуса в которых невелико – от 2 до 3% и менее (Физические и водно-физические свойства почв, 2002).

Для того чтобы диагностировать наличие агроуплотнения и подтвердить отмеченные морфологические проявления уплотнения были поставлены следующие подзадачи: а) изучить определенные физико-механические (плотность и гранулометрический состав) и химические (содержание гумуса) свойства исследованных почв; б) выяснить характер распределения выбранных показателей по профилю почв; в) сопоставить отмеченные морфологические особенности с изученными показателями; г) показать наличие агроуплотнения в исследованных почвах; д) указать особенности, при наличии, связанные с признаками уплотнения иного генезиса (осолонцевания и слитогенеза).

Гранулометрический состав. Исследуемые почвы объекта «Кубань» определены как тяжелосуглинистые и легкоглинистые. Содержание глины наблюдается в пределах от 55 до 61% (рис. 1). В составе фракций преобладает

илистая (от 33 до 38%) и крупнопылевая (от 27 до 35%). Обращает на себя внимание относительно меньшее содержание ила в верхних горизонтах почв автономных и транзитных ландшафтов, что мы связываем с активным выдуванием тонких фракций дефляционными процессами. В аккумулятивных ландшафтах наблюдается обратная картина. Вместе с тем, достоверных различий исследуемых горизонтов по гранулометрическому составу не обнаруживается.

Почвы объекта «Маркс» имеют средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав – содержание физической глины колеблется от 38 до 50% (рис. 2). Для них свойственно преобладание тех же двух фракций: ила (от 21 до 36%) и крупной пыли (от 23 до 35%). Наблюдается утяжеление гранулометрического состава вниз по профилю: содержание физической глины и ила увеличивается в срединных горизонтах по сравнению с пахотными, что вероятнее всего вызвано с изначально более тяжелым их составом, а также с элювиально-иллювиальной дифференциацией профиля. Так, содержание физической глины возрастает на 10%, а доля илистой фракции от 5 до 11%. Также наблюдается утяжеление гранулометрического состава вниз по склону в пахотном и срединном горизонтах - содержание физической глины возрастает на 4-6%, а доля илистой фракции от 1 до 3%.

Практически все почвы объекта «Энгельс» характеризуются среднесуглинистым гранулометрическим составом, также встречаются легкосуглинистые. Содержание физической глины колеблется от 29 до 36% (рис. 3). Верхние горизонты почв не имеют существенных различий по содержанию физической глины. Содержание илистой фракции, как правило, снижено в пахотном горизонте по сравнению с подпахотным на 1-4%, что вероятнее всего связано, как и на объекте «Кубань», с выдуванием тонких фракций. В целом содержание илистой фракции колеблется от 19 до 23.6%.

По содержанию гумуса (рис. 1, 2 и 3) большая часть почв относится к грации слабогумусированных (менее 4%), и только некоторые собственно гумусовые горизонты объекта «Кубань» можно считать малогумусными (от 4 до 6%). Как правило, содержание гумуса в пахотных горизонтах ниже, чем в нижележащих непашотных горизонтах гумусовой толщи (объекты «Кубань», «Энгельс» и частично «Маркс»). На объекте «Маркс» его содержание резко уменьшается при переходе к срединным горизонтам почв.

Таким образом, верхние горизонты исследованных объектов имеют потенциальную склонность к уплотнению, так как обладают суглинистым и глинистым гранулометрическим составом, а по содержанию гумуса - слабогумусированными. Также обращают на себя внимание высокие значения содержания илистой фракции (более 30%) в подпахотных горизонтах на объектах «Кубань» и на плакоре и в понижении на объекте «Маркс». Мировая коррелятивная база рассматривает содержание ила в 30% или более в пределах 15-сантиметровой толщи или более в качестве обязательного условия для диагностики протопертиковых горизонтов (IUSS Working Group WRB, 2014), в нашем понимании – имеют к ним потенциальную склонность.

Плотность почв (показатель актуального проявления уплотнения) объекта «Кубань», определенная в полевых условиях буровым методом, для пахотного горизонта варьирует от 1.3 до 1.5 г/см³, для подпахотного горизонта – от 1.4 до 1.5 г/см³, а для нижележащего горизонта А – от 1.3 до 1.4 г/см³ (рис. 1). Указанные значения не позволяют говорить о статистически достоверных различиях пахотных и подпахотных горизонтов по этому показателю, хотя морфологически вторые характеризуются как более плотные. Определенная тенденция также связана с положением почв в рельефе: почвы, занимающие аккумулятивные позиции, являются, как правило, наиболее плотными. Этот результат может быть связан с усилением эффекта уплотнения от механического воздействия на почвы в условиях пониженной несущей способности грунтов во влажном состоянии. Плотность почв объекта «Маркс» для пахотного горизонта варьирует от 1.2 до 1.3 г/см³, для подпахотных (гумусовый – от 1.3 до 1.4 г/см³, а срединные 1.4 г/см³), а для нижележащего горизонта – 1.4 г/см³ (рис. 2). Указанные значения позволяют говорить о тенденции увеличения плотности по направлению в глубь профиля от пахотных к срединным горизонтам. На объекте «Энгельс» подпахотный горизонт имеет плотность 1.4 г/см³, обычно располагается на глубине от 20 до 30 см и является самым плотным горизонтом в пределах гумусированной толщи (рис. 3). Пахотные горизонты почв имеют плотность от 1.2 до 1.3 г/см³.

Таким образом, были подтверждены особенности уплотнения почв, установленные на основании морфологических признаков. По интегральному показателю физического состояния почвы – «плотности» - все исследованные почвы, за редким исключением, уплотнены с поверхности. Пахотные горизонты имеют плотное сложение, и их значения плотности соответствуют нижней границе переуплотнения - для почв степного почвообразования она составляет от 1.3 до 1.4 г/см³ (Деграция и охрана почв, 2002). Для подпахотных горизонтов дела обстоят хуже: так, например, гумусовые подпахотные горизонты объекта «Кубань» нужно отнести к градации переуплотненных (1.4-1.5 г/см³), то есть их плотность достигает настолько высоких значений, что даже при максимальном саморазуплотнении в результате набухания/усадки оптимальная величина плотности не может быть достигнута.

Важно отметить, что некоторые особенности проявления морфологических признаков уплотнения, а также гранулометрического состава не позволили на ряде объектов связать обнаруженные особенности уплотненных горизонтов исключительно с агроуплотнением, вызванным воздействием тяжелой техники (например, образование «подплужной подошвы») или регулярной распашкой. На это указывают следующие особенности, выявленные при полевых и первичных лабораторных исследованиях: на объекте «Кубань» а) нижняя граница монолитного «слитого» подпахотного горизонта может опускаться до 40–45 см при мощности пахотного слоя до 22–24 см, то есть мощность уплотненного слоя

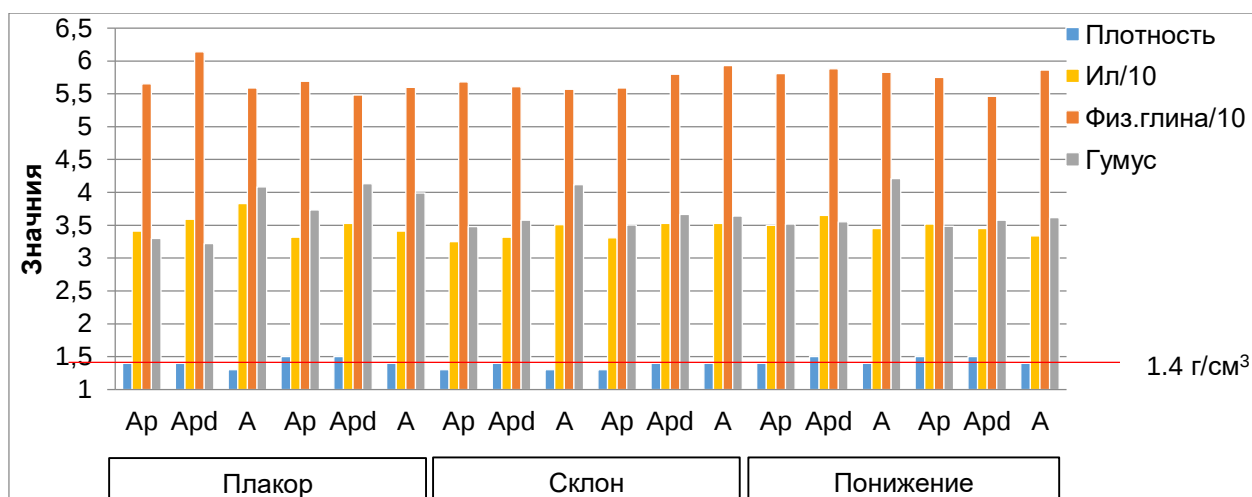


Рисунок 1. Некоторые физико-механические и химические свойства почв с яркими морфологическими признаками уплотнения. «Кубань».

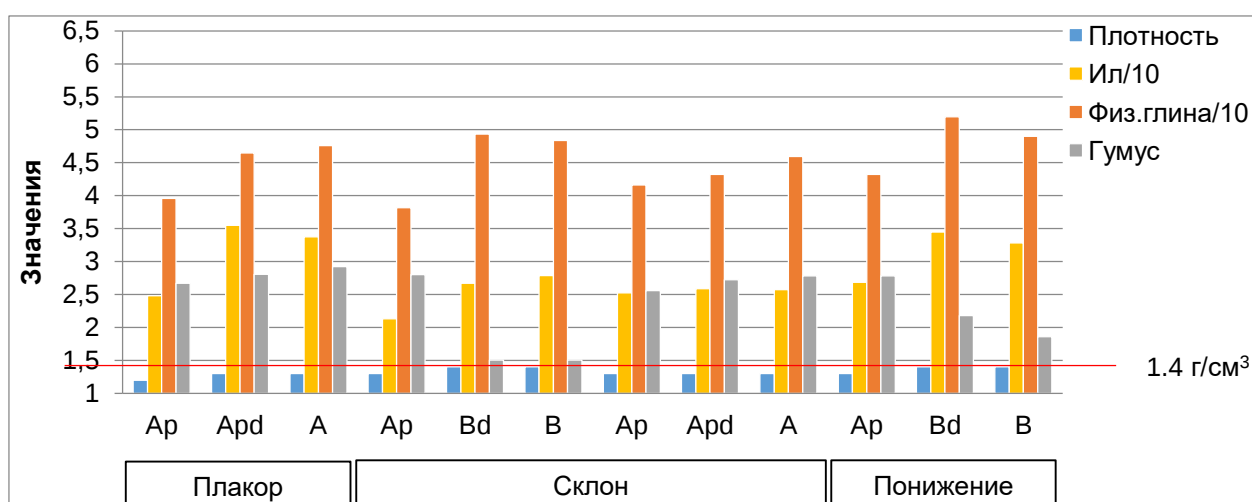


Рисунок 2. Некоторые физико-механические и химические свойства почв с яркими морфологическими признаками уплотнения. «Маркс».

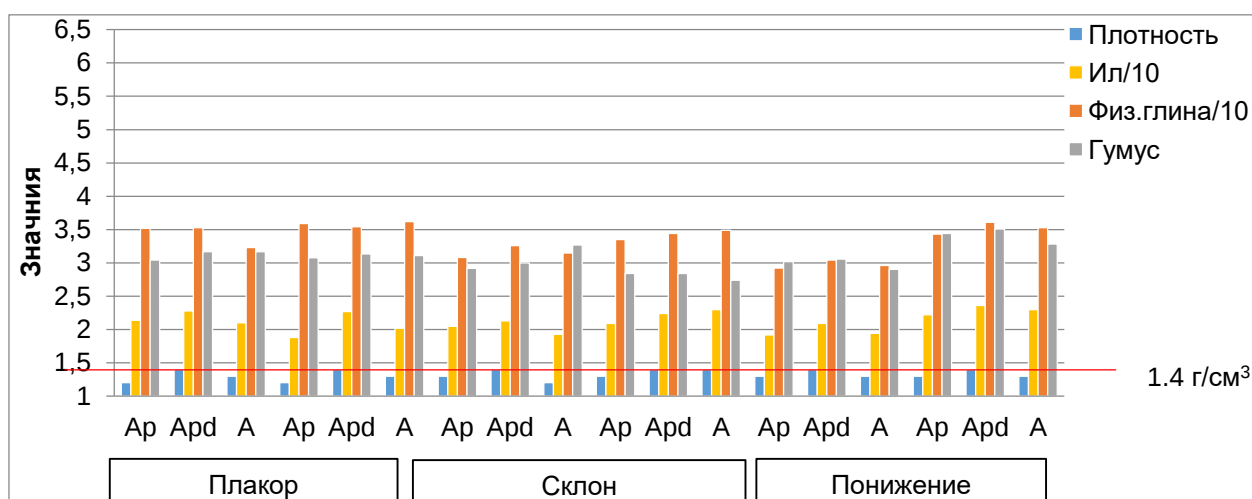


Рисунок 3. Некоторые физико-механические и химические свойства почв с яркими морфологическими признаками уплотнения. «Энгельс».

Примечание: Плотность – плотность почв в г/см³; Ил/10 – содержание общего ила, уменьшенное в десять раз относительно реального значения, в %; Физ.глина/10 – содержание физической глины, уменьшенное в десять раз относительно реального значения, в %; Гумус – содержание гумуса в %.

Линией на значении плотности в 1.4 г/см³ отмечена нижняя граница переуплотнения для черноземных почв.

существенно превышает описанные случаи «подплужной подошвы», мощность которой не превышает 10 см (Медведев В.В., 2011), б) высокие значения содержания илистой фракции (более 30%) в верхних горизонтах почв, в) уплотненный горизонт в почвах отмечается не только на пашне, но и в лесополосах 40–50-летнего возраста и старше (хотя и выражен в значительно меньшей степени), г) восстановление уплотненных горизонтов и их негативных структурных особенностей наблюдается уже через 3–5 лет даже в почвах, обработанных чизелеванием на глубину до 45–50 см; на объекте «Маркс» а) значительная мощность подпахотных уплотненных горизонтов (до 19 см), б) наличие морфологических признаков солонцеватости: призмовидно-ореховатая структура, гумусово-глинистые кутаны (~ 20% площади граней) по граням структурных отдельностей, и признаки элювиально-иллювиальной дифференциации по гранулометрическому составу: содержание физической глины и ила в подпахотных горизонтах по сравнению с пахотными выше в 1.2–1.4 раза.

Таким образом, было сделано промежуточное заключение, что почвы объектов «Кубань» и «Маркс» по совокупности потенциальных условий (гранулометрический состав и содержание гумуса) и актуальных проявлений (морфологические особенности и плотность) обладают, с одной стороны, более яркими признаками уплотнения в подпахотном горизонте по сравнению с объектом «Энгельс», что особенно проявляется в почвах пониженных участков, а с другой стороны, их генезис, вероятнее всего, нельзя связать исключительно с агроуплотнением, вызванным воздействием тяжелой техники. Между тем, генезис уплотнения, как пахотных, так и подпахотных горизонтов почв объекта «Энгельс» по совокупности описанных показателей, вероятнее всего, можно связать с воздействием тяжелой техники, которое, имеет свою специфику в орошаемых и богарных условиях.

Для того чтобы подтвердить морфологические особенности и уточнить действительно ли исследованные почвы имеют, либо не имеют признаки уплотнения иного генезиса (осолонцевания и слитогенеза), которые характерны для степного почвообразования, необходимо рассмотреть совокупность уточняющих показателей, характерных для этих процессов.

Проверка генезиса уплотнения. Диагностика осолонцевания. В качестве уточняющих критериев для диагностики процесса актуального (современного) осолонцевания нами рассматривались наличие Na в почвенно-поглощающем комплексе и щелочная реакция среды (рН более 8.5). Значение рН в верхних горизонтах почв объекта «Кубань» не превышает 7.4, возрастая от пахотного горизонта к собственно гумусовому горизонту (рис. 4). Реакция на карбонаты кальция (вскипание от 10% HCl) отсутствует. Значения рН исследованных почв объекта «Маркс» колеблется от 7.6 до 8.7, что позволяет предполагать проявление современного солонцового процесса только в некоторых из исследованных почв. В средней части профиля повышенные значения рН (от 8.2 до 8.3) имеют срединные горизонты с морфологическими признаками осолонцевания или новообразованиями карбонатов кальция.

Верхние горизонты исследуемых почв объекта «Энгельс» характеризуются нейтральной реакцией среды, повышающейся к низу профиля до слабощелочной. Орошение способствовало декарбонатизации почвенного профиля: отмечено снижение глубины вскипания карбонатов кальция на орошаемых участках по сравнению с неорошаемыми на 12 см.

Полученные данные подтверждаются результатами определения обменного натрия, который был обнаружен в почвах объектов «Маркс» и «Энгельс» (рис. 4). На объекте «Маркс» натрий присутствует в ППК всех почв, составляя от 4.0 до 9.8%. Значение 9.8% характерно для подпахотного переуплотненного горизонта почвы, расположенной в понижении мезорельефа, в нижней части этого почвенного профиля содержание обменного натрия достигает 17.4%. На объекте «Энгельс» определение состава обменных катионов в почвах показало, что, несмотря на наличие слабых морфологических признаков солонцеватости в виде призматической структуры и тонких гумусово-глинистых пленок на гранях агрегатов в подпахотном горизонте неорошаемых условиях, почвенный поглощающий комплекс содержит минимальное количество обменного натрия (не более 2%), что может характеризовать так называемую «остаточную» солонцеватость. Об отсутствии актуального солонцового процесса, как было показано выше, свидетельствуют также и невысокая величина pH.

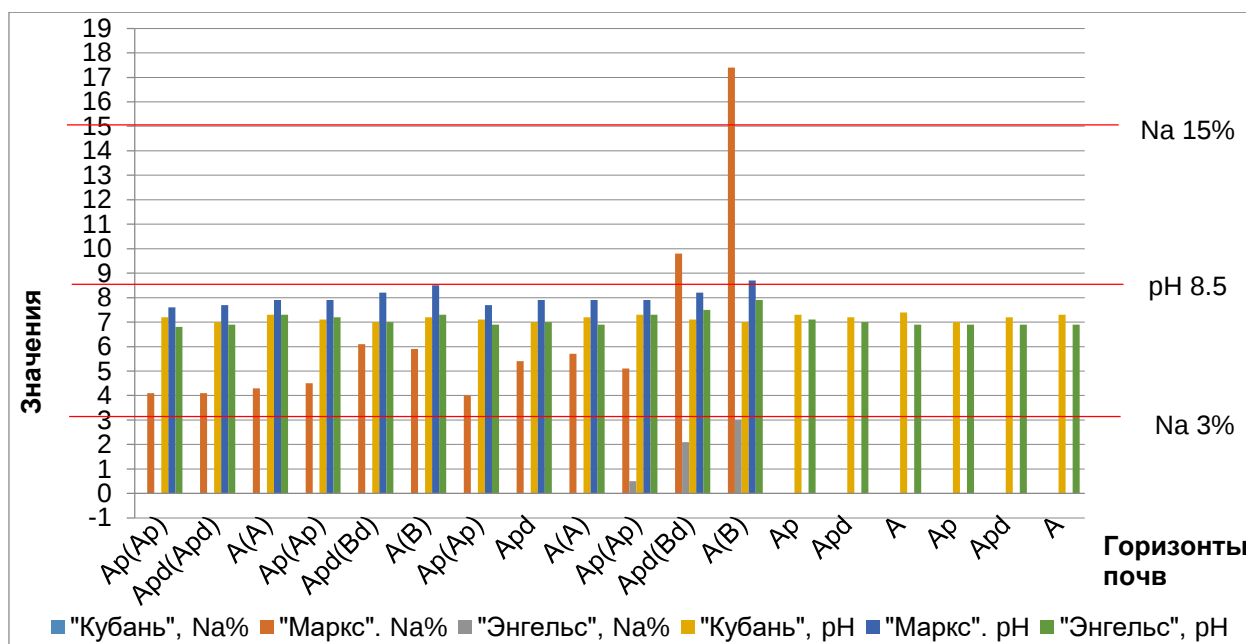


Рисунок 4. Содержание обменного натрия (Na) и значение pH.

Примечание: в скобках указаны индексы горизонтов объекта «Маркс». Линиями на значениях содержания обменного натрия в 15% и pH в 8.5 отмечены нижние пределы диагностических значений для солонцового горизонта (*Na_{tr}*), на значениях содержания обменного натрия в 3% - нижний предел солонцеватости малогумусовых почв.

Таким образом, можно заключить, что для почв объекта «Маркс» признаки уплотнения могут быть связаны с процессом осолонцевания или усилены таковым. Отмеченные диагностические признаки позволяют нам предположить, что данные почвы имеют квалификатор *Solodic* (IUSS Working

Group WRB, 2014), то есть имеют ряд признаков, характерных для солонцового горизонта (*Natric*), за исключением насыщенности обменным натрием. Почвы объектов «Кубань» и «Энгельс» таких признаков не имеют (за исключением неорошаемого участка объекты «Энгельс», где прослежены признаки остаточной солонцеватости).

Проверка генезиса уплотнения. Диагностика слитогенеза. Развитие слитогенеза зависит от повторяющихся циклов набухания–усадки, особенностей гранулометрического состава почвы (высокое содержание ВПИ) и минералогического состава (преобладание смектитовых глин). Циклы набухания–усадки считаются одной из важнейших причин, влияющих на формирование структуры почв. На объекте «Кубань» показатель степени набухания образцов обнаруживает устойчивая тенденция увеличения от пахотного горизонта (колеблется от 17 до 20%) в глубь к гумусовому горизонту А (от 21 до 25%) (рис. 5). Исследования по кинетике набухания показали, что за первые 30 минут практически все образцы набирают от 80 до 86% от величины максимального набухания.

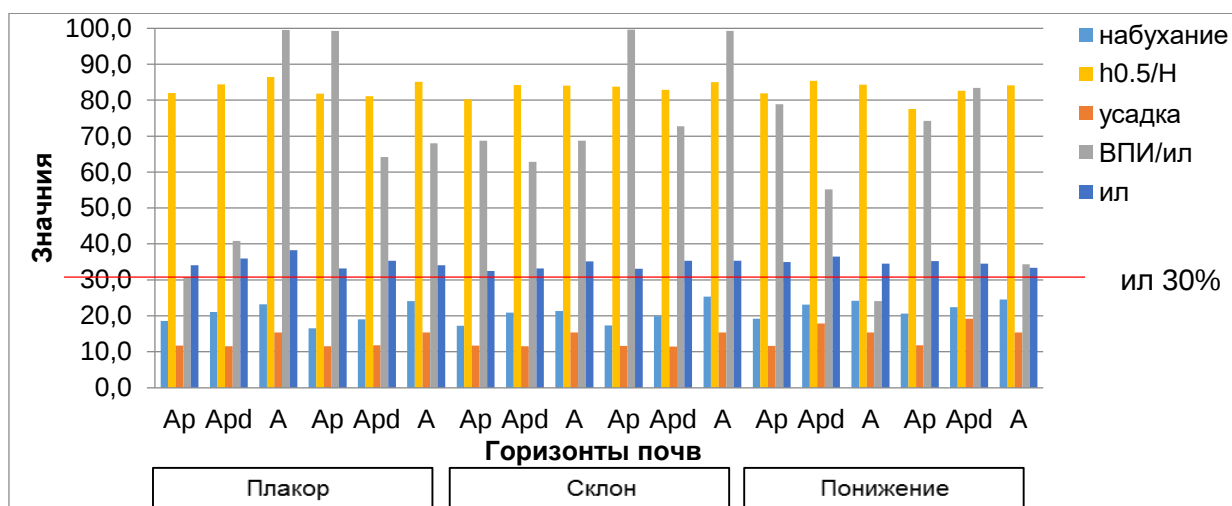


Рисунок 5. Уточняющие диагностические критерии слитогенеза, в %. Объект «Кубань».

Примечание: линией на значении содержания илистой фракции в 30% отмечена нижний предел диагностического значения для протовертикальных горизонтов.

Значения степени набухания в исследуемых образцах объекта «Энгельс» колеблются от 12 до 17.7% (рис. 6). Минимальные значения, как правило, характерны для пахотных горизонтов почв, вне зависимости от положения в мезорельефе. Кинетика набухания также показывает, что за первые 30 минут образцы набирают от 84 до 93%. Как правило, подпахотные и гумусированные горизонты имеют более быстрый отклик на увлажнение (за первые 30 минут они в среднем набухают на 2-7% быстрее, чем пахотные). Вероятнее всего, данный факт связан с относительно более тяжелым гранулометрическим составом и повышенным содержанием илистой фракции в горизонтах ниже пахотного.

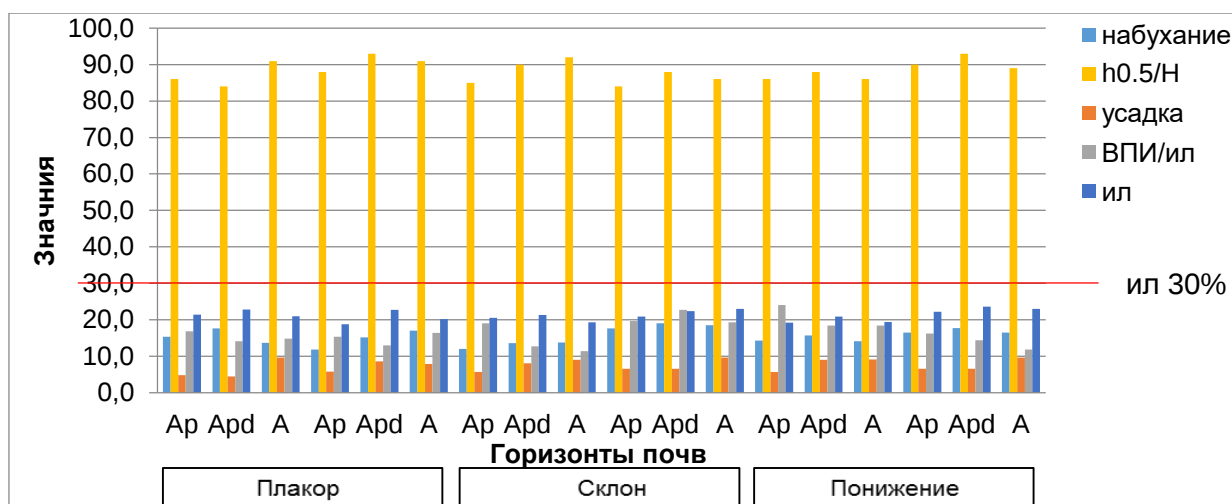


Рисунок 6. Уточняющие диагностические критерии существования слитогенеза, в %. Объект «Энгельс».

Примечание: линией на значении содержания илистой фракции в 30% отмечена нижний предел диагностического значения для протовертикальных горизонтов.

Таким образом, данные, полученные для почв объекта «Кубань», указывают на высокую динамику набухания–усадки. Данный факт позволяет предположить, что именно частота и скорость набухания даже при небольших диапазонах абсолютных величин набухания могут быть более значимы в качестве причины деградации почвенной структуры, чем абсолютные значения величины набухания, особенно при стимулировании их механической обработкой. Почвы объекта «Энгельс» тоже показали хороший отклик на увлажнение через высокую динамику набухания в первые 30 минут, однако абсолютные значения набухания не столь велики. Помимо прочего, очевидно, что почвы объекта «Энгельс» обладают меньшим содержанием илистой фракции: - максимум 23.6%, тогда как все образцы объекта «Кубань» содержат более 30% фракции ила.

Водно-пептизированный ил (ВПИ). Хитров Н.Б. (2004) считает, что показатель содержания ВПИ оценивает потенциальную способность почвенной структуры к дезагрегации в условиях интенсивного промывания, указывая на то, что между частицами нет прочных связей, и может быть следствием, к примеру, солонцового процесса, а также других явлений. Горбунов Н.И. и Аbruкова Л.П. (1974) отмечали, что ВПИ имеет те же свойства, что и коллоиды, обогащенные натрием, он гидрофилен, подвижен, тиксотропен, сильно набухает, устойчив к коагуляции и придает почвам отрицательные гидрофизические и физико-механические свойства. В оструктуренных почвах его обычно менее 10%, в бесструктурных почвах количество его может достигать 30% и более.

Содержание ВПИ в почвах объекта «Кубань» везде более 30% от общего количества ила (рис. 5), а в некоторых образцах почти весь ил представлен водно-пептизированной фракцией, что свидетельствует о высокой потенциальной способности почв к проявлению отрицательных гидрофизических и физико-механических свойств. На объекте «Энгельс»

отношение ВПИ/общий ил в исследуемых почвах колеблется от 11.4 до 24% (рис. 6). Максимальные значения этого соотношения были получены для пахотных горизонтов почв, что, скорее всего, можно связать с орошением (частые периодические смены увлажнения и иссушения способствуют разрушению связей между частицами и переводу коллоидных частиц в подвижную форму (Силева Т.М., Макеева В.И. и Прохоров А.Н., 1997). Невысокие значения отношения ВПИ/общий ил свидетельствуют о низкой потенциальной способности почв к проявлению отрицательных гидрофизических и физико-механических свойств, что подтверждается данными морфологического описания.

Можно заключить, что для почв объекта «Энгельс» не характерны признаки уплотнения, связанные с процессом осолонцевания или слитогенеза. Следовательно, отмеченные диагностические признаки позволяют нам предположить, что данные почвы агроуплотнены или, другими словами, имеют квалификатор *Densic*, и обладают «антриковыми» признаками (*Anthric properties*), то есть обладают низкой пористостью с образованием блоково-глыбистой структуры и растрескиванием в сухом состоянии, относительная плотность подпахотного горизонта увеличена на 10% по сравнению с пахотным, в его толщу корни не проникают, или проникают с трудом (Классификация и диагностика почв России., 2004; IUSS Working Group WRB., 2014).

Совокупность перечисленных выше морфологических и физических признаков исследуемых уплотненных почв объекта «Кубань»: высокое содержание ила в почвенной массе, в том числе большой процент ВПИ (более 30% илистой фракции), наличие периодически появляющихся и исчезающих трещин шириной более 1 см – позволяет предположить наличие признаков слитогенеза в данных почвах, но поскольку сликенсайды в данных почвах не отмечены, то они могут быть отнесены к почвам с протовертиковым горизонтом (IUSS Working Group WRB., 2014). Мы склонны считать, что в отличие от классических слитых почв (с выраженными поверхностями скольжения), основные текстурные трансформации в исследуемых почвах происходят именно в периоды максимального длительного увлажнения и водонасыщенности, то есть в конце зимы и ранней весной, и сопровождаются пластичными сдвигами и переупаковкой почвенной массы, обладающей высокой пептизируемостью и текучестью. Сдвигов, приводящих к появлению сликенсайдов, заметных на макроуровне, при этом не происходит.

Выявление особенностей состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных горизонтов.

Для подтверждения сделанных выводов и выявления особенностей образования подпахотных уплотненных горизонтов были выбраны четыре разреза (по одному на объекты «Кубань» и «Маркс» и два на «Энгельс» - для орошаемых и богарных условий) из числа почв с наиболее яркими признаками уплотнения для проведения комплексных исследований состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных подпахотных горизонтов.

Подпахотный уплотненный горизонт разреза 2_5ю_2 объекта «Кубань» характеризуется следующей совокупностью свойств и признаков: высокое содержание глины и илистой фракции; низкая агрегатная и высокая межагрегатная пористость; большое содержание ВПИ и отсутствие обменного натрия (табл. 2); высокая мощность уплотненного горизонта; крупно-ореховатая структура, монолитность сложения; глубокие вертикальные трещины. Подпахотный уплотненный горизонт разреза F13 объекта «Маркс» характеризуется следующей совокупностью свойств и признаков: высокое содержание физической глины и илистой фракции; низкая агрегатная и высокая межагрегатная пористость; большое содержание ВПИ и присутствие обменного натрия (9.8%); значение рН 8.3 (табл. 2); призмовидная структура и глинисто-гумусовые кутаны по граням структурных отдельностей; гипс и карбонаты в нижележащем горизонте. Уплотненные подпахотные горизонты почв объекта «Энгельс» (разрезы ЛС-7, Bogara) характеризуются следующей совокупностью свойств и признаков: относительно невысокое содержание физической глины и илистой фракции; относительно высокая агрегатная пористость, но низкая межагрегатная; доля ВПИ не более 14%; обменный натрий в ППК отсутствует (табл. 2); ореховатая структура, среднее количество видимых пор, трещины относительно узкие и неглубокие). Таким образом, общими особенностями для выбранных уплотненных подпахотных горизонтов являются: высокая плотность и твердость, деградация структуры через возрастание ореховатости, наличие трещин в сухой сезон, уходящих в глубь профиля, малое содержание гумуса.

Таблица 2. Физические, физико-химические и химические свойства исследованных уплотненных подпахотных горизонтов.

Краткое название	Глубина (мощность), см	<i>D</i>	<0.01	<0.001	ВПИ/ ил	<i>Ea</i>	<i>E</i>	<i>Ema</i>	Гумус	Na	pH
		мм									
		г/см³	%								
«Кубань» (2_5ю_2)	21-40 (19)	1,5	58	35	73	31	42	16	3,0	0	7,2
«Маркс» (F13)	10-29 (19)	1,4	49	35	64	33	46	20	2,1	9,8	8,3
«Энгельс» (ЛС-7)	10-23 (13)	1,4	36	24	14	41	46	8	3,5	0	6,9
«Энгельс» (Bogara)	14-26 (12)	1,4	36	22	18	33	39	10	2,8	2,1	7,5

Примечание: *D* – плотность почвы, <0.01 мм – содержание физической глины; <0.001 мм – содержание илистой фракции; ВПИ/ил – отношение содержания ВПИ к общему содержанию илистой фракции; *Ea* – пористость агрегатов; *E* – пористость; *Ema* – пористость межагрегатная; гумус – содержание гумуса, рН (водной вытяжки) – значение показателя, отражающего реакцию среды; Na – доля обменного натрия в ППК.

Для выявления особенностей состава и строения отдельных агрегатов образцы из уплотненных горизонтов были рассеяны на ситах с разным диаметром отверстий. Для всех анализов были взяты агрегаты размером от 1 до 2 мм, а для томографического исследования дополнительно были взяты агрегаты размером от 3 до 5 мм. Агрегаты размером от 1 до 2 мм изучали как пример малых структурных отдельностей, в которых можно наблюдать

совокупности микропор диаметром 7-30 мкм, недоступных исследованию в прозрачных шлифах. Агрегаты размером от 3 до 5 мм изучали как пример внутреннего строения агрономически ценных агрегатов.

В ходе мезоморфометрического анализа исследовали агрегаты размером от 1 до 2 мм. Для этого подготовленные агрегаты из уплотненных горизонтов в количестве около 100 штук для каждого объекта были отсняты на сканере Epson perfection 2450с разрешением 1200 точек на дюйм. Полученные снимки были обработаны программой *ImageJ* (Rasband W.S., 1997) для преобразования их в растровые. Были рассчитаны такие показатели как обратное отношение округлости ($1/R$), где $R=4\pi S/P^2$, показатель изометричности $I=D/L$ и обобщенный фактор формы $F=(4\pi S/P^2+D/L)/2$, где S – площадь, P – периметр, D и L – поперечный и продольный габариты контуров на плоскости (Скворцова Е.Б., 1994; Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р., 1993), а также был применен кластерный анализ (Рожков В.А., Скворцова Е.Б., 2009) к данным рассчитанного показателя изометричности (I) – атрибут, а контуры агрегатов послужили предметом анализа. В результате агрегаты из уплотненных горизонтов были сгруппированы по пяти классам (табл. 3).

Морфометрический анализ выявил следующие признаки: 1) наиболее вытянутыми в проекции являются агрегаты «Маркс» (F13), на долю таких агрегатов приходится 17.3% от общего числа агрегатов; 2) в остальных образцах агрегатов доля вытянутых составляет от 4.7 до 9.8% от общего числа агрегатов; 3) наиболее изометричными и округлыми являются агрегаты из уплотненного горизонта «Энгельс» (ЛС-7) - 45.6% от общего числа агрегатов. Также агрегаты уплотненного горизонта «Энгельс» (ЛС-7) обладают наименее прочной структурой, что выражалось в распадении агрегатов на более мелкие даже при слабом механическом воздействии. Таким образом, морфометрический анализ подтвердил отмеченные морфологические особенности структуры почв объекта «Маркс» (F13), а также неплотное сложение почв объекта «Энгельс» (ЛС-7).

Таблица 3. Морфометрические признаки агрегатов уплотненных горизонтов.

Краткое название	Класс по величине изометричности I , %					Показатель			Особенности формы
	I	II	III	IV	V	$1/R$	I	F	
«Кубань» (2_5ю_2)	0	0	7,5	52,3	40,2	0,82 (0,06)	0,77 (0,11)	0,79 (0,07)	Округлая слабоизрезанная
«Маркс» (F13)	0	1,3	16,0	49,4	33,3	0,72 (0,08)	0,72 (0,13)	0,72 (0,09)	Наиболее вытянутая
«Энгельс» (ЛС-7)	0	0	4,7	58,5	36,8	0,74 (0,07)	0,77 (0,09)	0,76 (0,07)	Наиболее изометричная
«Энгельс» (Bogara)	0	0	9,8	44,6	45,6	0,77 (0,06)	0,78 (0,11)	0,77 (0,07)	Изометричная слабоизрезанная

Примечание: Классы по величине изометричности – I (трещиновидные), II (вытянутые изрезанные), III (изометричные сильноизрезанные и овально-вытянутые), IV (изометричные слабоизрезанные), V (округлые). Среднее значение показателя с указанием в скобках стандартного отклонения: $1/R$ – обратное отношение округлости, I – изометричности, F – обобщенный фактор формы.

Микроморфологические исследования проводились по классическим методикам (Stoops G., 2003) с использованием поляризационного микроскопа Olympus BX51 с цифровой камерой Olympus DP26. Визуализация и измерение деталей микростроения были проведены с помощью компьютерных программ, приложенных к данному микроскопу. Элементы микростроения агрегатов разных типов почв представлены на рис. 7.

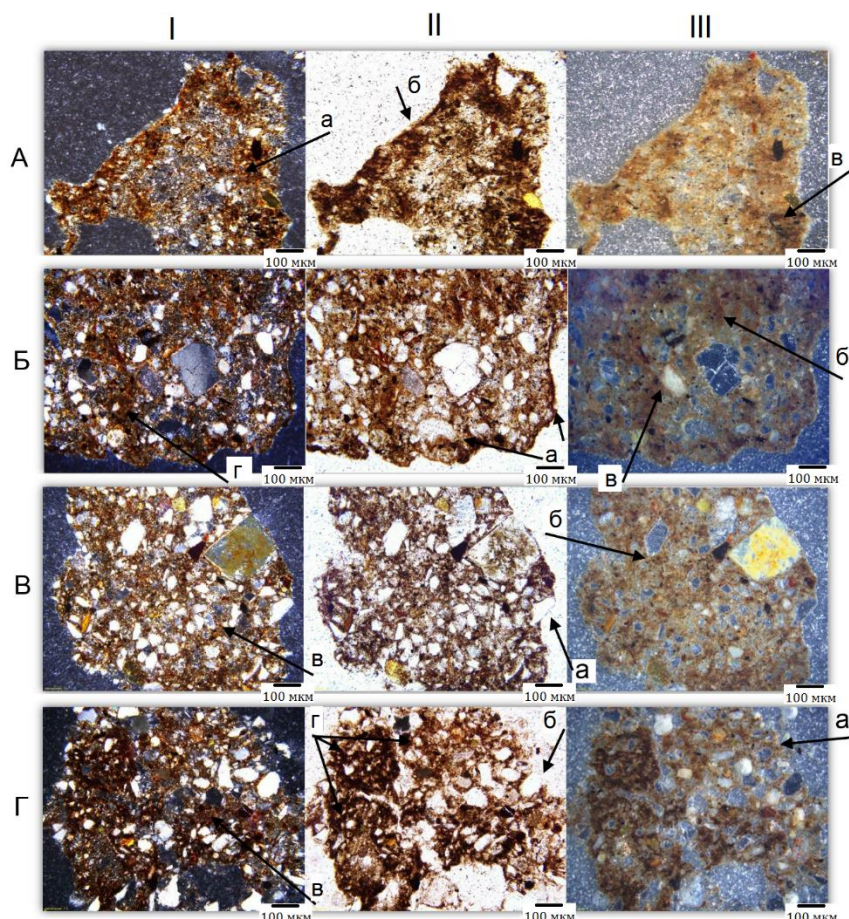


Рисунок 7. Микро-морфологическое строение агрегатов размером 1-2 мм из уплотненных горизонтов.

Примечание:

А - «Кубань» (2_5ю_2);

Б - «Маркс» (F13);

В - «Энгельс» (Bogara);

Г - «Энгельс» (ЛС-7).

I - скрещенные николи,

II - параллельные

николи,

III - отраженный свет.

Масштаб:

100 мкм

Микроморфологический анализ позволил выявить диагностические признаки генезиса уплотненных горизонтов изученных почв: 1) в образцах почв объекта «Кубань» (2_5ю_2) о наличии «протовертикального» горизонта свидетельствуют: специфические для вертисолей (по Сапожникову П.М., 1994) формы агрегатов «вытянутые» по углам; более интенсивная краевая пропитка внутрисредной массы с образованием стресс-кутан (А-I-a) и очень тонкие кутаны на поверхности агрегатов (А-I-б). Эти микропризнаки внутрисредной подвижности глины также подтверждаются высокими значениями ВПИ, а большое количество мелких обрывков углистых тканей и частиц в почвенной массе (А-I-в) позволяет говорить о процессах периодического застоя влаги; 2) в образцах почв объекта «Маркс» (F13) на фоне относительно низкого содержания обменного натрия выявлены микропризнаки современной подвижности органоминеральных частиц в виде тонких кутан на поверхности агрегатов и на минералах крупных фракций, а также плотные инфиллинги в тонких порах (Б-III-a). Наличие смены

окислительно-восстановительных условий читается по многочисленным железистым новообразованиям (Б-II-г); 3) в образцах почв объекта «Энгельс» (ЛС-7) отмечено сохранение характерного для плодородных почв губчатого микростроения и активной биогенной переработки в виде сохранившихся копролитов и большого количества растительных остатков (Г-II-г). Отсутствие глинисто-гумусовых кутан на минералах крупных фракций (Г-II-а, б), залегающих на поверхности изученных агрегатов, свидетельствует о периодическом переувлажнении при орошении; 4) в образцах почв объекта «Энгельс» (Bogara) в отличие от «Энгельс» (ЛС-7) и других отсутствуют микропризнаки активной поверхностной (В-I-а) и внутривредной миграции вещества (В-I-в), тонкодисперсное глинисто-гумусовое вещество равномерно пропитывает почвенную массу, отсутствуют текстурные новообразования.

Томографический анализ агрегатов был выполнен с помощью микротомографа Bruker SkyScan 1172, который позволяет получать рентгеновские изображения объектов с разрешением 0.6-26 мкм/пиксель. Исследования были проведены при энергии пучка 100 кэВ и двух разрешениях: 0.88 мкм (для агрегатов размером 1-2 мм) и 2.4 мкм (для агрегатов размером 3-5 мм). Фильтром служил Despeckle с порогом более 25 voxels для трехмерных изображений. Бинаризация проводилась при единых настройках. При подсчете и описании данных томографического анализа мы использовали следующие определения и понятия: 1) термин «раскрытость пор» или «средний диаметр пор», изначально используемый в геологии, означает максимальное расстояние между стенками поры (Жданов М.А., 1970; Ромм Е.С., 1966); 2) «общая видимая на томограммах пористость» или «пористость» - это доля объема твердого тела (в томограммах), не заполненного его материалом на томографических изображениях (Свитцов А.А., 2006); 3) «открытые поры» - этот термин пока в почвоведении не устоялся, и для него нет строгого определения. В настоящей работе под этим термином понимается совокупность пор, пересекающихся гранями куба, вписанного в 3D изображение анализируемого образца (ГОСТ 26450.1-85).

Исследованные агрегаты имеют значительные различия на смоделированных трехмерных изображениях (рис. 8, табл. 4). В «мелких» агрегатах размером от 1 до 2 мм (разрешение 0.88 мкм) общая видимая на томограммах пористость варьирует от 35 до 50%. Наименьшее значение характерно для почв объекта «Маркс» (F13). Стоит отметить, что видимая общая пористость для почв объекта «Кубань» (2_5ю_2) составляет 50% и приближается к значениям показателя пористости для целинных черноземов. Однако, в «крупных» агрономически ценных агрегатах размером от 3 до 5 мм (разрешение 2.4 мкм) ситуация для «Кубани» (2_5ю_2) кардинально меняется: нижний порог общей видимой пористости образцов опускается до 16%. Заметим, что для остальных случаев определяемые значения видимой пористости «крупных» агрегатов (разрешение 2.4 мкм) и «мелких» (разрешение 0.88 мкм) имеют относительно близкие величины (табл. 4).

Таблица 4. Обработанные данные томографической съемки. Общая характеристика агрегатов из подпахотных уплотненных горизонтов почв.

Признак	«Кубань» (2_5ю_2)	«Маркс» (F13)	«Энгельс» (ЛС-7)	«Энгельс» (Bogara)
Общая пористость, %	50 (16)	37 (30)	45 (42)	44 (43)
Открытые поры, %	38	9	35	35
Раскрытость пор, мкм	7-12	8-20	12-40	12-120
Строение агрегата	Компактный, однородный, поверхность ровная, грани острые	Компактный с микротрещинами, поверхность неровная, грани острые	Неоднородный, пористый, поверхность неровная, грани тупые	Неоднородный, трещиноватый, поверхность неровная, грани тупые

Примечание: без скобок указаны данные для агрегатов размером от 1 до 2 мм (разрешение 0.88 мкм), в скобках - для агрегатов размером от 3 до 5 мм (разрешение 2.44 мкм).

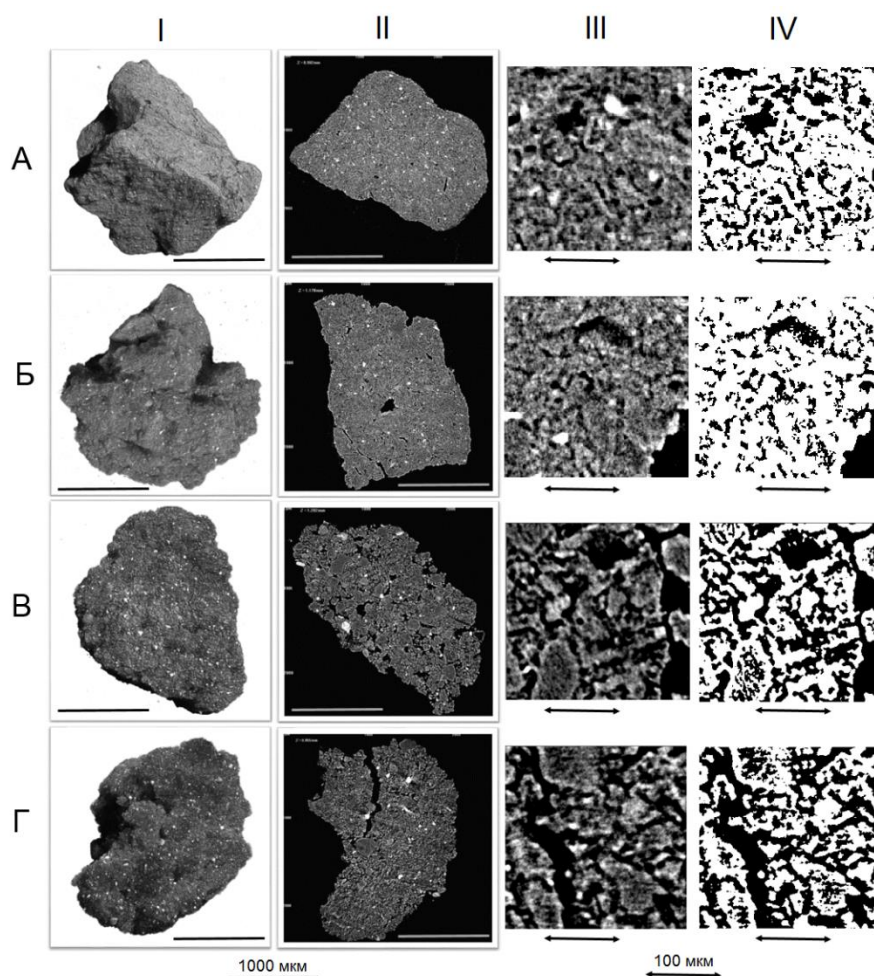


Рисунок 8. Визуализация агрегатов размером от 1 до 2 мм (разрешение 0.88 мкм) из уплотненных горизонтов.

Примечание:
А – «Кубань» (2_5ю_2);
Б – «Маркс» (F13);
В – «Энгельс» (Bogara);
Г – «Энгельс» (ЛС-7).

I - трехмерная,
II - послойная двумерная,
III и VI - исходное и бинаризованное изображения.

Масштаб:
для — (1000 мкм);
для ↔ (100 мкм).

Если вернуться к результатам микроморфологического исследования можно отметить, что низкие значения видимой на томограммах общей (37%) и открытой пористости (9%) в «мелких» агрегатах из почв объекта «Маркс» (F13) по сравнению с другими изученными «мелкими» агрегатами, в которых

содержания видимой общей и открытой пористости значительно выше (превышают 44 и 35%, соответственно), обусловлены процессом осолонцевания. Данный факт может быть связан с обилием глинистого материала в порах и внутрипедной массе, что уменьшает объем и сообщаемость пор внутри агрегатов.

Таким образом, наибольший интерес для установления ключевых различий между изученными уплотненными горизонтами представляют данные томографического анализа в комплексе с микроморфологическими исследованиями. При общем сходстве протовертикальных горизонтов и горизонтов с признаками солонцеватости по морфологии, физическим и химическим признакам, специфической особенностью первых является большое количество внутриагрегатных тонких пор (7-12 мкм). Для вторых характерно обилие глинистого материала в порах и внутрипедной массе, а также характерно низкое содержание видимых на томограммах открытых пор (9%) в ряду изученных уплотненных горизонтов. Агрегаты из агроуплотненных горизонтов качественно и количественно отличаются от остальных агрегатов. Они трещиноваты, имеют множество минеральных зерен и обособленных уплотнений на поверхности образцов, а их значения видимой общей пористости относительно высоки (от 42 до 45%) как в «мелких», так и в «крупных» агрегатах. Отличие богарных условий от орошения заключается в отсутствии микропризнаков активной внутрипедной миграции тонкодисперсного глинисто-гумусового вещества и в отсутствии текстурных новообразований.

ВЫВОДЫ

1. В исследованных почвах, для которых предложена группировка морфологических проявлений уплотнения, оно характеризуется увеличением плотности и твердости, уменьшением количества и размера округлых пор и трещин, увеличением элементов глыбистости и крупной ореховатости в структуре при одновременном усилении резкости граней структурных отдельностей, уменьшением количества и размеров корней. Мощность горизонтов при этом существенного значения не имеет: яркие признаки уплотнения с равной вероятностью отмечались как в маломощных, и даже фрагментарных горизонтах, так и в более мощных сплошных подпахотных горизонтах.
2. Максимально выраженные признаки уплотнения в пахотных и подпахотных горизонтах характерны для почв пониженных элементов рельефа, хотя отмечены и исключения для пахотных горизонтов; почвы с менее выраженными признаками уплотнения не имеют строгой приуроченности к рельефу.
3. Помимо агроуплотнения ряд естественных процессов также приводит к специфическим признакам уплотнения. Так, мощность уплотненного слоя (более 10-15 см); высокие значения содержания илистой фракции (более 30%) в верхних горизонтах почв; восстановление уплотненных горизонтов и их структурных особенностей к концу вегетационного

сезона после глубокого рыхления почв; дифференциация профиля по гранулометрическому составу и массивное сложение могут быть обусловлены слитогенезом и осолонцеванием.

4. Для установления ключевых различий между уплотненными горизонтами разного генезиса важное значение имеет применение комплекса томографических и микроморфологических методов. При общем сходстве протовертикальных горизонтов и горизонтов с признаками солонцеватости по морфологии, физическим и химическим свойствам, специфической особенностью агрегатов протовертикальных горизонтов является большое количество внутриагрегатных тонких пор (7-12 мкм). Для агрегатов горизонтов с признаками солонцеватости с обилием глинистого материала в порах и внутрипедной массе характерно низкое содержание видимых на томограммах открытых пор (9%) в ряду изученных уплотненных горизонтов.
5. Агрегаты из агроуплотненных горизонтов имеют качественные и количественные отличия от агрегатов из протовертикальных горизонтов и горизонтов с признаками солонцеватых. Они трещиноваты, имеют множество зерен и обособленных уплотнений на поверхности образцов, а их значения видимой общей пористости относительно высоки (от 42 до 45%). Отличие агрегатов, сформированных в богарных условиях от таковых, сформированных в условиях орошения, проявляется в отсутствии микропризнаков активной внутрипедной миграции вещества и текстурных новообразований.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1. Сорокин А.С., Куст Г.С. Уплотнение черноземов правобережья реки Кубань // Почвоведение. 2015. № 1. С. 71–80.
2. Сорокин А.С., Абросимов К.Н., Лебедева М.П. и Куст Г.С. Состав и строение агрегатов уплотненных горизонтов в почвах юга степной зоны Европейской территории России // Почвоведение. 2016. № 3. С. 355-367.

Статьи и материалы конференций:

3. Сорокин А.С. Проявление слитогенеза в почвах юга Кубанской наклонной равнины // Мат-лы международной конференции, посвященной 165-летию со дня рождения В.В.Докучаева, 1-4 марта 2011 года. СПб.: издательский дом С.-Петербургского государственного университета Санкт-Петербург / под ред. Б.Ф. Апарина, 2011. С. 242–243.
4. Сорокин А.С., Абросимов К.Н. Исследование строения порового пространства уплотненных горизонтов юга степной зоны томографическим методом // Практическая микротомография. Материалы Всероссийской конференции. Почвенный институт Докучаева, 2-4 октября 2013. Москва, 2013. С. 138–144.
5. Sorokin A., Kust G. Diagnostics of soil compaction in steppe zone // EGU General Assembly (EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 7-12, 2013). Vol. 15. Vienna, Austria, 2013.

6. Sorokin A., Abrosimov K., Lebedeva M., Tolpeshta I. Morphological properties of soil compaction in steppe zone of Russia // The 20th World Congress of Soil Science Proceedings. June 8-13, 2014. Jeju, Korea.
7. Sorokin A., Golovleva Iu., Lebedeva M., Abrosimov K., Kust G. The prospects for integrated studies (from macro to micro-level) of agricultural soils of the steppe zone of the European part of Russia // The International Soil Science Congress on "Soil Science in International Year of Soils 2015". October 19-23, 2015. Sochi, Russia.