

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

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

диссертация на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научный руководитель:

доктор биологических наук,

Куст Г.С.

Москва

2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	3
ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К КЛАССИФИКАЦИИ ПОЧВ С ПРИЗНАКАМИ УПЛОТНЕНИЯ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА	10
РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ УПЛОТНЕНИЯ	16
ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВ. СЛИТОГЕНЕЗ.....	19
ОСОБЕННОСТИ АГРОГЕННОЙ ПРИРОДЫ УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВ ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ	24
ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВ. ОСОЛОНЦЕВАНИЕ.....	27
ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	31
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	36
ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	38
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.....	39
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ	40
ПРОВЕРКА ГЕНЕЗИСА УПЛОТНЕНИЯ. ДИАГНОСТИКА АГРОУПЛОТНЕНИЯ	47
ПРОВЕРКА ГЕНЕЗИСА УПЛОТНЕНИЯ. ДИАГНОСТИКА ОСОЛОНЦЕВАНИЯ	57
ПРОВЕРКА ГЕНЕЗИСА УПЛОТНЕНИЯ. ДИАГНОСТИКА СЛИТОГЕНЕЗА.....	60
НЕКОТОРЫЕ ГИПОТЕЗЫ О ГЕНЕЗИСЕ ПРИЗНАКОВ УПЛОТНЕНИЯ	67
ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ИЗ УПЛОТНЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
ВЫВОДЫ.....	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ	105

ВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В России степи, луга и их антропогенные модификации на черноземных и каштановых почвах, включая залежи и пастбища, занимают более 220 млн. га. На рисунке 1 показано, что степная зона Европейской территории России расположены южнее 55°33' северной широты и образует широтную зону, постепенно спускающуюся к югу. Ее протяженность с запада на восток составляет почти 5 тыс. км и более чем на 1.2 тыс. км с севера на юг. Практически вся зона распаханна – от 80 до 95% (Пятый национальный доклад. Сохранение биоразнообразия в Российской Федерации. М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. 2015. 124с.).

Наибольшую ценность для сельского хозяйства в степной зоне, помимо интразональных почв, представляют черноземы и каштановые почвы, а также их полугидроморфные аналоги. Однако, повсеместное сельскохозяйственное освоение и интенсивная, а иногда и, необдуманная эксплуатация привела к деградации почв, которую мы в след за Хитровым Н.Б. (Хитров Н.Б. Деградация почв и почвенного покрова: понятия и подходы к получению оценок / Антропогенная деградация почвенного покрова и меры ее предупреждения // Тез. докл. Всерос. конф. 16-18 июня 1998. Т. 1. М., 1998. С. 20-26.) понимаем, как «вызванный человеком процесс ухудшения и/или утраты свойств и качества почвы..., результат которого способствует увеличению затрат различного рода ресурсов (энергетических, сырьевых, информационных и пр.) для достижения ранее получаемого количества и качества продукции и/или увеличению ограничений на дальнейшую деятельность человека». Вместе с тем, когда антропогенное воздействие приводит к изменениям факторов почвообразования, следует говорить об «антропогенной эволюции» или «деградации почв под влиянием природных факторов». Зайдельман Ф.Р. (Зайдельман Ф.Р. Гидрологический фактор антропогенной деградации почвенного покрова России и меры ее предупреждения // Аграрная деградация почвенного покрова России и меры ее предупреждения. Всесоюз. конф. М., 1998. Т. 2. С. 70-72.) под антропогенной деградацией понимал «такие их вторичные изменения, обуслов-



Рисунок 1. Карта растительности России TerraNorte RLC, полученная по данным MODIS (Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектро радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. № 4. С.285-302).

Примечание: желтый цвет – пашня, светло-желтый – степь.

ленные деятельностью человека, которые сопровождаются частичной или полной утратой плодородия почвенного покрова...». Среди основных причин деградации почв сельскохозяйственных угодий можно выделить следующие: многолетняя обработка почв тяжелой сельскохозяйственной техникой, ненормированное и некачественное орошение, низкое качество либо отсутствие почвозащитных мероприятий (Деградация и охрана почв / Под. ред. Г.В. Добровольского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 654 с.). Однако разграничить влияние природных и антропогенных факторов деградации часто бывает достаточно сложно, так как процесс происходит при их совокупном воздействии, при этом, как правило, антропогенное влияние создает предпосылки для резкой активации природных факторов (Природно-техногенные воздействия на земельный фонд России и страхование имущественных интересов участников земельного рынка / Под общ. ред. Л.Л. Шишова, Е.И. Путилина, Д.С. Булгакова, И.И. Карманова. М. Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2000. 252с.).

Одним из таких процессов деградации почв в степной зоне можно назвать уплотнение почв, под которым называют «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 под воздействием антропогенных факторов, 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 (Ачканов А.Я., Николаева С.А. Вторичный гидроморфизм почв степных ландшафтов Западного Предкавказья // Почвоведение. 1999. № 12. С. 1424-1432; Бондарев А.Г., Кузнецова И.В., Сапожников П.М. Переуплотнение почв сельскохозяйственной техникой, прогноз явления и процессы разуплотнения // Почвоведение. 1994. № 4. С. 58-64; Изменение агрофизических свойств почв под воздействием антропогенных факторов, 1990). Как известно уплотнение почв в степной зоне в естественных условиях может быть вызвано такими процессами как

слитогенез и осолонцевание (Ковда И.В. Вертисоли: проблемы классификации, эволюции // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1506-1518; Куст Г.С. Опыт диагностики солонцеватых горизонтов // Почвоведение. 1989. № 8. С. 133-139; Слитоземы и слитые почвы / Под ред. Е.М. Самойловой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 182с.). Общим признаком этих почв можно назвать повышенную плотность и твердость почвенной массы. Никому не секрет, что плотность почвы во многом определяет урожайность культур и вносит ограничения нормальному хозяйственному использованию почв. Известно, что разрыхлить поверхностные горизонты почв не составляет труда – достаточно применить подходящие сельскохозяйственное орудие, однако разрыхлить при этом почвенные агрегаты значительно сложнее (Медведев В.В. Оптимизация агрофизических свойств черноземов. М.: Агропромиздат. 1988.). Помимо уплотнения пахотного горизонта происходит уплотнение подпахотного слоя или «накопительное» уплотнение, которое распространяется все глубже и глубже при многократном воздействии техники либо орудий с образованием уплотненного слоя ниже пахотного.

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. 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. В таких случаях следует говорить о проявлении в почвах отдельных признаков этих макропроцессов, то есть «вертикальных» признаков и признаков солонцеватости. Диагностика различных проявлений уплотнения почв позволит точнее прогнозировать скорость и степень развития процессов деградации и предпринимать адекватные эффективные меры по их предупреждению и мелиорации земель.

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

Известно, что структура почвы и строение порового пространства во многом определяют плодородие почв, условия жизнедеятельности почвенных организмов, перенос и накопление вещества. Традиционно для оценки состояния структуры почв широко используются показатели плотности, пористости, гранулометрического и агрегатного состава почвенной массы (Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России // Почвоведение. 2012. № 7. С. 781-791). Однако эти общепринятые показатели не в полной мере дают представления о форме, ориентации и взаимном расположении пор и агрегатов (Скворцова Е.Б. Изменение геометрического строения пор и агрегатов как показатель деградации структуры пахотных почв // Почвоведение. 2009. № 11. С. 1345–1353), что зачастую бывает необходимо для уточнения генезиса процессов, происходящих в почве. Морфометрические исследования в почвенных шлифах позволяют оценить характер пор и форму агрегатов с помощью количественных показателей (Скворцова Е.Б. Микроморфометрия порового пространства и диагностика почвенной структуры // Почвоведение. 1994. № 11. С. 42-50), позволяющих диагностировать строение почвы по геометрии ее порового пространства и характеру границ агрегатов на разных уровнях ее организации. Изучение почвенных шлифов с помощью оптических и электронных микроскопов дает возможность получения недостающих морфологических данных, а также сведений об особенностях состава и взаимоотношения основных твердофазных компонентов почв (органического вещества, частиц различной размерности и т. д.) (Добровольский Г.В., Шоба С.А. Растровая электронная микроскопия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 142 с; Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. М.: Наука, 1977. 198 с; Рожков В.А., Скворцова Е.Б. Тектология почвенной мегасистемы (общность организации и анализа данных) // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1155-1164).

Томографические исследования, основанные на точных физических принципах, является перспективным для почвоведения методом диагностики, оценки и мониторинга физического состояния почв и позволяют получить качественную и количественную информацию о форме агрегатов и внутренних пор в трехмерном изображении (Иванов А.Л., Скворцова Е.Б., Корост Д.В., Герке К. М., Абросимов К.Н., Колокольцев В.В. Томографические исследования в российском почвоведении. Тезисы докладов Первой Всероссийской конференции «Практическая микротомография». Казань 2011. С. 75-83.). В настоящее время томографический метод в почвоведении используют по всему миру для решения как прикладных, так и фундаментальных задач: используют для анализа объемной плотности, общей структуры почвы и порового пространства с целью описать различные почвенно-генетические условия, например, на пашне и защитных лесополосах (Udawatta R., Anderson S.H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers // *Geoderma*. 2008. V. 145. P. 381–389); в генетических горизонтах дерново-подзолистых и серых лесных почв центра Русской равнины (Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В., 2012); для изучения влияния сельскохозяйственного использования на структурное состояние почв, их уплотнение (Kim H.M., Anderson S.H., Motavalli P.P., Gantzer C.J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field // *Geoderma*. 2010. V. 160. P. 244–251).

В задачи исследования 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.

Благодарность:

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.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К КЛАССИФИКАЦИИ ПОЧВ С ПРИЗНАКАМИ УПЛОТНЕНИЯ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА

В Классификации почв России (Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.) для почвы с признаками агроуплотнения (Таблица 1) выделяют агро(темно)гумусовые горизонты и диагностические признаки агропереуплотнения: наличие в агрогоризонте переуплотнения, которое сопровождается низкой пористостью, образованием блоково-глыбистой структуры и растрескиванием в сухом состоянии, гранулометрический состав должен быть суглинисто-глинистый. Также говорится о «плужной подошве», которая формируется в нижней части пахотного горизонта, уплотнена, служит водупором и имеет тенденцию к горизонтальной делимости. Мировая коррелятивная база (IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2014. 191 p.) указывает на образование «плужной подошвы» в агропочвах (*Anthric properties*), которая может иметь либо плитчатую, либо массивную структуру, и относительная плотность которой увеличивается на 10% по сравнению с пахотным горизонтом. Также используется квалификатор «денсик» (*Densic*), который может быть применен почти для каждой Реферативной почвенной группы и означает наличие естественного или искусственного уплотнения в 100-сантиметровой толще от поверхности почвы в той степени, в какую корни не проникают или проникают с трудом.

Проявлением слитогенеза в почвах являются (Таблица 1), например, вертикальные признаки (от лат. «*vertere*», поворот), согласно Международной коррелятивной базе (IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 2006. 145p.), которые диагностируются тогда, когда почва обладает одним или более признаками: 1) слой мощностью 15 см или более содержит в своем составе глины (гранулометрической фракции менее 2 мкм) 30% или более, а также одно или более: а) «сликенсайды» (поверхности скольжения, образованные под действием

процессов набухания и усадки); или б) клиновидные агрегаты; или в) трещины, которые периодически появляются и исчезают толщиной 1 см или более; или 2) среднюю усадку 6% или более по всей глубине в приповерхностной метровой толще. В редакции Международной коррелятивной базы 2014 года, термин «вертикальные признаки» был заменен на «протовертикальный горизонт» (IUSS Working Group WRB, 2014). Также в последней редакции говорится о «вертикальном горизонте», который характеризуется большей мощностью (от 25 см и более) и наличием полного набора вышеперечисленных признаков. Также там указано, что «вертикальные горизонты» по такому диагностическому признаку, как высокое содержания глинистой фракции (частицы менее 2 мкм), пересекаются с «агриковыми горизонтами» (обогащенные за счет иллювиирования глинистой фракцией из вышележащих горизонтов) и «натриковыми горизонтами» (содержащими обменный натрий в почвенно-поглощающем комплексе (ППК)). В официально принятой в России почвенной классификации слитые почвы на высшем таксономическом уровне не выделяются, а выделяется слитый род в черноземах и каштановых почвах (Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.), который развивается на иловато-глинистых породах, ему характерна исключительная плотность («слитость»), слабая водопроницаемость и глыбисто-призмовидная структура. Также упоминается очень плотное «слитое сложение». Новая российская классификация (Классификация и диагностика почв России., 2004) во многом похожа по своим диагностическим признакам на Мировую коррелятивную базу и выделяет подповерхностный слитый горизонт, который определяется, как расположенный не глубже 60 см слой, очень плотный (плотность 1.3-1.6 г/см³); вязкий и пластичный во влажном состоянии, и трещиноватый в сухом; разбит трещинами на глыбистые или тумбовидные отдельности; имеет поверхности скольжения протяженностью более 30 см при угле наклона 10°- 60°, создающие клиновидную структуру, содержит более 30% ила (гранулометрической фракции менее 1 мкм), имеет высокую (40 мг-экв и более) емкость поглощения, нейтральную или слабощелочную реакцию. Признаки слитости могут прослеживаться и за пределами слитого горизонта. А для

выделения подтипа слитизированных почв в широком спектре лесостепи и степи необходимо наличие деформации почвенной массы при набухании и усадки, которая проявляется в образовании поверхностей скольжения разных размеров (от первых сантиметров до 20-30 см и более) и/или клиновидные структурные отдельности.

Таблица 1. Уплотнение разного генезиса в пахотных почвах степной зоны ЕТР (черноземах, каштановых и их полугидроморфные аналогах).

Признаки уплотнения и их аналоги	Классификация почв СССР	Классификация почв России	WRB
Агроуплотнение	Не разработана	Агро(темно)гумусовый горизонт Признак агропереуплотненный «Плужная подошва»	Anthric properties Densic Plough pen
Слитогенез	Род слитые Слитое сложение Слитость	Слитой горизонт Признак слитизированный	(Proto)vertic horizon Vertic properties
Осолонцевание	Солонцеватые Остаточно-солонцеватые	Солонцовый горизонт Признак солонцеватый	Natric horizon (Proto)sodic

Французская классификация, по мнению И.В. Ковда (Ковда И.В., 2004), предлагает интересный эволюционный подход к классификации Вертисолей по генезису их слитости и направлению эволюции (усилению или ослаблению) вертикальных свойств в ходе педогенеза (Почвенный справочник / Под ред. М.И. Герасимовой, перевод И.В. Ковда. Ойкумена, 2000. 228 с.). К Вертисолям относятся глинистые, в основном, смектитовые почвы, сильно меняющиеся в объеме при чередовании сухого и влажного сезонов. Необходимые диагностические критерии – вертикальный горизонт в пределах верхних 100 см и содержание ила не менее 40% по всему профилю. Обязательные морфологические признаки – сликенсайды и клиновидные агрегаты, а также наличие трещин. Французская классификация различает понятия литовертисоли и топовертисоли. Литовертисоли развиваются *in situ* на продуктах выветривания различных пород с образованием большого количества смектитов. Именно поэтому литовертисоли относительно независимы от климата и могут встречаться в умеренном или континентальном климате. Они обычно приурочены к водораздельным поверхностям. Топовертисоли

формируются в понижениях или на ровных участках и имеют более влажный водный режим. Они обладают общими признаками вертисолей. Отличия от последних состоят главным образом в горизонте *SV* (прим.: структурный вертикальный), который является водоупором, насыщен щелочными и щелочноземельными катионами. Во влажный период в нем происходит неосинтез смектитовых минералов. Благодаря такому геохимическому функционированию топовертисоли развиваются в направлении «самоусиления». Кроме того, во французской классификации выделяют паравертисоли. Это почвы, имеющие основные признаки вертисолей, однако их верхние горизонты содержат менее 40% ила и не имеют вертикальных признаков. Таким образом, паравертисоли соответствуют неравновесному состоянию почвы, когда она находится на пути эволюции в другой тип почв. Литовертисоли формируются в условиях атмосферного увлажнения и внешнего дренажа. Их верхним горизонтам характерны процессы выщелачивания. При слабых педотурбациях такие почвы со временем эволюционируют в паравертисоли и затем в планосоли. Таким образом, в процессе эволюции литовертисоли испытывают «де-вертисолизацию», то есть ослабление вертикальных свойств.

О проявлении признаков осолонцевания (Таблица 1), согласно новой классификации почв России, можно говорить при наличии в одном из гумусовых или срединных горизонтов таких морфологических признаков, как столбчатая или призматическая структура, повышенная плотность, потемнение окраски и присутствие глянцевых пленок по граням структурных отдельностей, обычно более темных, чем внутрипедная масса. Также диагностирует солонцеватый подтип в естественных и агрогенных почвах степных и сухостепных ландшафтов. В Мировой коррелятивной базе (IUSS Working Group WRB, 2014) выделяют натриковый горизонт (*Natric*) и квалификатор второго уровня солодик (*Solodic*), а также квалификатор (эндо-/гипо-)содик (*(Endo-/Hypo-)Sodic*). Морфологически *Natric* и *Solonic* характеризуются призматической, иногда блочной структурой, утяжелением гранулометрического состава на переходе от вышележащего к этим горизонтам (с коэффициентом в 1.2) и темноокрашенными глинистыми кутанами.

В сухом состоянии они твердые или чрезвычайно твердые. Однако *Solodic* не имеет обменного натрия и магния в ППК. Согласно Мировой коррелятивной базе Chernozems и Kastanozems могут характеризоваться только квалификатором «содик», который подразумевает только химическую диагностику (15% и более обменного натрия и магния в пределах 50 см толщи). Прочие модификации это квалификатора характеризуются меньшим содержанием обменного натрия и большим пределом обнаружения (до 1 м с поверхности). Классификация почв СССР (Классификация и диагностика почв СССР, 1977) выделяет род солонцеватых почв, который характеризуется наличием солонцеватого уплотненного горизонта с содержанием обменного натрия более 5% от емкости поглощения в пределах гумусового слоя.

В таблице 2 приведен список используемых признаков для классификации и диагностики признаков уплотнения разного генезиса и проведена сортировка по признакам, связанным с механической обработкой почв, признакам осолонцевания и слитогенеза. Таким образом, анализируя вышеизложенные подходы к классификации почв, можно заключить, что данные антропогенные и природные процессы имеют общую особенность – уплотнение. Уплотнение может проявляться в какой-то части генетического горизонта (например, в поверхностной части гумусового горизонта при агроуплотнении), либо быть характерно для всего генетического горизонта (например, срединный горизонт при осолонцевании), либо затрагивать несколько генетических горизонтов (например, гумусовый и срединный при сильно выраженном процессе слитогенеза). Для описания уплотненных почв используют следующие показатели: стратификация верхней части профиля почв на горизонты и их мощность, плотность и пористость почвы; форма агрегатов, четкость ребер и граней, сочетание видов структур, качество структуры; характер распространения корней, содержание обменных катионов в ППК и др. Важно отметить, что целый набор критериев используется как всеобщий для диагностики различных процессов, приводящих к уплотнению (нижняя часть таблицы 2), либо как общий для пары процессов (средняя часть таблицы 2).

Таблица 2. Список используемых признаков для классификации и диагностики уплотнения разного генезиса.

Признак	Механическое воздействие	Признаки осолонцевания	Признаки слитогенеза
Наличие поверхностей скольжения	0	0	1
Наличие клиновидных структурных отдельностей	0	0	1
Высокая (40 мг-экв и более) емкость поглощения	0	0	1
Смектитовые почвы	0	0	1
Наличие железистых новообразований	0	0	1
Явное проявление циклов набухания-усадки	0	0,5	1
Наличие глянцевых пленок (глинистых) по граням структурных отдельностей	0	1	0
Резкая дифференциация почвенного профиля на элювиальную и иллювиальную части	0	1	0
Наличие обменного натрия в ППК (более 15%)	0	1	0
Значение показателя рН более 8.5	0	1	0
Наличие обменного натрия в ППК (более 5%)	0	1	0,5
Содержание гранулометрической фракции менее 2 мкм - 30% или более	0	1	1
Слабая водопроницаемость	0	1	1
Глыбисто-призмовидная структура	0	1	1
Вязкий и пластичный во влажном состоянии	0	1	1
Мощность горизонта выше кого-то предела (15(25) см и более)	0	1	1
Повышенный гидроморфизм	0,5	0,5	1
Повышенная твердость в сухом состоянии	0,5	1	1
Наличие «плужной подошвы» в нижней части горизонта	1	0	0
Относительная плотность «плужной подошвы» увеличена на 10%	1	0	0
Горизонтальная делимость «плужной подошвы»	1	0	0
Признаки уплотнения могут проследиваться и за уплотненного горизонта	1	0	1
Глыбистая и порошковато-глыбистая структура поверхностного горизонта	1	0,5	0,5
Блоково-глыбистая структура	1	1	0
Низкая пористость	1	1	1
Суглинисто-глинистый гранулометрический состав	1	1	1
Затруднение или препятствие для коневых систем растений	1	1	1
Наличие трещин в сухом состоянии	1	1	1
Плотное сложение (1.3-1.6 г/см ³)	1	1	1
Наличие уплотненного горизонта в пределах 100 см от поверхности	1	1	1

Примечание: 1 – очевидно есть (классификационно), 0.5 – может быть (отмечают ряд экспертов), 0 – не диагностируется.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ УПЛОТНЕНИЯ

Воздействие техники приводит к увеличению плотности на всех почвах, но в наибольшей мере это проявляется на суглинистых и глинистых по гранулометрическому составу почвах. В ряде случаев оно не приводит к серьезным отрицательным последствиям, такие почвы можно разуплотнять и поддерживать высокий уровень устойчивости к переуплотнению при помощи агротехнических приемов. В других же случаях, почвенное уплотнение не только проявляется ярче: потеря естественной структуры, отсутствие пористости, образование подпахотных переуплотненных слоев и т.п.; но и агротехнические приемы либо не дают ожидаемого эффекта вовсе, либо дают только краткосрочное улучшение: первая часть сезона после обработки, первые годы после обработки (Сорокин А.С., Куст Г.С. Уплотнение черноземов правобережья реки Кубань // Почвоведение. 2015. № 1. С. 71-80.). В глобальном масштабе было оценено, что повышенному уплотнению подвержено около 68 млн. га пахотных земель мира (Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., Sombroek W.G. World map of the status of human-induced soil degradation. ISIRIS-UNEP, 1992), около половины таких земель расположены в Европе. В России около 10 % пашни уплотнено слабо, 50 % — средне, 40 % — сильно (Основы экологии и охраны окружающей среды / А.Г. Банников, А.А. Вакулин, А.К. Рустамов. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Колос, 1999. С. 97). Каштанов А.Н. приводит следующие цифры, что большие площади пахотных почв (порядка 40%) и пастбищ переуплотнены (Каштанов А.Н. Концепция устойчивого развития земледелия в России в XXI веке // Почвоведение. 2001. №3. С. 263-265.).

Уплотнение пахотного и подпахотного горизонтов почв нередко вызывает бóльшие опасения, чем дегумификация и вынос элементов питания, поскольку физические свойства (структура почвы и строение порового пространства) во многом определяют плодородие почв, условия жизнедеятельности почвенных организмов, перенос и накопление вещества, которые в процессе агрогенного воздействия разрушаются необратимо, либо крайне слабо восстанавливаются (Караваева Н.А., Герасимова М.И. Карта «Агрогенные изменения запасов гумуса и уплотнение почв» масштаб 1:10 млн. // Почвоведение. 1997. № 3. С. 301-309;

Бондарев А.Г., Кузнецова И.В., Сапожников П.М., 1994). Важно понимать, что переуплотнение почв имеет агрохимический и экономический эффект, этот процесс ведет к сокращению эффективности применения удобрений (более чем на 40%), к уменьшению урожайности (на 25 – 50%) и увеличению расходов горючего на 15% (Деградация и охрана почв, 2002).

Уплотнение может проявляться как в пахотном, так и в подпахотном горизонте почв. Почвы имеют повышенные показатели уплотнения в пахотном горизонте главным образом в силу своей генетической природы или эродированности, когда на поверхность выходят, как правило, более тяжелые по гранулометрическому составу срединные и нижние горизонты степных почв. Если повышенная плотность почв сохраняется несмотря на рыхление, то причиной могут быть исходные свойства почв, ухудшающиеся при смене естественного фитоценоза агроценозом. Подпахотное уплотнение обычно имеет более высокое варьирование значений, чем пахотное, даже в генетически сходных почвах. Однако, в литературных материалах редко анализируются причины повышенного уплотнения подпахотного слоя, каковыми могут быть: исходные свойства почв (в степной и сухостепной зоне таким обладают, например, почвы с признаками солонцеватости и с «вертиковыми» признаками), разнообразие агротехнических мероприятий и сроков их проведения, типов сельскохозяйственных машин, наконец, эродированность почв (Караваева Н.А., Герасимова М.И., 1997).

В физике почв разработана система понятий и оценок уплотнения (Переуплотнение пахотных почв: причины, следствия, пути уменьшения / Под ред. чл.-кор. АН СССР В.А. Ковды. М.: Наука, 1987. 216 с.) с поправками на гранулометрический состав и гумусированность почв, которые, по существу, отражают генетические различия почв. Под оптимальными параметрами (например, «оптимальная плотность») принято понимать такой диапазон значений (например, такого интегрального показателя как плотность почв), при котором достигается наивысший урожай полевой культуры, учитывая потенциал сорта, климата, технологии возделывания (Медведев В.В. Изменчивость оптимальной плотности сложения почв и ее причины // Почвоведение. 1990. № 5. С. 20-30.).

Оптимальное уплотнение – уплотненное состояние, при котором почва в результате набухания/усадки разуплотняется приблизительно до верхней границы оптимальной плотности. Верхняя граница этого интервала является критическим порогом уплотнения, ниже которого почва сохраняет способность восстановить исходные структурные связи (обратимое уплотнение). Нижней границей оптимальной плотности для субаридных и аридных принято считать 1 г/см^3 , ниже которой растения будут страдать от недостатка влаги и питательных веществ, так как они будут легко вымываться и не задерживаться в такой почве. При уплотнении выше критического порога связи не восстанавливаются, сохраняется излишнее уплотнение или небольшая остаточная деформация (необратимое уплотнение); наконец, фиксируется переуплотнение почв, когда плотность достигает настолько высоких значений, что даже при максимальном саморазуплотнении в результате набухания/усадки оптимальная величина плотности не может быть достигнута. В этом случае говорят о нижней границе переуплотнения, фиксирую переход через порог критической плотности, который, например, для черноземов составляет $1.3 - 1.4 \text{ г/см}^3$ (Деградация и охрана почв, 2002).

Таким образом, пространственная дифференциация уплотнения определяется как генетической природой почв, так и агрогенным воздействием, которое способно существенно изменить исходную плотность. Караваева Н.А. – (Караваева Н.А., Герасимова М.И., 1997) подчеркивает, что при оценке уплотнения пахотного и подпахотного слоев, по-видимому, важно осознавать его природу – генетическую или агрогенную, что будет способствовать оптимизации мероприятий по его устранению.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВ. СЛИТОГЕНЕЗ

Для России хорошо изученными ареалами распространения слитоземов (синоним «вертисолей») и слитизированных (синоним «с вертикальными признаками») почв можно считать Северный Кавказ, Волго-Ахтубинскую пойму, лиманы Прикаспийской низменности. Уплотненные почвы с признаками слитогенеза встречаются и в других районах, но литературные сведения об их распространении отрывочны (Хитров Н.Б. Слитогенез в почвах Центрально-черноземных областей России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 935–943.).

Понятие слитость, слитогенез, слитизация, слитая почва и слитозем не всегда одинаково используются в отечественной литературе. Однако все авторы сходятся в одном – такие почвы имеют хотя бы один крайне уплотненный горизонт в своем профиле (Ковда И.В., 2004; Слитоземы и слитые почвы, 1990). Согласно «Базовым шкалам...» термин «слитой» может быть применен только к несцементированным морфологическим элементам, которые в сухом состоянии характеризуются очень высокой прочностью и твердостью, и обладают низкой пористостью, то есть поры, видимые невооруженным глазом, отсутствуют. Однако во влажном состоянии они мягки и пластичны, для них характерно высокая степень набухания (Базовые шкалы свойств морфологических элементов почв. М.: ВАСХНИЛ, Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1982. 55 с.).

При характеристике слитых почв по мнению И.В. Ковда (Ковда И.В. Географические закономерности, факторы и прогноз трансформации слитости почв // Почвоведение. 1995. № 6. С. 695–704.) целесообразно рассматривать три понятия. Первое – это потенциальная слитость, т.е. потенциальная способность почв к сильному уплотнению, проявляющаяся в высокой твердости, объемной массе, набухании, усадке. Потенциальная слитость зависит от химического, минералогического и гранулометрического состава, содержания органического вещества, водопрочности структуры. Большая часть этих свойств наследуется почвами от почвообразующих пород и претерпевает изменения в ходе почвообразования.

Вторым важным понятием является слитизация. Это процесс, который вслед за Розановым Б.Г. (Розанов Б.Г. Генетическая морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 293с.), Ковда И.В. (Ковда И.В., 1995) понимает, как растрескивание и формирование блочной структуры при контрастных условиях увлажнения. То есть слитизация имеет место только при наличии разбухающих компонентов и контрастных условий для циклов увлажнения-иссушения, усадки, растрескивания и набухания. Интенсивность слитизации определяется в первую очередь сочетанием глинистого гранулометрического состава, разбухающих минералов и особенностями климатических условий региона: общим количеством осадков, температурой, динамикой их изменения. Режим увлажнения-иссушения при этом будет зависеть от положения почв в рельефе, густоты растительного покрова, наличия грунтовых вод и микрорельефа. Таким образом, слитизация – это актуальное проявление (реализация) потенциальной слитости почв в конкретных физико-географических условиях, которую Ковда И.В. (Ковда И.В., 1995) предлагает называть актуальной слитостью. Активность процесса слитизации видна по формированию блочной структуры поверхностных горизонтов. Актуальная слитость испытывает сезонные колебательные изменения в процессе уплотнения и разуплотнения почв, а общее ее состояние связано с трансформацией минеральной части почв.

Слитогенез – третье важное понятие, используемое при рассмотрении генезиса слитоземов. Ковда И.В. и др. (Ковда И.В., Моргун Е.Г., Алексеева Т.В. Формирование и развитие почвенного покрова гильгай (на примере Центрального Предкавказья) // Почвоведение. 1992. № 3. С. 19–34.) предлагают рассматривать слитогенез наряду с такими общими почвообразовательными макропроцессами как черноземный, подзолистый, солонцовый и др. Однако, в отличие от них, он обладает цикличностью саморазвития, которая заключается в усилении или ослаблении контрастности комплексного почвенного покрова при дальнейшей эволюции. Слитогенез, по мнению этих авторов, состоит из ряда элементарных почвенных процессов (ЭПП). В зависимости от биоклиматических и прочих условий почвообразования, их набор и интенсивность могут несколько изменяться.

В слитоземах изученных авторами региона (Центральное Предкавказье) выделены следующие основные ЭПП: гумусонакопление, рассоление, окарбоначивание, ферритизация, оглеение, рассолонцевание, трансформация глинистых минералов, слитизация, микропедотурбации.

Существует целый ряд гипотез о развитии слитогенеза и происхождении слитых почв. Во-первых, существуют гипотезы о деградации «нормальных» почв в слитые, которая происходит при освобождении имеющихся в больших количествах коллоидов как одно из следствий потери части поглощенного Са в процессе деградации чернозема (Волобуев В.Р. О слитых черноземах // Почвоведение. 1948. № 11. С. 670-677.), а также увеличения количества гидрофильных коллоидов (Козловский Ф.И. Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв (на примере степной зоны). Автореф. дис. ... геогр. н. М., 1987. 50с.). Во-вторых, целая группа авторов (Тыртышный В.П. К вопросу о генезисе слитых черноземов // Тр. Азово-Черномор. Селекцентра. 1936. Вып. 1. С. 10-15; Быстрицкая Т.Л., Тюрюканов А.Н. Черные слитые почвы Евразии. М.: Наука, 1971. 255с.) развивала представление о палеогидрогенном происхождении слитых почв (Краснодарского края, левобережье Кубани) - из пойменных почв в результате эволюции территории в долинном (геоморфологическом) цикле. Они выделяли стадии развития: 1) иловая (подводная), происходит накопление ила в условиях спокойной седиментации; 2) лугово-болотная и луговая стадии с переменным режимом увлажнения и внутрипочвенного гидроморфизма, за счет чего намечаются процессы «пульсирующей» редукции железа, сопровождающиеся многократным метаморфизмом соединений железа. 3) современная, переходная к степной стадии, в результате которой профиль пропитывается окисленными соединениями железа, которые в процессе обезвоживания и кристаллизации при иссушении приводят к цементации почвенной массы. Похожие стадии и процессы были выделены и в Волго-Ахтубинском пойме (Козловский Ф.И., Корнблум Э.А. Мелиоративные проблемы освоения пойм степной зоны. М.: Наука, 1972. 220с.). Другие с помощью расчетов энергетических характеристик (Березин П.Н., Воронин А.Д., Шеин Е.В.

Структура почвы: энергетический подход к количественной оценке // Почвоведение. 1983. № 10.) показали, что процесс слитизации заключается в разрушении цементационных связей, усилении удельной пористости почвенных фрагментов при максимальном иссушении, увеличении потенциального набухания (Березин П.Н., Воронин А.Д., Шеин Е.В. Физические основы и критерии слитогенеза // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1989. № 1. С. 31-38; Березин П.Н. Диагностика потенциальной и актуальной слитости по физическим критериям // Почвоведение. 1990. № 5. С. 65-75). Существует гипотеза о разрыве межчастичных связей, перегруппировке вещества под действием давления набухания при увлажнении с последующим уплотнением и упрочнением новых контактов во время усадки при высыхании (Корнблум Э.А., Любимова И.Н. Почвенные факторы и механизм слитообразования. Прогноз слитообразования в орошаемых почвах (гипотеза и основные направления исследования) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В.Докучаева. 1972. Вып. 5. С. 138-152). В развитии своих взглядов на формирование слитых почв авторы говорят о последовательности тесно связанных с друг другом процессов: а) «подготовительные» изменения вещественного состава, поверхностных свойств и строения почв, далее б) «консолидационные» процессы, непосредственно формирующие слитое сложение, и наконец в) развитие особых твердостных свойств за счет новых внутренних связей, возникающих вследствие уплотнения почвы и изменения ее поверхностных свойств (Корнблум Э.А., Любимова И.Н., Иванов А.М. О роли изменений плотности и твердости в образовании слитых черноземов Кубани // Почвоведение. 1977. № 1. С. 14-30). Еще одна гипотеза предполагает наличие двух стадий процесса: 1) предслитизация, включающая уплотнение, а иногда выщелачивание и экранирование очага со стороны вышележащего горизонта подпахотного уплотнения (например, «плужной подошвы»); 2) собственно слитизация – дальнейшее уплотнение с развитием специфической холодной окраски почвы, блоковой структуры, системы вертикальных (магистральных) и субгоризонтальных трещин (Козловский Ф.И., Целищева Л.К. Об антропогенной деградации южного чернозема в связи с

уплотнением // География и генезис антропогенно-измененных и естественных почв. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В.Докучаева. М., 1986. С. 62-71.).

Как было отмечено в начале, представления различных исследователей о генезисе слитых почв порой сильно различаются. В рамках выбора диагностических критериев слитогенеза Хитров Н.Б. (Хитров Н.Б. Выбор диагностических критериев слитогенеза с степени его выраженности // Почвоведение. 2003. № 10. С. 1157-1167.) приводит обобщенный список, который включает в себя следующие явления: образование илистой фракции и смектитовых глинистых минералов; передвижение клеящих веществ (таких как гумус, аморфный кремнезем, гидроокислы железа), фиксирующих частицы в сухом состоянии; уплотнение и изменение исходной структуры материала; высокая амплитуда набухания и усадки материала в циклах увлажнения-иссушения; сдвиговые явления. В своей монографии Хитров Н.Б. (Хитров Н.Б. Генезис, диагностика, свойства и функционирование глинистых набухающих почв Центрального Предкавказья. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 505с.) отмечает, что развитие «слитых» почв может сопровождаться как увеличением плотности исходной породы или почвы, так и частичным разуплотнением очень плотных пород, а также сохранением исходно высокой плотности почвообразующих пород. Например, он приводит такой пример, что «майкопские глины имеют плотность при естественной влажности 1.6-1.8 г/см³, а черноземовидные слитоземы, развивающиеся на их элювии, как правило, 1.3-1.6 г/см³, в отдельных случаях достигая 1.8 г/см³». Поэтому, слитогенез не всегда ведет к переуплотнению почв («безвозвратному» уплотнению). Но следует учитывать, что развитие слитогенеза предполагает наличие плотности почвы выше некоторого предела, величина которого зависит от минералогического, гранулометрического состава почвы и ряда иных условий.

ОСОБЕННОСТИ АГРОГЕННОЙ ПРИРОДЫ УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВ ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

Почвообразующей породой почв Западного Предкавказья являются лессовидные суглинки, которые имеют склонность к просадке в результате увлажнения. Ачканов А.Я. (Ачканов А.Я., Николаева С.А., 1999) указывает, что общей особенностью Кубано-Приазовской низменности являются слабые уклоны местности, при которых даже небольшие препятствия поверхностному и грунтовому стоку во влажные годы могут привести к переувлажнению почв на плакоре. В результате появления переувлажненных земель в агроландшафтах степной зоны на водораздельных пространствах, где распаханые земли составляют почти 90% площади, усложняется структура почвенного покрова и снижается агрономическая ценность пахотных земель. Часть площадей выпадает из пашни, создаются определенные трудности при обработке массивов таких земель.

Считается, что черноземные почвы обладают высокой устойчивостью к внешним воздействиям. Повышенное содержание гумуса и глин смектитового типа, что свойственно черноземам, предопределяя в какой-то степени буферность по отношению к воздействию химических реагентов, определило в то же время чрезвычайную чувствительность их к изменению гидрологического фактора, в частности, к увеличению увлажнения. Наименее устойчивым при этом оказались свойства, характеризующие физическое состояние черноземов, что неизбежно влечет за собой нарушение сбалансированности не только водного и воздушного режимов, но и окислительно-восстановительного состояния почв, карбонатно-кальциевого равновесия, гумусного состояния. Систематически повторяющееся переувлажнение черноземов, приуроченных к отрицательным формам рельефа, оказывает особенно глубокое воздействие на почвы.

Происхождение бессточных понижений - мочаров, на водоразделах Ачканов А.Я. и др. – (Ачканов А.Я., Николаева С.А., 1999), связывают с естественным генезисом и с влиянием сельскохозяйственного использования. В первом случае говорят о процессе формирования современной поверхности данной территории в

голоцене, завершившемся уже в историческое время. В общих чертах этот процесс заключается в отступлении моря и заполнении осушенной поверхности лессовидными отложениями. Площади мочаров и длительность переувлажнения почв в них значительно варьируют в зависимости от климатических показателей конкретного года. В сухие годы почвы мочаров могут вообще не испытывать переувлажнения; во влажные - длительность периода переувлажнения достигает 2 – 4 месяца. Важно и то, что, однажды возникнув, они уже никогда не исчезают бесследно, и черноземы в течение короткого времени (нередко через 1-3 года) трансформируются в лугово-черноземные или черноземно-луговые почвы.

В процессе же сельскохозяйственного использования территории происходило перегораживание поверхностного и внутрипочвенного стока по тальвегам мелких балок различными препятствиями типа лесополос, полевых дорог, автодорог с насыпью. Формирование замкнутого понижения ускоряется, если вдоль лесополосы проложена полевая дорога. Уплотнение почв под влиянием тяжелой техники, как отмечает Бондарев А.Г. (Бондарев А.Г. Проблема уплотнения почв сельскохозяйственной техникой и пути ее решения // Почвоведение. 1990. № 5. С. 31-37.) начинаются при условии, что внешнее воздействие превышает ее прочность. Влажность почвы в момент воздействия на нее сельскохозяйственной техники является важнейшим фактором, определяющим степень уплотнения при одной и той же внешней нагрузке. Значительное повышение уплотнения почвы с возрастанием влажности при одной и той же нагрузке показано многими исследователями (Изменение агрофизических свойств почв под воздействием антропогенных факторов, 1990; Сапожников П.М. Деградация физических свойств почв при антропогенных воздействиях // Почвоведение. 1994. № 11. С. 60-67.). В результате происходит потеря структурной прочности из-за смыкания части макропор и большинства крупных межагрегатных микропор и формируется более плотная и однородная микроструктура. Одновременно возрастает содержание мелких межагрегатных и внутриагрегатных микропор (Соколов В.Н. Проблема лёссов // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 86–93.). Последующим результатом этого является образование местного водоупора,

снижение водопроницаемости, стимулирование дальнейшего застоя влаги на поверхности почв и локальное образование луж, которые долго сохраняются после поливов или обильных осадков. При таких условиях существует большая вероятность захода сельскохозяйственной техники на поле с повышенной влажностью почвы, когда несущая способность почвы резко понижена. Все виды работ с заходом техники на поле могут обусловить текстурное уплотнение, которое не уменьшится при общем рыхлении, хотя общая плотность почвы в целом может иметь приемлемые значения (Березин П.Н., Воронин А.Д., Шеин Е.В., 1989). Скопление влаги, даже временное, в пониженных элементах рельефа неизбежно активизирует процессы элювиирования из почвенной толщи не только легкорастворимых соединений, но и карбонатов кальция, железа и марганца, железо-органических соединений, коллоидно-дисперсного материала, что создает предпосылки для текстурной реорганизации почвенной массы (Корнблум Э.А., Любимова И.Н., Иванов А.М., 1977).

В итоге многие исследователи почв Западного Предкавказья начали указывать на генетическую природу уплотнения почв (Ачканов А.Я., Николаева С.А., 1999; Безуглова О.С., Назаренко О.Г. Генезис и свойства мочаристых почв Предкавказья // Почвоведение. 1998. №12. С. 1423-1430; Власенко В.П. Развитие гидроморфизма в почвах западных агроландшафтов Западного Предкавказья // Почвоведение. 2009. №5. С. 532-539; Елисеева Н.В. Физические свойства и режим влажности слитых черноземов западного Предкавказья // Почвоведение. 1983. №4. С.56-62; Сорокин А.С., Куст Г.С., 2015), то есть на наличие в данном регионе слитых почв или на проявлении «вертикальных» признаков в черноземных почвах, о которой говорилось ранее.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВ. ОСОЛОНЦЕВАНИЕ

Помимо черноземов и черноземных почв признаки слитости, то есть сильно выраженные признаки уплотнения, в яркой форме характерны для солонцов и солонцеватых почв. Однако важнейшие диагностические признаки для последних заключаются не только в слитости, но в первую очередь в наличии обменного натрия, элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля, щелочной реакции среды (Слитоземы и слитые почвы, 1990).

На Русской равнине солонцы и солонцеватые почвы встречаются локально как элементы почвенного покрова. Почвы солонцовых комплексов известны в разных регионах: в степной, сухостепной, полупустынной и пустынных зонах среди черноземов, каштановых, бурых полупустынных, серо-бурых пустынных почв и их полугидроморфных и гидроморфных аналогов (Антипов-Каратаев И.Н. Вопросы происхождения и географического распространения солонцов СССР / Мелиорация солонцов в СССР. М., 1953. С. 11-266.). Ареалы распространения солонцов и солонцеватых почв ограничиваются на юге пустынными почвами (индекс сухости Будыко – 3), а на севере – почвами нечерноземной зоны (индекс – менее 0.8).

Согласно «Классификации и диагностике почв СССР» (Классификация и диагностика почв СССР., 1977), «...к солонцам относятся почвы, имеющие (или имевшие) в гумусовом горизонте такое количество обменного натрия (при практическом отсутствии легкорастворимых солей), которое обуславливает развитие в почвах комплекса специфических свойств: щелочную реакцию, образование соды, большую растворимость органического вещества и подвижность пептизированных коллоидов, высокую дисперсность почвенного минерального мелкозема, вязкость, липкость и набухание почвы во влажном состоянии и сильное уплотнение и твердость при иссушении. Солонцы обладают малой водопроницаемостью и слабой физиологической доступностью влаги.

Таким образом признаки уплотнения проявляются в срединном иллювиальном горизонте солонцов и солонцеватых почв, формирование которого связывают с рядом явлений: 1) увеличивается доля илистых частиц, не связанных

в агрегаты. Обычно в таких ситуациях говорят о пептизации ила. Во многих работах была установлена существенно более высокая доля так называемого водно-пептизированного ила (до 20-90% от общего содержания ила) в солонцовом горизонте по сравнению с другими горизонтами различных почв (Большев Н.Н., Капустина Н.А. Природа, состав и свойства поглощенного комплекса солонцов // Почвоведение. 1964. № 2. С. 32-41; Горбунов Н.И. Минералогия и физическая химия почв. М.: Наука, 1978. 293 с.); 2) многие силикатные и алюмосиликатные минералы в щелочной среде разрушаются, подвергаясь так называемому щелочному гидролизу. В результате образуются аморфные соединения кремния, алюминия, железа (Панов Н.П., Гончарова Н.А. Особенности генезиса малонатриевых солонцов степной зоны // Тр. ин-та почвоведения и агрохимии. Ереван, 1971. Вып. 6. С. 503-507.), которые способны выступать в роле клеящих веществ, такое же явление было указано и для слитоземов; 3) пептизированные коллоиды и растворенные гумусовые вещества могут перемещаться вниз по профилю почвы. Этим объясняют формирование текстурно-дифференцированного профиля, который включает облегченный по гранулометрическому составу поверхностный горизонт, из которого илистые частицы иллювируются в нижележащий горизонт (солонцовый), который становится более тяжелым по гранулометрическому составу, за счет накопления этих частиц в виде натечных кутан на гранях структурных отдельностей (Антипов-Каратаев И.Н., 1953).

Также к числу важных факторов развития отрицательных свойств солонцовых почв многие исследователи относят водно-пептизированный ил (Горбунов Н.И., 1978), количественное распределение которого по профилю хорошо согласуется с морфологическими особенностями и физико-механическими свойствами исследованных много- и малонатриевых почв. Высокое содержание подвижной фракции ила, как указывалось выше, также характерно и для слитоземов и/или почв с вертикальными признаками, однако его количественное распределение не так явно согласуется с морфологическим строением (Сорокин А.С., Куст Г.С., 2015). Однако, при этом остается открытым вопрос об их источнике

в почвах. Также не ясен вопрос о том, являются ли они причиной или следствием солонцеватости и слитогенеза.

Солонцы и солонцеватые почвы, как и другие, могут претерпевать разнонаправленные эволюционные процессы при изменяющихся условиях, то есть, как правило, либо происходит нарастание степени выраженности морфологических проявлений солонцеватости при прогрессирующем осолонцевании, либо наблюдаются остаточные морфологические признаки солонцеватости при трансформации или разрушении солонцового горизонта. В целом нарастание степени выраженности морфологических проявлений солонцеватости выражается в усилении массивности, монолитности, прочности структуры в солонцовом горизонте. И наоборот у процессов трансформации и разрушения солонцового горизонта происходит уменьшение крупности, глыбистости, массивности в элементах структуры (Куст Г.С. Диагностика степени солонцеватости почв по морфологическим критериям // Вест. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1988. № 2. С. 26-33).

В заключении к обзору литературы по проблеме уплотнения почв степной зоны хотелось бы подчеркнуть ряд изложенных моментов, а именно:

- 1) Уплотнение почв является полигенетическим процессом, обусловленным антропогенными и природными явлениями, которые способны существенно изменить исходную плотность.
- 2) Уплотнение разного генезиса имеет свою специфику, то есть происходит «неполная» конвергенция, которая проявляется в особенностях проявления уплотнения.
- 3) Уплотнение может проявляться в части генетического горизонта (например, в поверхностной части гумусового горизонта при агроуплотнении), либо быть показателем, характерным для всего генетического горизонта (например, срединный горизонт при осолонцевании), либо затрагивать один или несколько генетических горизонтов (например, гумусовый и/или срединный при сильно выраженном процессе слитогенеза).

- 4) Важно обращать внимание на такие общие понятия, как потенциальная склонность почв к переуплотнению и актуальные проявления этого переуплотнения. 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.
- 5) Хотя результат процессов агроуплотнения, слитогенеза и осолонцевания един – формирование горизонта(ов) с повышенной плотностью, методы разуплотнения, по всей видимости, для них должны различаться.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже было сказано ранее на характер и генетические особенности уплотнения влияют множество параметров (обработка почвы, положение в мезорельефе, гранулометрический состав, состав ППК и др.). Поэтому поставленная цель: *установить специфику формирования уплотнённых горизонтов в агрогенных почвах юга степной зоны Европейской территории России* – потребовала исследования многообразных по условиям образования, происхождению и свойствам различных типов почв степной зоны. Подбор 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.

«Кубань». Первым объектом являются почвы правобережья реки Кубань, расположенные на территории Кореновского и Усть-Лабинского районов Краснодарского края, относящиеся к Западной Предкавказской почвенной провинции степной зоны. Основную часть (90%) почвенного покрова составляют типичные карбонатные черноземы. Толщина гумусового слоя изменяется от 115 до 137 см. Почвы почти повсеместно распаханы, за исключением неудобий и речных пойм. Размер полей составляет в среднем от 50 до 100 га. Пологоволнистый рельеф определяет, как правило, незначительные (не более 2 м) перепады высот в пределах отдельных полей. Особенностью почвенного покрова этой территории правобережья р. 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 (Рисунок 2).



Рисунок 2. Объект исследования «Кубань», Кореновский и Усть-Лабинский районы Краснодарского края (Сервис Яндекс.Карты [Электронный ресурс]. ООО «ЯНДЕКС», 2015. Режим доступа: <http://www.maps.yandex.ru>).

Примечание: белая округлая форма – область изучаемого объекта (центр N45.288860; E039.6912).

«Маркс». Вторым объектом являются почвы левого берега реки Малый Караман, расположенные на территории Марксовского района Саратовской области, на левом берегу реки Волги. Изучаемая территория принадлежит к заволжской провинции обыкновенных среднегумусных и южных малогумусных чернозёмов. На территории провинции преобладают южные чернозёмы тяжёлого гранулометрического состава, на выходах засоленных коренных пород – солонцеватые чернозёмы и солонцы. Земледельческая освоенность провинции составляет в среднем 56%. Левобережье Волги представляет собой низкую слабоволнистую равнину древних Волжских террас и является наиболее

засушливой частью чернозёмной зоны в пределах европейской территории страны. В 1974-75 гг. были выполнены крупные работы по развитию орошения в этой зоне. Наряду с увеличением объема производства сельскохозяйственной продукции были отмечены негативные экологические последствия, в том числе и для сопредельных территорий: изменение гидрологического режима, подтягивание солей к поверхности. 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 (Рисунок 3).



Рисунок 3. Объект исследования «Маркс», Марковский район Саратовской области (Сервис Яндекс.Карты [Электронный ресурс]., 2015).

Примечание: белая округлая форма – область изучаемого объекта (центр N51.709935; E047.1644).

«Энгельс». Третьим объектом являются почвы выположенного участка второй террасы левого берега реки Волги на территории Энгельского района Саратовской области. Как и второй объект, изучаемая территория относится к

заволжской провинции обыкновенных среднегумусных и южных малогумусных чернозёмов. Данный объект интересен тем, что на сравнительно малом удалении расположены орошаемые и богарные (неорошаемые) участки. 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, рассоление (Рисунок 4).



Рисунок 4. Объект исследования «Энгельс», Энгельсский район Саратовской области (Сервис Яндекс.Карты [Электронный ресурс]., 2015).

Примечание: белая округлая форма – область изучаемого объекта (центр N51.384558; E046.0591).

Опираясь на обзор литературы, факт наличия уплотнения в верхней части профиля почв, сформированных в разных экологических условиях, позволил нам предположить, что сходные признаки уплотнения, нашедшие свое отражение в изменении структуры, плотности, твердости, видимой пористости, угнетение

культурной растительности – имеют различную специфику формирования уплотненных горизонтов. После первичной обработки полевых данных, были выбраны почвы с признаками уплотнения в верхней части профиля (не глубже 1 метра) для более детального рассмотрения: исследования особенности состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных горизонтов разных типов почв, применяя комплекс методов: морфометрический, микроморфологических и томографический.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При морфологическом полевом исследовании (согласно, Розанов Б.Г. Морфология почв. Учебник для высшей школы. М.: Академический проект, 2004. 432 с.) особое внимание уделяли стратификации и разделению верхней части профиля: пахотного горизонта, подпахотного горизонта и нижележащего гумусированного либо срединного горизонта (согласно Классификация и диагностика почв России, 2004) – подробнее об этом изложено в главе «Морфологические особенности почв». Подтверждение морфологических проявлений уплотнения и дезагрегации почвенной массы верхней части профиля исследованных почв искали в особенностях физических, физико-химических, химических и минералогических свойств, которые были изучены классическими методиками (Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416с; Воробьева Л. А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.):

- гранулометрический состав (методом пипетки с пирофосфатной пробоподготовкой);
- плотность почвы (буровым методом);
- 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 Пфедффера);
- содержание органического углерода (методом Тюрина).

А также, минералогический состав илистой фракции (рентгенографическим методом) на кафедре химии почв ф-та почвоведения МГУ, подготовка образцов ила проведена по методу Горбунова (Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах: Уч. пособие. Тула: Гриф и К, 2005. 336с.).

Для выявления особенностей состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных горизонтов разных типов почв были применены следующие методы:

- морфометрические по Скворцовой (Скворцова Е.Б., 1994);
- микроморфологические исследования (шлифы для анализа были изготовлены Лебедевым М.А. в лаборатории минералогии и микроморфологии почв Почвенного института имени В.В. Докучаева) выполнены по классическим методикам (Stoops G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin section. Published by soil Sci. Soc. Am. Inc. Madison, Wisconsin, USA. 2003. 184 p.);
- томографические исследования (анализ агрегатов выполнен в лаборатории физики и гидрологии почв Почвенного института имени В.В. Докучаева) выполнены руководствуясь следующими наработками (Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В., 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая комплексный характер явлений, для диагностики существования уплотнения недостаточно одного какого-либо показателя, а необходим комплекс взаимосвязанных показателей: условий и следствий единого почвообразовательного процесса, взаимодействие которых происходит во времени и отражает процессы, происходящие в почвенном теле (Куст Г.С. Диагностические критерии степени солонцеватости южных черноземов // Почвоведение. 1985. №10. С. 23-30.). Для этих целей совокупность возможных характеристических признаков целесообразно разделить на такие категории, которые бы отражали 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

При изучении морфологических особенностей почв были поставлены следующие подзадачи:

- а) Описать признаки уплотнения почв с помощью набора показателей, составленного из обзора литературы.
- б) Выяснить характер распределения выбранных показателей по профилю почв.
- в) Выбрать почвы с наиболее яркими признаками уплотнения.

Для выявления актуальных проявлений уплотнения при морфологическом полевом исследовании почв (согласно Розанов Б.Г., 2004) были описаны такие показатели как стратификация верхней части профиля почв на горизонты и их мощность, плотность и пористость почвы; форма агрегатов, четкость ребер и граней, сочетание видов структур, качество структуры; характер распространения корней.

Стратификация верхней части профиля в почвах объектов «Кубань» и «Энгельс» выражена таким образом, что верхняя часть гумусовой толщи разделена на следующие горизонты: пахотный, подпахотный и собственно гумусовый, которые получили следующие символичные обозначения: Ap, Apd и A, соответственно. В отличие от них, почвы объекта «Маркс», не имея такой мощной гумусовой толщи, стратифицируются по-другому: верхняя часть профиля разделена на горизонты: пахотный, подпахотный (который может быть, как частью гумусовой толщи, так и срединным горизонтом) и собственно срединный; которые получили следующие символичные обозначения Ap, Apd или Bd, B, соответственно (согласно Классификация и диагностика почв России, 2004).

И так, пахотный горизонт выделялся по следующим признакам: 1) поверхностный горизонт, который формируется в результате длительной распашки почв, имеет ясно выраженную нижнюю границу, переход заметен по структуре и сложению к уплотненному нижележащему подпахотному горизонту, пожнивные остатки обычно сосредоточены на этой границе. Однако, для каждого объекта есть своя специфика.

На объекте «Кубань» при ливневых осадках после высыхания на поверхности формируется пористая корка мощностью до 2 см, со временем распадающаяся на мелкие отдельности, а в засушливый период на полях, не подвергающихся промежуточным механическим обработкам (боронованию и прочее), без дернины четко стратифицируется на два субгоризонта:

Ar' – мощностью 4-5 см, поверхностный рыхлый слой, (мелко)комковато-зернистый или (мелко)ореховатый; и

¹Ar – мощностью 22-25 см, отличается от вышележащего резким укрупнением структуры до крупнокомковато или (ореховато)-глыбистой, увеличением твердости и плотности, сложение плотное структурное или плотное слабоструктурное.

Пахотные горизонты объектов «Энгельс» и «Маркс» по показателю мощность варьирует сильнее (от 10 до 21 см), чем на «Кубани»; имеют глыбистую структуру, плотноватое сложение и невысокую твердость.

Подпахотный горизонт в целом для всех объектов характеризуется тем, что отличается от выше- и нижележащего горизонтов большей массивностью сложения, укрупнением и усилением элементов ореховатости в структуре по сравнению с глыбистым пахотным горизонтом и их выраженностью: остротой ребер, ровностью граней. Однако, его морфологические признаки различались в пределах одной микрокатены, одного объекта и между объектами исследования, таким образом его генезис для нас был неоднозначен.

Подпахотные горизонты на объекте «Энгельс» в орошаемых и богарных условиях имеют как относительно схожие признаки: нижняя граница может опускаться до 23-31 см при мощности горизонта от 9 до 13 см; так и различные признаки: в орошаемых условиях - мягкий и плотноватый, не мешает свободному прохождению корневых систем растений в глубь профиля, когда в богарных - твердый и плотный, тем самым затрудняет проникновение корней. Также было

¹ Примечание: в настоящей работе мы будем говорить о свойствах и диагностических признаках именно этого субгоризонта Ar. Для простоты изложения мы будем ассоциировать его с пахотным горизонтом. В процессе отбора образцов для анализа верхняя рыхлая часть (Ar') пахотного горизонта отбрасывалась.

замечено, что в пределах одного агропроизводственного поля глубина вспашки сохранялась, исключением были локальные понижения (глубина вспашки и верхние границы горизонтов были ближе к поверхности, чем на плакоре и микросклоне).

На объекте «Маркс» подпахотные гумусированные горизонты сохранились только на плакоре и внизу пологого склона имеют мощность от 7 до 16 см, характеризуются комковато-ореховатой структурой, плотным сложением. На границе с пахотным фрагментарно встречается слой, для которого характерны более четкие и крупные ореховатые отдельности, плотно прилегающие друг к другу, однако корни свободно проникают в нижележащие горизонты как через агрегаты, так и по трещинам между ними. Подпахотные срединные горизонты представлены как карбонатными горизонтами (были вскрыты в верхней части склона сразу ниже пахотного горизонта, имеют мощность до 16 см), так и горизонтами с признаками осолонцевания (имеют мощность до 19 см, призмовидно-ореховатую структуру, гумусово-глинистые кутаны (порядка 20%) по граням структурных отдельностей, сеть вертикальных и горизонтальных трещин, плотные и твердые в сухом состоянии, однако при добавлении воды – размякают, проникновение корней затруднено и идет по трещинам, корни тонкие.

На объекте «Кубань» подпахотный горизонт имеет как сплошное залегание мощностью до 20 см, так и фрагментарное. В сухом состоянии монолитный и очень плотный, в увлажненном состоянии при небольшом усилии распадается на крупные орехи с острыми ребрами и стальным блеском по граням структурных отдельностей. Во влажном состоянии набухшие плотные горизонты отличаются водопроницаемостью, близкой к нулевой, что заметно по застаиванию влаги в микропонижениях в весенний период. Трещиноватость отмечается как в вертикальном направлении (крупные, от 4 до 5 см (иногда до 7 см), и глубокие, иногда до 80 см, трещины, особо заметные под пропашными культурами в рядах и междурядьях), так и горизонтальном (делящие массу подпахотного горизонта на слабовыраженные крупные “плиты” толщиной от 3 до 4 см). Проникновение корней затруднено.

Ниже подпахотного на объектах «Кубань» и «Энгельс» были описаны собственно гумусовые горизонты, которые имеют комковато-зернистую структуру, рыхлое структурное сложение, однако для «Кубани» характерна большая мощность (нижняя граница опускается от 115 до 137 см), когда в «Энгельсе» нижняя граница гумусового горизонта опускается до 70-73 см. В «Марксе» нижняя часть профиля представлена срединными горизонтами (с новообразованиями карбонатов кальция и после 70 см - гипса).

Как было показано выше, отмеченные проявления уплотнения в исследованных горизонтах неодинаковы как в качественном, так и в количественном отношении. Их группировка по характеру и выраженности морфологических признаков уплотнения представлена в Таблице 3 (выраженность возрастает в рядах для пахотных горизонтов от уплотненного ореховатого (1а), к переуплотненному монолитному (1в), и для подпахотных горизонтов от уплотненного фрагментарного (2а), к переуплотненному монолитному (2г)).

Как видно из представленной ниже таблицы (Таблица 3), 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.

Выполняя третью подзадачу данного раздела: выбрать почвы с наиболее яркими признаками уплотнения, были проанализированы микрокатены и выбраны одна или две для каждого объекта (Таблица 4), которые отвечали следующим требованиям, что в пределах микрокатены описаны почвы с наиболее ярко выраженными морфологическими признаками уплотнения (согласно Таблице 3 – близкие к последним группам 1в и 2в, 2г). Для них были выполнены лабораторные исследования основных генетически значимых свойств агрогенных почв степной зоны.

Таблица 3. Группировка уплотненных горизонтов почв по морфологическим признакам.

Показатель	Группа: индекс, рабочее 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	Плотноватый	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 (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)

Таблица 4. Список почв с яркими морфологическими признаками уплотнения, взятых для более детального анализа.

GPS	Участок	Горизонт	Группа	Положение в рельефе
Объект «Кубань»: две микрокатены 1_1с и 2_5ю				
N45.27671 E039.61512	1_1с_1	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (б)Уплотненный сплошной	Повышенные участки мезорельефа
N45.31634 E039.61985	2_5ю_1	Ap Apd A	(в)Переуплотнённый монолитный (в)Переуплотненный сплошной	Повышенные участки мезорельефа
N45.27350 E039.61117	1_1с_3	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (б)Переуплотненный сплошной	Участки склонов
N45.31814 E039.62117	2_5ю_3	Ap Apd A	(б)Уплотненный глыбистый (в)Переуплотненный сплошной	Участки склонов
N45.27783 E039.61187	1_1с_2	Ap Apd A	(б)Уплотненный глыбистый (г)Переуплотненный монолитный	Локальные пониженные участки мезорельефа
N45.32082 E039.62196	2_5ю_2	Ap Apd A	(в)Переуплотненный монолитный (г)Переуплотненный монолитный	Локальные пониженные участки мезорельефа
Объекты «Маркс»: одна микрокатена				
N51.71582 E047.13292	F2	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (в)Переуплотненный сплошной	Повышенные участки мезорельефа
N51.71889 E047.18005	F9	Ap Bd B	(а)Уплотненный ореховатый (а)Уплотненный фрагментарный	Участки склонов
N51.71973 E047.18126	F10	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (а)Уплотненный фрагментарный	Участки склонов
N51.71992 E047.19115	F13	Ap Bd B	(а)Уплотненный ореховатый (г)Переуплотненный монолитный	Локальные пониженные участки мезорельефа
Объект «Энгельс»: две микрокатены ЛС1-3 и ЛС7-8-Богара				
N51.39162 E046.05177	ЛС-3	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (а)Уплотненный фрагментарный	Повышенные участки мезорельефа
N51.37277 E046.06025	ЛС-8	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (а)Уплотненный фрагментарный	Повышенные участки мезорельефа
N51.39165 E046.05111	ЛС-2	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (а)Уплотненный фрагментарный	Участки склонов
N51.35928 E046.06412	Богара	Ap Apd A	(а)Уплотненный ореховатый (а)Уплотненный фрагментарный	Участки склонов
N51.39179 E046.05066	ЛС-1	Ap Apd A	(б)Уплотненный глыбистый (б)Уплотненный сплошной	Локальные пониженные участки мезорельефа
N51.38377 E046.05525	ЛС-7	Ap Apd A	(б)Уплотненный глыбистый (б)Уплотненный сплошной	Локальные пониженные участки мезорельефа

ПРОВЕРКА ГЕНЕЗИСА УПЛОТНЕНИЯ. ДИАГНОСТИКА АГРОУПЛОТНЕНИЯ

Плотность почвы, как отмечает Бондарев А.Г. (Бондарев А.Г., 1990), справедливо считается одним из важнейших показателей при определении агроуплотнения, являясь в значительной мере интегральным показателем физического состояния почвы. Также к немаловажному достоинству относится то, что плотность в равновесном состоянии достаточно устойчива и сравнительно легко определяется. Так из приведенного обзора научной литературы (см. главу «Распространение и особенности уплотнения») следует, что: 1) воздействие техники приводит к увеличению плотности на всех почвах; 2) существует система понятий и оценок уплотнения (Переуплотнение пахотных почв: причины, следствия, пути уменьшения, 1987) с поправками на гранулометрический состав и гумусированность (таблица 5) - уплотнение в наибольшей мере проявляется на суглинистых и глинистых по гранулометрическому составу почвах, содержание гумуса в которых невелико – 2-3% и менее (Физические и водно-физические свойства почв: Учебно-методическое пособие для студентов специальностей 2604.00 и 2605.00. М.: МГУЛ, 2002. 73с.).

Таблица 5. Оценка плотности сложения пахотного слоя почв суглинистого и глинистого гранулометрического состава (Физические и водно-физические свойства почв, 2002. С. 31).

Плотность, г/см ³	Оценка плотности сложения
<1,0	Рыхлое
1,0-1,2	Оптимальное (как правило, содержание гумуса более 4%)
1,2-1,3	Уплотненное
1,3-1,4	Плотное (как правило, содержание гумуса 2-3% и менее)
>1,4	Очень плотное (как правило, содержание гумуса 2-3% и менее)

Для того чтобы диагностировать наличие агроуплотнения и подтвердить отмеченные морфологические проявления уплотнения и дезагрегации почвенной массы были поставлены следующие подзадачи:

а) Изучить некоторые 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) Выделить почвы по совокупности с более яркими признаками уплотнения, чем агроуплотнение.

Как уже отмечалось ранее, одним из потенциальных факторов, способствующих развитию уплотнения, принято считать тяжелый гранулометрический состав (Переуплотнение пахотных почв: причины, следствия, пути уменьшения, 1987). Исследуемые почвы объекта «Кубань» определены как тяжелосуглинистые и легкоглинистые по классификации Качинского Н.А. (Качинский Н.А. Физика почвы. Часть 1. Высшая школа. М., 1965. 328с.) – содержание глины находится в пределах от 54 до 62% (Рисунок 5). В составе фракций преобладает илистая (от 32 до 38%), на втором месте – крупная пыль (от 27 до 35%). Обращает на себя внимание относительно меньшее содержание ила в верхних горизонтах почв автономных и транзитных ландшафтов, что вероятнее всего связано с активным выдуванием и перемещением тонких фракций дефляционными процессами, что наблюдалось нами в некоторые годы непосредственно. В аккумулятивных ландшафтах наблюдается обратная картина. Вместе с тем, достоверных различий исследуемых горизонтов по прямым показателям гранулометрического состава также не обнаруживается.

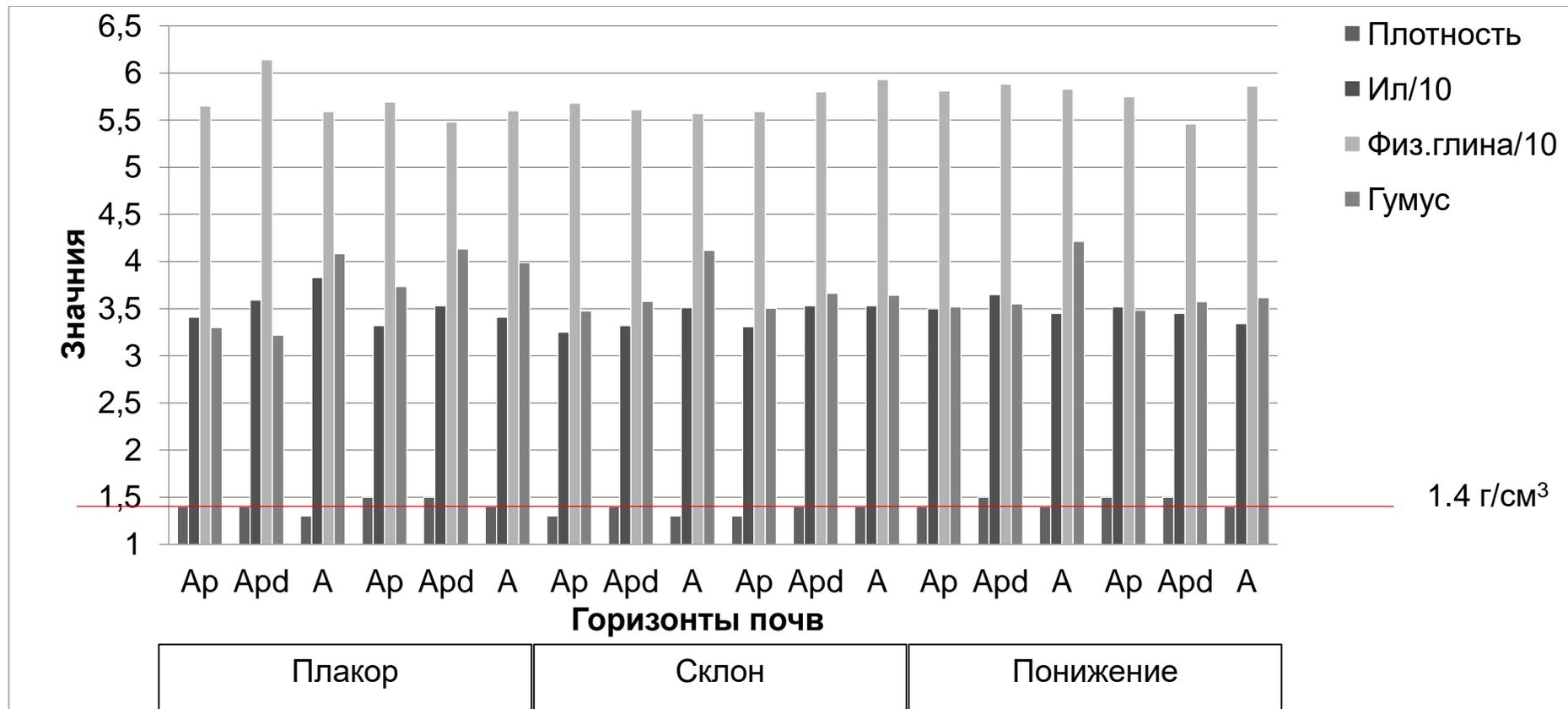


Рисунок 5. Некоторые физико-механические и химические свойства почв с яркими морфологическими признаками уплотнения. «Кубань».

Примечание: порядок расположения горизонтов (слева направо) соответствует порядку расположения почв (сверху вниз) в таблице 5. Плотность – плотность почв в г/см^3 ; 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/см^3 отмечена нижняя граница переуплотнения для черноземных почв.

Можно заметить некоторую тенденцию в увеличении гранулометрического показателя структурности (см. Приложение, Таблица 11) в верхних горизонтах исследуемых почв, но он проявляется не для всех случаев, и скорее указывает на большую способность к оструктуриванию именно тех горизонтов, в которых морфологические признаки уплотнения проявляются в большей степени, что вызывает определенные сомнения в применимости данного показателя для наших почв.

Почвы объекта «Маркс» имеют средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав по классификации Качинского Н.А. (Качинский Н.А., 1965) – содержание физической глины колеблется от 38 до 52% (Рисунок 6). Для них свойственно преобладание двух фракций: илистой (от 21 до 35%) и крупной пыли. 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 (нами были выявлены морфологические признаки солонцеватости почв – см. главу «Морфологические особенности почв»). 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% (см. Приложение, Таблица 12).

Практически все почвы объекта «Энгельс» характеризуются среднесуглинистым гранулометрическим составом, также встречаются легкосуглинистые. Содержание физической глины колеблется от 29 до 36% (Рисунок 7). Верхние горизонты почв не имеют существенных различий по содержанию физической глины (см. Приложение, Таблица 13), что, скорее всего, связано с тем, что при строительстве оросительных систем проводится планировка поверхности с целью равномерного распределения влаги.

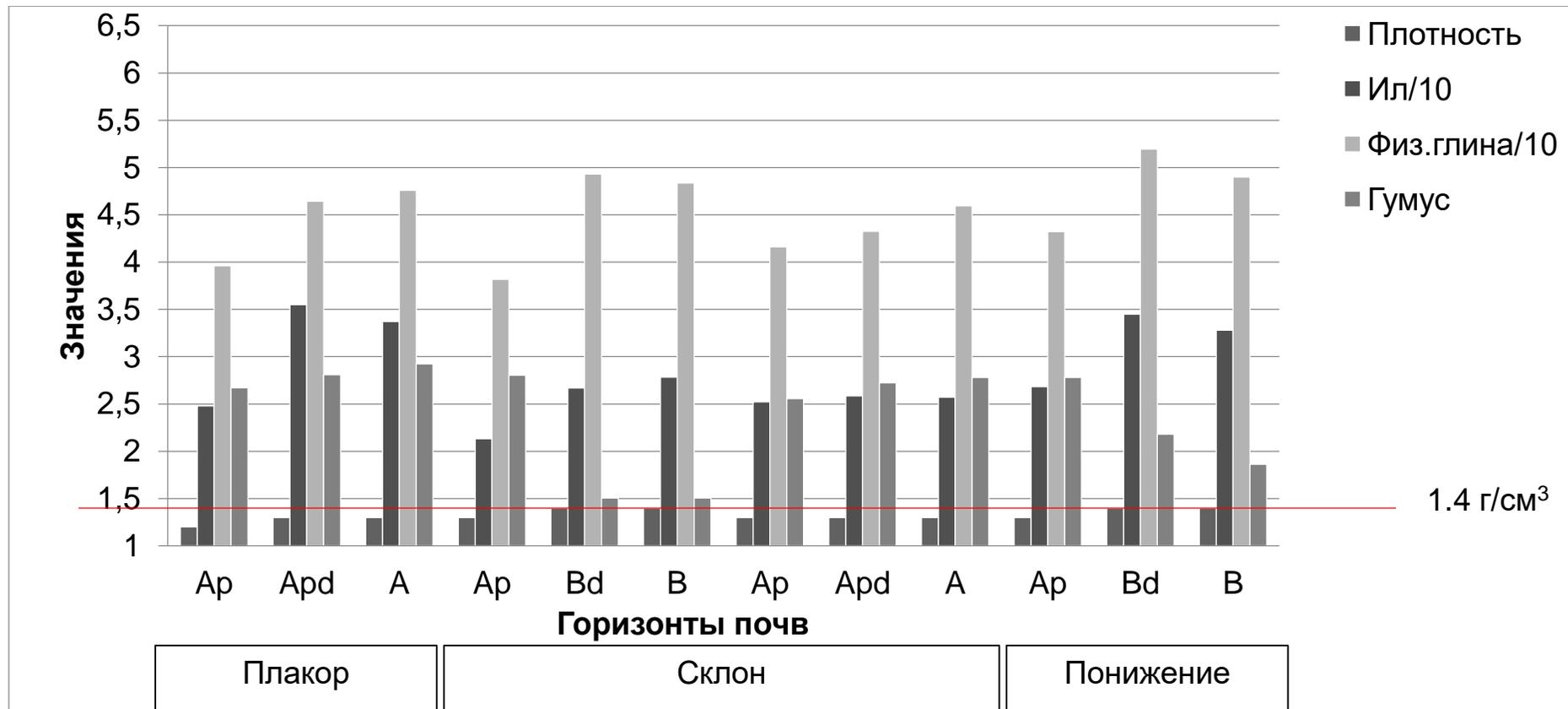


Рисунок 6. Некоторые физико-механические и химические свойства почв с яркими морфологическими признаками уплотнения. «Маркс».

Примечание: порядок расположения горизонтов (слева направо) соответствует порядку расположения почв (сверху вниз) в таблице 5. 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.

Однако содержание илистой фракции, как правило, увеличивается в подпахотном горизонте почв на 1-4%, что вероятнее всего связано, как и на объекте «Кубань», с выдуванием и перемещением тонких фракций дефляционными процессами. В целом содержание илистой фракции колеблется от 19 до 23.6 %.

По содержанию гумуса большая часть почв исследуемых объектов относится к градации слабогумусированных (менее 4%), лишь в ряде случаев в собственно гумусовых горизонтах объекта «Кубань» почвы можно считать малогумусными (от 4 до 6%) по Орлову Д.С. (Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1981. 272 с.). Как правило, содержание гумуса постепенно равномерно увеличивается с глубиной от пахотных до непахотных горизонтов (объекты «Кубань», «Энгельс» и частично «Маркс»), что вероятнее всего связано с его окислением в результате агротехнических мероприятий. А на объекте «Маркс» его содержание резко уменьшается при переходе к срединным горизонтам почв. По мощности гумусовой толщи современные почвы характеризуются как сверхмощные и мощные на объекте «Кубань», как среднемощные укороченные и маломощные на объекте «Маркс» и среднемощные и мощные на объекте «Энгельс» (было установлено, что орошение способствовало увеличению мощности прогумусированной толщи. Средняя мощность гумусового горизонта на орошаемых участках по сравнению с неорошаемыми больше на 3-14 см. Однако связать этот факт исключительно с ростом увлажнения почв, интенсифицирующим гумусообразованием и нисходящую миграцию водорастворимых органических веществ с насыщением ими минеральной массы нижней части профиля нельзя в связи с тем, что данная территория при проектировке оросительной сети была спланирована и такая мощность могла сложиться изначально).

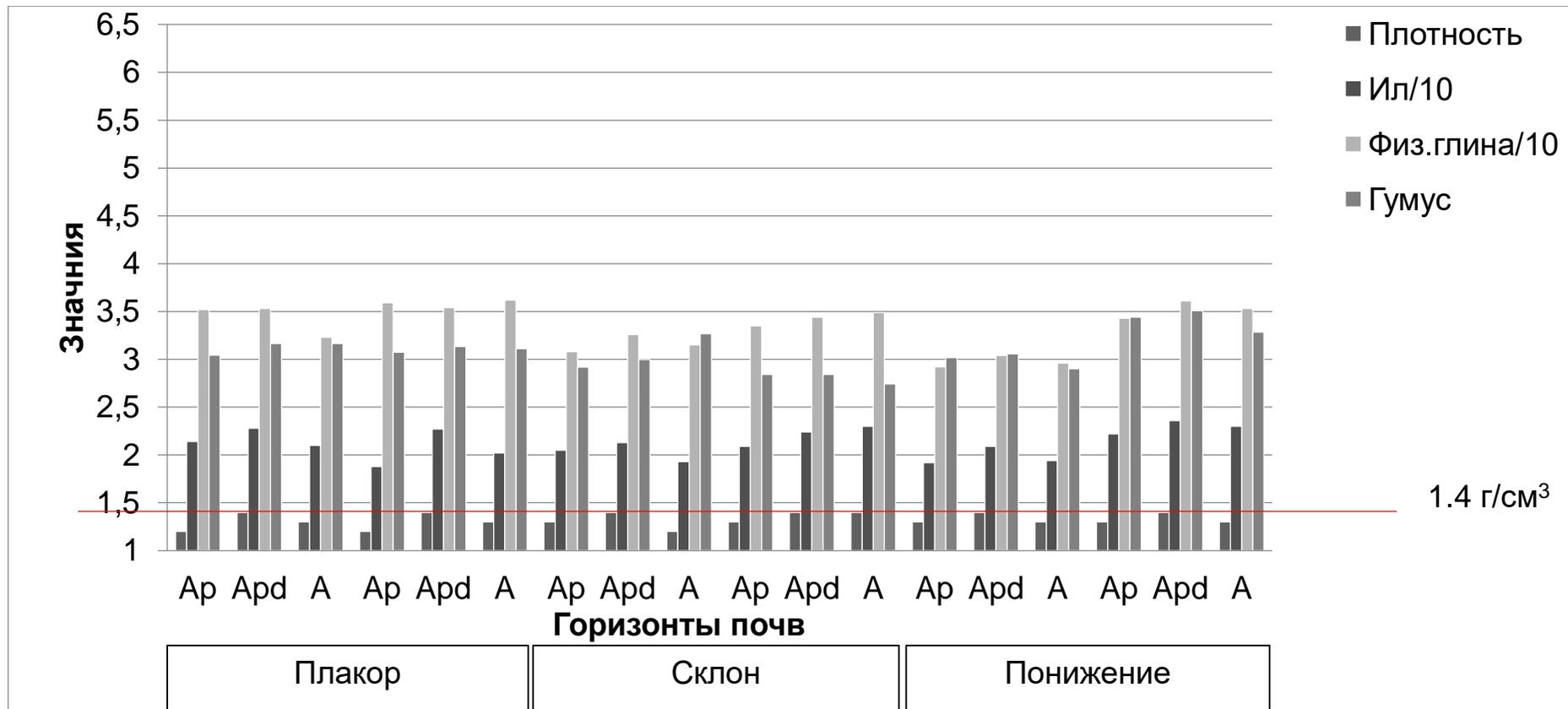


Рисунок 7. Некоторые физико-механические и химические свойства почв с яркими морфологическими признаками уплотнения. «Энгельс».

Примечание: порядок расположения горизонтов (слева направо) соответствует порядку расположения почв (сверху вниз) в таблице 5. 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.

Таким образом, верхние горизонты исследованных объектов имеют потенциальную склонность к более сильному уплотнению, так как обладают суглинистым и глинистым гранулометрическим составом и 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». В частности, WRB рассматривает содержание ила в 30% или более в пределах 15-сантиметровой толщи или более в качестве обязательного условия для диагностики вертикальных признаков, в нашем понимании – имеют к ним потенциальную склонность.

Перейдем к рассмотрению актуального проявления уплотнения почв – к параметру **плотность**. Плотность почв 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 (Рисунок 5). Указанные значения не позволяют говорить о статистически достоверных различиях пахотных и подпахотных горизонтов по этому показателю, хотя морфологически характеризуются как более плотные. Определенная тенденция была связана с положением почв в рельефе: почвы, занимающие аккумулятивное положение, 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 – 1.3-1.4 г/см³, а срединные 1.4 г/см³), а для нижележащего горизонта – 1.4 г/см³ (Рисунок 6). 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 в среднем на глубине от 20-30 см и является самым плотным горизонтом в пределах гумусированной толщи (Рисунок 7). 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 (согласно, Таблице 4). 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 (Деградия 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 существенно превышает описанные случаи «подплужной подошвы», мощность которой не превышает 10 см (Медведев В.В. Физические свойства и характер залегания плужной подошвы в разных типах пахотных почв // Почвоведение. 2011. №12. С. 1487-1495.), 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).

На Рисунке 8 показано, что значение рН в верхних горизонтах почв объекта «Кубань» не превышает 7.4, возрастая от пахотного горизонта к собственно гумусовому горизонту. 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» (Рисунок 8). 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 призмовидной структуры и тонких гумусово-глинистых пленок на гранях агрегатов в подпахотном горизонте в неорошаемых условиях, почвенный поглощающий комплекс содержит минимальное количество обменного натрия (не более 2%), что может характеризовать так называемую

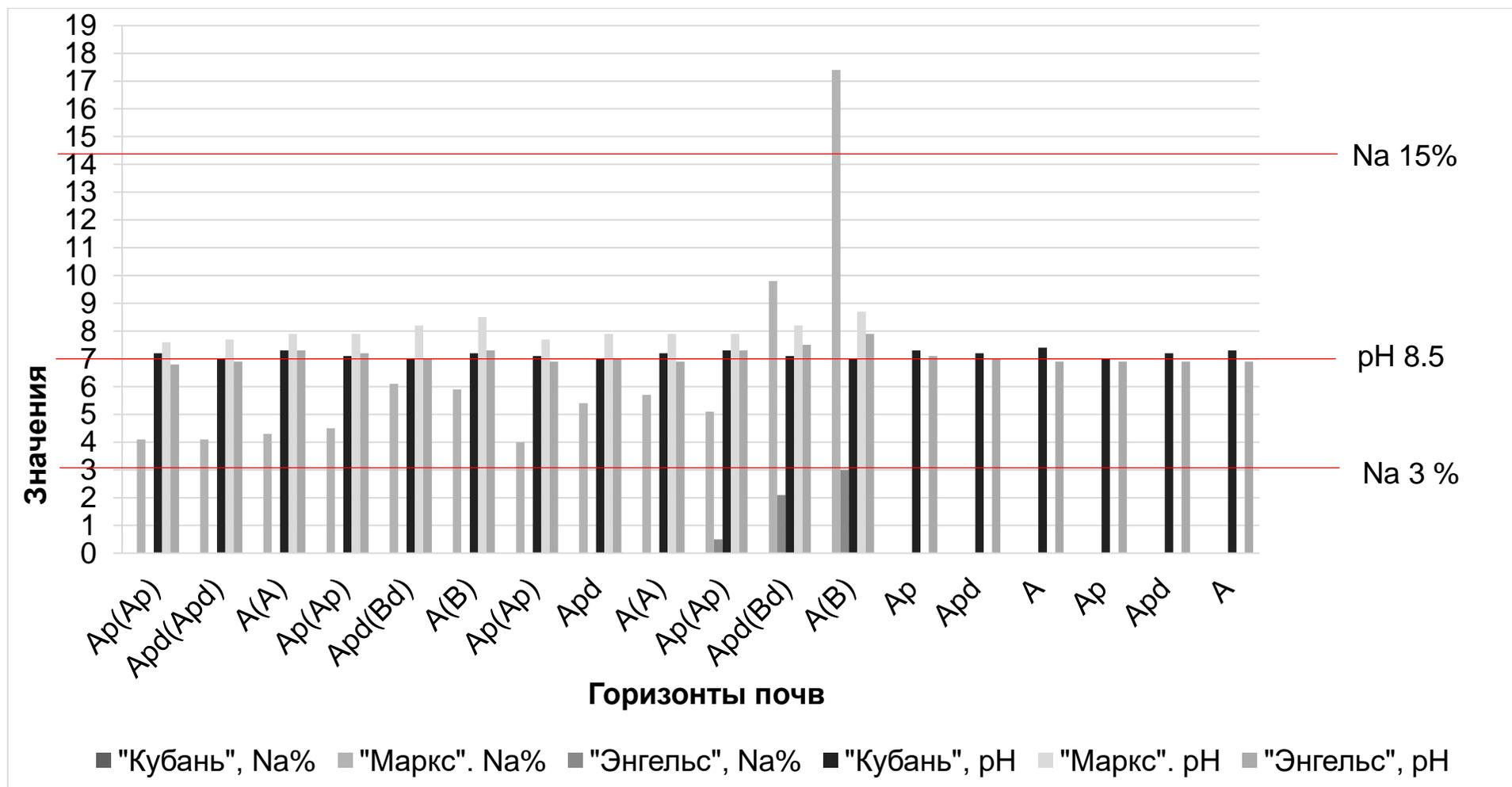


Рисунок 8. Содержание обменного натрия (Na) и значение pH.

Примечание: порядок расположения горизонтов (слева направо) соответствует порядку расположения почв (сверху вниз) в таблице 5, 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 (Natric), на значении содержания обменного натрия в 3% - нижний предел солонцеватости малогумусовых почв.

«остаточную» солонцеватость. Об отсутствии актуального солонцового процесса, как было показано выше, свидетельствуют также и невысокая величина рН.

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).

Следовательно, существование ярких признаков уплотнения в подпахотном горизонте в почвах пониженных участков на объекте «Маркс» вызваны совокупностью процессов: воздействием тяжелой техники и осолонцеванием. Следующим шагом будет проверка почв на наличие признаков уплотнения, связанных с проявлениями признаков слитогенеза, которые, как было отмечено ранее, тоже характерны для степного почвообразования. Однако перед тем как перейти к следующему шагу, мы хотели бы сказать о нижеследующем: поскольку в задачу нашего исследования не входило выявить генетические различия процессов осолонцевания и слитогенеза, то в следующей главе мы не будем останавливаться на рассмотрении объект «Маркс».

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 устойчивую тенденцию увеличения от пахотного горизонта (колеблется от 17 до 20%) в глубь к гумусовому горизонту А (от 21 до 25%) (Рисунок 9). Показатель влажности максимального набухания изменяется с той же тенденцией: наименьшие значения составляют от 46 до 49% в пахотном горизонте, а наибольшие в нижней части горизонта А – от 53 до 57% (см. Приложение, Таблица 11). Таким образом, горизонты с наиболее морфологически выраженными признаками уплотнения обладают в то же время меньшими значениями показателей набухания нежели условно нетрансформированные гумусовые горизонты.

Исследования по кинетике набухания (Рисунок 10), показали, что ход кривых набухания мало отличается для образцов исследуемых почв, взятых из разных горизонтов, что подтверждает тезис о близости физико-механических характеристик почвенной массы в пределах гумусового горизонта. Вместе с тем, интенсивность набухания образцов пахотных горизонтов в промежутке между 5-й и 10-й минутой уменьшается, и кривые набухания выполаживаются. Особо важно при этом отметить, что за первые 5 минут практически все образцы набирают более половины от величины максимального набухания, а за первые 30 минут - от 80 до 86% от величины максимального набухания.

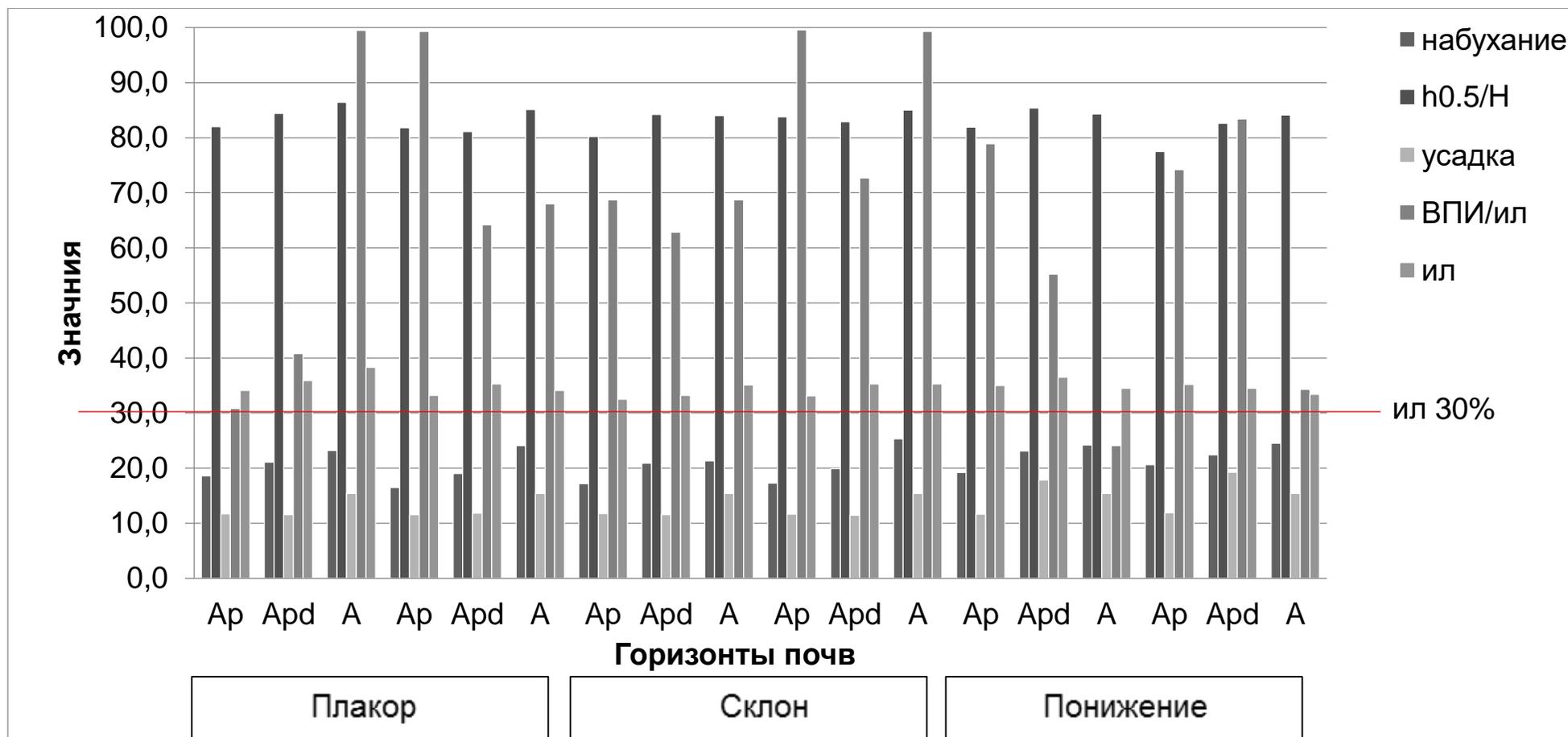


Рисунок 9. Уточняющие диагностические критерии существования слитогенеза, в %. Объект «Кубань».

Примечание: порядок расположения горизонтов (слева направо) соответствует порядку расположения почв (сверху вниз) в таблице 5. Линией на значении содержания илистой фракции в 30% отмечена нижний предел диагностического значения для протокертиковых горизонтов.

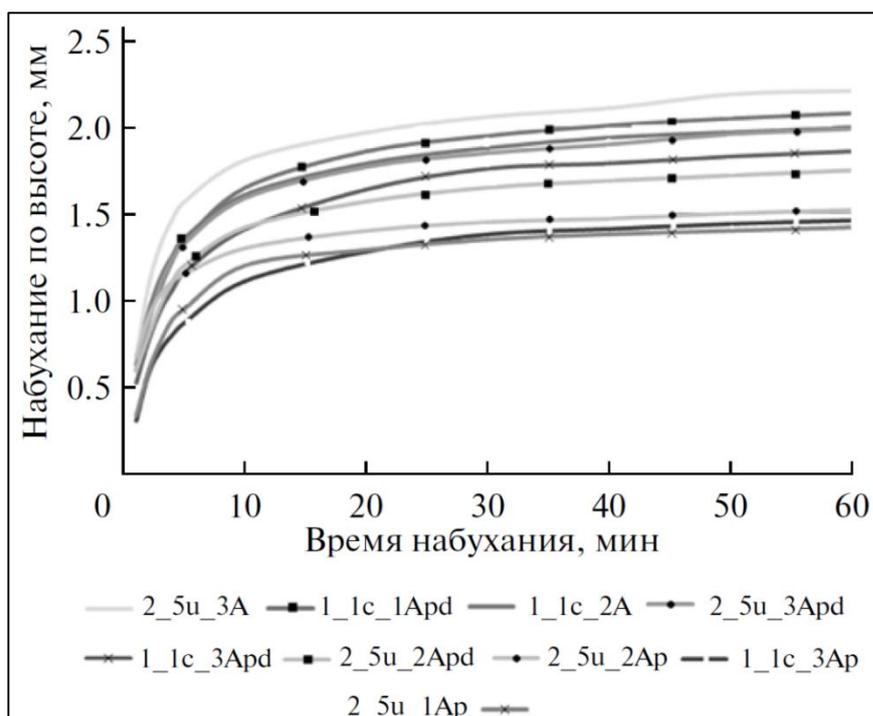


Рисунок 10. Некоторые особенности кинетики набухания образцов. Объект «Кубань».

Примечание: почвы повышенных участков: 1_1c_1 (Apd), 2_5ю_1 (Ap); склоновых участков: 1_1c_3 (Ap, Apd), 2_5ю_2 (Ap, Apd); пониженных участков: 1_1c_2 (A), 2_5ю_3 (Apd, A) за первый час наблюдения. Порядок линий графика: слева направо, сверху вниз.

Значения степени набухания в исследуемых образцах объекта «Энгельс» колеблются от 12 до 17.7% (Рисунок 11). Максимальные значения получены для подпахотных горизонтов, расположенных на плакоре и в микро-понижении в орошаемых условиях. Минимальные значения, как правило, характерны для пахотных горизонтов почв, вне зависимости от положения в мезорельефе.

Также была прослежена динамика набухания горизонтов (Рисунок 12). Были рассчитаны показатели относительного набухания почвенной массы через полчаса после начала набухания. Как показано на рисунке 11 этот показатель колеблется 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 (см. Приложение, Таблица 13).

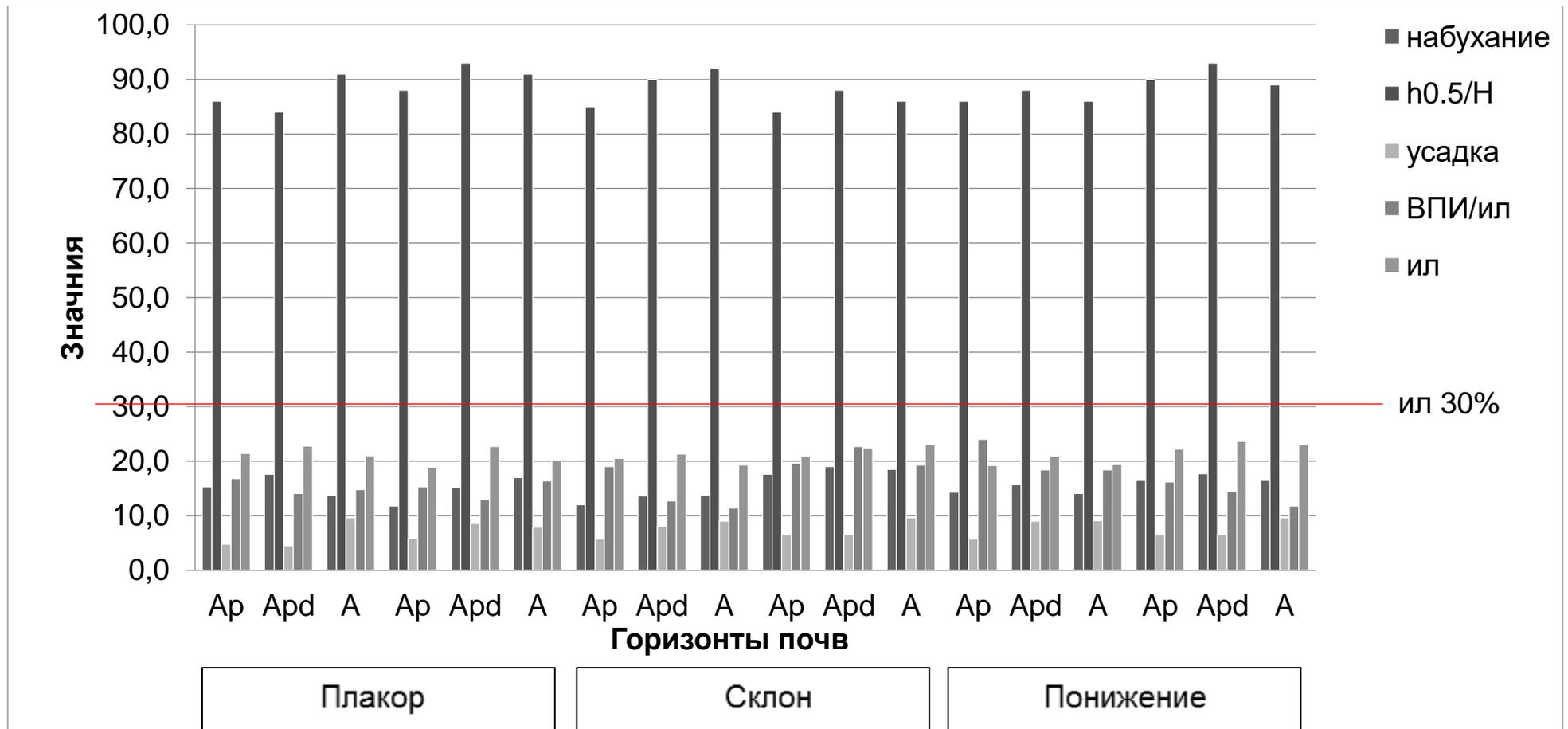


Рисунок 11. Уточняющие диагностические критерии существования слитогенеза, в %. Объект «Энгельс».

Примечание: порядок расположения горизонтов (слева направо) соответствует порядку расположения почв (сверху вниз) в таблице 5. Линией на значении содержания илистой фракции в 30% отмечена нижний предел диагностического значения для протокертиковых горизонтов.

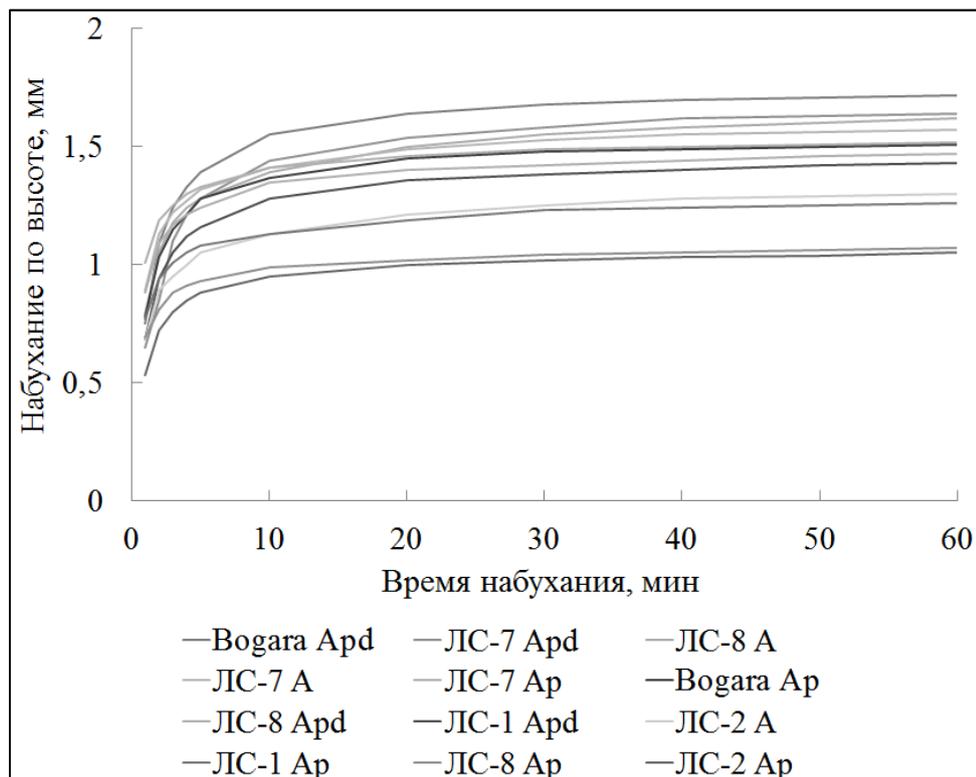


Рисунок 12. Некоторые особенности кинетики набухания образцов. Объект «Энгельс».

Примечание: почвы повышенных участков: ЛС-8 (Ap, Apd, A); микро-склоновых участков: ЛС-2 (Ap, A), Bogara (Ap, Apd); пониженных участков: ЛС-1 (Ap, Apd), ЛС-7 (Ap, Apd, A) за первый час наблюдения. Порядок линий графика: слева направо, сверху вниз.

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 всего, 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. Хитров Н.Б. (Хитров Н.Б. Выбор диагностических критериев существования и степени выраженности солонцового процесса в почвах // Почвоведение. 2004. № 1. С. 18-31.) 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 и Абрикова (Горбунов Н.И., Абрикова Л.П. Реологические свойства и минералогический состав слитых почв // Почвоведение. 1974. № 8. С. 74–85.) 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 (Рисунок 9), 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. Вместе с тем, как можно заметить из сравнения значений содержания ВПИ с морфологической оценкой, хорошо выраженные признаки уплотнения далеко не всегда коррелируют с ВПИ. По всей видимости, переуплотнение стимулируется какими-то дополнительными режимами и движущими силами, вероятнее всего связанными с механическим воздействием на почвы. Кроме того, остаются не вполне понятные причины отсутствия закономерной связи содержания ВПИ со стратификацией гумусового горизонта и другими свойствами наших почв. На объекте «Энгельс» отношение ВПИ/ил в исследуемых почвах колеблется от 11.4 до 24% (Рисунок 11). 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., Прохоров А.Н. Оценка возможной слитизации почв Ставрополя при орошении // Вест. Моск. ун-та. Серия 17. Почвоведение. 1997. № 4. С. 8–13.). Невысокие значения отношения ВПИ/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 протовертикальным горизонтом (IUSS Working Group WRB, 2014).

НЕКОТОРЫЕ ГИПОТЕЗЫ О ГЕНЕЗИСЕ ПРИЗНАКОВ УПЛОТНЕНИЯ

Гипотеза 1. О роли высоких значений содержания ВПИ в сочетании с интенсивной динамикой набухания-усадки.

Определенный свет на понимание генезиса уплотненных почв с вертикальными признаками, но без поверхностей скольжения, заметных при макроморфологическом описании, могут пролить результаты исследования содержания водно-пептизированного ила. На необходимость этих исследований нас подвигли наблюдения высокой степени коркуемости поверхности почв после схода весенней влаги, а также при летних ливнях.

Отмеченные высокие значения содержания ВПИ в сочетании с интенсивной динамикой набухания-усадки позволяют сделать некоторые гипотетические предположения относительно генезиса уплотнения в исследуемых почвах. По нашим представлениям, высокое содержание ила и водно-пептизированной фракции в нем в условиях интенсивной обработки почв сельскохозяйственной техникой, отсутствия естественной степной растительности с глубокопроникающей корневой системой, при периодическом оголении поверхности почв при уборке урожая (особенно при уборке зерновых в начале засушливого периода), приводящем к появлению крупных вертикальных трещин, в совокупности приводит к тому, что уплотнение возникает и развивается не так, как в “классических” вертисолях. Ведущим процессом здесь, по-видимому, служит не периодическое повторение циклов набухания-усадки, сопровождающееся заполнением трещин рыхлым материалом с поверхности, и последующими деформациями сжатия, а скорее – трансформации пластичной водонасыщенной массы при заполнении водно-пептизированным илом (“заплывании”) не только крупных, но и мелких пор и пустот. Пахотный горизонт, по-видимому, подвержен аналогичным трансформациям, как и уплотненный подпахотный, однако регулярные механические обработки на некоторое время позволяют поддерживать рыхлое состояние при определенном диапазоне влажности. Собственно гумусовый горизонт А, залегающий ниже уплотненного подпахотного горизонта, по всей вероятности, также обладает потенциальной способностью к пептизации и

последующему уплотнению, однако за счет меньшей контрастности режимов увлажнения-иссушения и наследуемого природного структурного сложения, в меньшей степени проявляет признаки уплотнения.

Мы склонны считать, что в отличие от классических слитых почв (с 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 (Рисунок 13) и переупаковкой почвенной массы, обладающей высокой пептизируемостью и текучестью. Сдвигов, приводящих к появлению сликенсайдов, заметных на макроуровне, при этом не происходит.

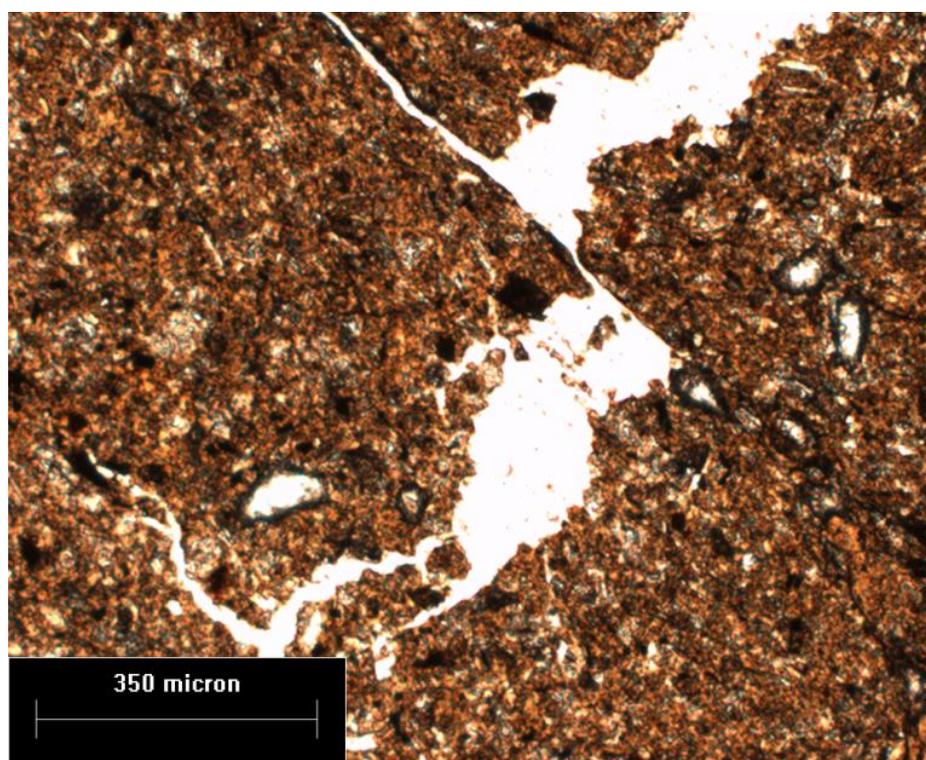


Рисунок 13. Микросдвиг в образце из подпахотного горизонта Apd. «Кубань».

Несмотря на то, что изложенная гипотеза требует дополнительной проверки с помощью комплекса динамических наблюдений, статистического анализа и современных методов анализа (таких как компьютерная томография, электронная микроскопия, физическое моделирование и др.), она позволяет объяснить многие факты, ранее отмеченные для исследованных почв и зачастую противоречивые: быстрое восстановление уплотненных горизонтов после чизелевания, слабое проявление уплотнения и стратификации гумусового горизонта в лесополосах и на

целинных участках, относительно более сильное проявление “монолитности” структуры подпахотного горизонта в понижениях рельефа.

Гипотеза 2. О роли минералогического состава почв.

Нами исследованы 12 образцов из 7 разрезов почв. Анализ илистых фракций, выделенных по методу Горбунова, проводили рентгенографическим методом на кафедре химии почв факультета почвоведения МГУ. Подготовка образцов ила проведена по методу Горбунова по Соколовой Т.А. и др. (Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И., 2005). Был выполнен полуколичественный анализ полученных данных. Основные параметры минералогического состава приведены в приложении (Таблица 14).

Основными компонентами илистой фракции исследованных почв являются иллиты, каолиниты (каолинит+хлорит), вермикулит: диоктаэдрический иллит, диоктаэдрический вермикулит, почвенный хлорит, триоктаэдрический хлорит, триоктаэдрический иллит, каолинит. При этом кардинальных различий состава илистой фракции обнаружено не было.

В силу разнообразия причин формирования минералогического состава илистой фракции почв, а также особенности выбора объектов исследования, однозначного соответствия морфологических признаков уплотнения почв параметрам их минералогического состава установить не представляется возможным.

Гипотеза 3. О роли аморфного железа.

В степной зоне на черноземах при усилении гидроморфности и создании периодического застойно-промывного режима на участках, как правило, пониженных элементов рельефа, неизбежно проявление глееобразования и элювиирования из почв как легкорастворимых солей, гипса, карбонатов, так и железа, и ила. Проявление признаков застойного увлажнения наблюдалось нами в Краснодарском крае: в микропонижениях – повсеместно, на плакорах – на границе между пахотным и подпахотным горизонтами, последний выступал в роли водоупора. С выносом этих веществ связаны обескальцивание и подкисление почв, текстурные изменения почвенной толщи, их уплотнение, вплоть до формирования

«слитого» горизонта, т.е. в данном случае имеют место деградационные изменения почв, эволюция их в сторону почв, принципиально отличающихся от черноземов (Николаева С.А., Еремина А.М. Трансформация соединений железа в черноземах в условиях повышенной увлажненности почв // Почвоведение. 2001. № 8. С. 963-969.). Эти изменения объясняются тем, что железо (его аморфные формы) в таких почвах, приобретает высокую подвижность и активность, участвует в процессах пептизации глинистой массы.

В таблице 6 представлены результаты данного исследования. Как видно из приведенной таблицы в изученных образцах велика доля аморфного железа (от 17.5 до 86.4 %). Такие процентные отношения были получены для образцов черноземных почв при длительном модельном затоплении (более 4 суток), согласно (Николаева С.А., Еремина А.М., 2001). При прочих равных, полученные расчетные данные (коэффициента Шветрмана) согласуются с закономерностью перераспределения влаги вдоль склона: на повышенных участках происходит непродолжительный застой влаги (значения коэффициента от 22.8 до 43.0), на склонах застоя влаги практически не происходит (значения коэффициента от 17.5 до 24.7), в понижении происходит длительный застой влаги (значения коэффициента от 42.0 до 68.4). Чем выше величина коэффициента Шветрмана, тем меньше степень окристаллизованности свободного железа и тем выше степень его активности. В черноземных почвах смена окислительных условий на восстановительные вызывает активный переход окристаллизованных форм в аморфные, а обратный процесс, даже в окисленных условиях, в какой-то степени блокируется, что и вызывает высокое содержание в периодически переувлажняемых черноземных почвах соединений железа (Минкин М.Б., Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П. Карбонатно-кальциевое равновесие в почвенных растворах. М.: Изд-во МСХА. 1995. 210с.; Чухров Ф.В., Горшков А.И., Березовская В.В., Тюрюканов А.Н., Сивцов А.В. К геохимии и минералогии марганца и железа в молодых продуктах гипергенеза // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1980. № 7. С. 5-24.)

Мы склонны считать, что повышенное содержание аморфного железа может, наряду с высокими значениями ВПИ, способствовать текстурным изменениям в почвах, которые проявляются в большей степени по понижениям рельефа. Несмотря на то, что указанные наблюдения единичны и нет возможности оценить их с помощью статистического анализа, тем не менее они указывают на одно и то же, а именно на повышенную потенциальную склонность почв пониженных участков к развитию признаков слитогенеза.

Таким образом была проведена первичная диагностика процессов уплотнения пахотных почв юга степной зоны. Было предположено, что почвы в пределах изученных объектов («Кубань», «Маркс», «Энгельс») обладают признаками уплотнения разного генезиса: почвы с протовертикальным горизонтом, почвы с содиковыми признаками и почвы агроуплотненные в орошаемых и богарных условиях (IUSS Working Group WRB, 2014; Классификация и диагностика почв России., 2004).

Таблица 6. Различные формы железа в верхних горизонтах почв на объекте «Кубань», в %.

Положение в рельефе	Краткое название	Горизонт	Несиликатное железо (свободное)	Окристаллизованное железо, в скобках в % от свободного	Аморфное железо, в скобках в % от свободного	Коэф. Шветрмана ($Fe_{am}/Fe_{svob} * 100$)
Плакор	«Кубань» 1_7ю_4	Ap	0,18	0,13 (68,6)	0,06 (31,4)	31,4
Плакор	«Кубань» 2_5ю_1	Ap	0,24	0,19 (77,2)	0,05 (22,8)	22,8
Плакор	«Кубань» 1_7ю_4	Apd	0,15	0,10 (64,6)	0,05 (35,4)	35,4
Плакор	«Кубань» 2_9с_4	Apd	0,14	0,09 (63,0)	0,05 (37,0)	37,0
Плакор	«Кубань» 3_13_5	Apd	0,11	0,06 (57,0)	0,05 (43,0)	43,0
Плакор	«Кубань» 2_5ю_1	Apd	0,15	0,11 (73,9)	0,04 (26,1)	26,1
Склон	«Кубань» 1_1с_3	Apd	0,16	0,12 (75,3)	0,04 (24,7)	24,7
Склон	«Кубань» 2_5ю_2	Apd	0,22	0,18 (82,5)	0,04 (17,5)	17,5
Склон	«Кубань» 2_9с_2	A	0,21	0,16 (75,5)	0,05 (24,5)	24,5
Понижение	«Кубань» 5_2ю_2	Ap	0,19	0,06 (31,6)	0,13 (68,4)	68,4
Понижение	«Кубань» 5_2ю_2	Apd	0,19	0,11 (58,0)	0,08 (42,0)	42,0

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ИЗ УПЛОТНЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ

Далее для того, чтобы подтвердить наши предположения и выявить особенности образования подпахотных уплотненных горизонтов, были выбраны четыре разреза (по одному на объекты «Кубань» и «Маркс», и два на «Энгельс» - орошаемые и богарные условия) из числа почв с наиболее яркими признаками уплотнения для проведения комплексных исследований состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных подпахотных горизонтов (см. Приложение, Рисунок 19). В приведенных ниже таблицах 7 и 8 мы бы хотели кратко напомнить основные характеристики почв, выбранных для дальнейшего анализа.

Таблица 7. Физические, физико-химические и химические свойства исследованных уплотненных подпахотных горизонтов.

Краткое название	Глубина (мощность), см	D	<0.01	<0.001	ВПИ/ил	Ea	E	Ema	Гумус	Na	pH
			мм								
		г/см ³	%								
«Кубань» (2_5ю_2)	21-40 (19)	1,5	58	35	73	31	42	16	3,0	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	0,0	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 содержанию илистой фракции; Ea – пористость агрегатов; E – пористость; Ema – пористость межагрегатная; гумус – содержание гумуса, pH – значение показателя, отражающего реакцию среды; Na – доля обменного натрия.

Таблица 8. Морфологические свойств исследованных уплотненных пахотных и подпахотных горизонтов.

Признаки	«Кубань» (2_5ю_2)	«Маркс» (F13)	«Энгельс» (ЛС-7)	«Энгельс» (Bogara)
Структура пахотного горизонта	Глыбистая	Ореховатая	Глыбистая	
Глубина(мощность) уплотненных горизонтов, см	21-40 (19)	10-29 (19)	10-23 (13)	14-26 (12)
Структура уплотненных горизонтов	Массивная, крупноореховатая	Призматически-ореховатая	Ореховатая	
Плотность уплотненных горизонтов	Очень плотный	Плотный	Плотноватый	Плотный
Твердость уплотненных горизонтов	Очень твердый	Твердый	Мягкий	Твердый
Внутриагрегатные поры уплотненных горизонтов	Единичные, тонкие	Мало, мелких	Средне, мелких	
Трещиноватость (вертикальная) общая	С поверхности крупные, 4-5 см (иногда до 7 см), и глубокие, иногда до 80 см	До глубины в 10 см, трещины шириной 1-1.5 см, поверхность разбита на полигональные формы 20(70) × 15(80) см	До глубины в 10 см	Мелкие до глубины в 40 см и тонкие до глубины в 70 см
Трещиноватость (горизонтальная) уплотненных горизонтов	Делится на «плиты» толщиной 3-4 см	Мелко трещиноватый	Мелко трещиноватый	Тонко трещиноватый с шагом 3-10 см
Влияние уплотненных горизонтов на развитие корней (визуально при описании)	Резко затрудняет распространение корней вглубь профиля	Резко уменьшается обилие корней по сравнению с вышележащим горизонтом	Не мешает свободному прохождению корней систем растений вглубь профиля	Затрудняет проникновение корней систем растений вглубь профиля

Исследованный подпахотный уплотненный горизонт разреза 2_5ю_2 объекта «Кубань» характеризуются следующей совокупностью свойств и признаков (таблица 7: высокое содержание глины и илистой фракции; низкая агрегатная и высокая межагрегатная пористость; большое содержание ВПИ и отсутствие обменного натрия; таблица 8: высокая мощность и глубина нижней границы горизонта; крупно-ореховатая структура, монолитность сложения; глубокие вертикальные трещины).

Подпахотный уплотненный горизонт разреза F13 объекта «Маркс» характеризуется следующей совокупностью свойств и признаков (таблица 7: высокое содержание физической глины и илистой фракции; низкая агрегатная и высокая межагрегатная пористость; большое содержание ВПИ и присутствие обменного натрия менее 10%; значение рН 8.3; таблица 8: 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 (таблица 7: относительно невысокое содержание физической глины и илистой фракции; относительно высокая агрегатная пористость, но низкая межагрегатная; доля ВПИ не более 14%; обменный натрий отсутствует, таблица 8: ореховатая структура, среднее количество видимых пор, трещины относительно узкие и неглубокие).

Таким образом общими свойствами и признаками для выбранных уплотненных подпахотных горизонтов являются: высокая плотность и твердость, деградация структуры через возрастание ореховатости, наличие трещин в сухой сезон, уходящих вглубь профиля, малое содержание гумуса.

Для выявления особенностей состава и строения отдельных агрегатов из уплотненных подпахотных горизонтов разных типов почв степной зоны образцы из уплотненных горизонтов были рассеяны на ситах с разным диаметром отверстий. Для всех анализов были взяты агрегаты размером 1-2 мм, а для томографического исследования дополнительно были взяты агрегаты размером 3-

5 мм. Агрегаты размером 1-2 мм изучали как пример малых структурных отдельностей, в которых можно наблюдать совокупности микропор диаметром 10(7) мкм - 30 мкм, недоступных исследованию в прозрачных шлифах. Агрегаты размером 3-5 мм изучали как пример внутреннего строения агрономически ценных агрегатов.

В ходе **мезоморфометрического анализа** исследовали контуры агрегатов размером 1-2 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. *ImageJ*. Bethesda, MD, USA, U.S. National Institutes of Health. 1997 (also available at imagej.nih.gov/ij/)) для преобразования их в растровые изображения (см. Приложение, Рисунок 18). 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. Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства // Почвоведение. 1993. № 6. С. 49-57.), 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 (Таблица 9).

Морфометрический анализ показал, что исследованные образцы обнаруживают различия при автоматической обработке и разбиении на классы по характеру границ агрегатов. Среди них можно выделить 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 4.7-9.8% 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 выразилось в распадении агрегатов на более мелкие даже при слабом механическом воздействии. Таким образом, морфометрический анализ подтвердил особенности структуры «Маркс» (F13), а также неплотное сложение «Энгельс» (ЛС-7).

Таблица 9. 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.

Микроморфологические исследования изученных агрегатов позволили выявить ряд общих и специфических признаков, связанных с разными элементарными почвообразовательными процессами. Элементы микростроения агрегатов разных типов почв представлены на Рисунках 14 и 15.

«Кубань» (2_5ю_2). Для исследованных агрегатов из уплотненного горизонта характерны неправильные формы «вытянутые» по углам и неоднородная окраска. Неоднородность окраски связана с неравномерной пропиткой агрегатов

глинисто-гумусовым и глинисто-гумусово-железистым веществом (Рисунок 14, А-I-a). Если внутренние зоны агрегатов содержат малое количество гумусово-глинистой плазмы, то в краевых зонах отмечены фрагментарные глинисто-железисто-гумусовые кутаны (Рисунок 14, А-II-б) и многочисленные стяжения, сгустки, микрокомочки и тяжи (гумусированные и ожелезненные мелкие растительные остатки). Наличие очень тонких фрагментарных глинистых кутан свидетельствует о некоторой подвижности глины, которая может возникать при агроуплотнении почв. Подобная специфическая форма агрегатов (с «уточками носами») и тонкими глинистыми кутанами были описаны для почв с вертиковыми признаками и могут быть диагностированы как микросликенсайды (Kovda I., Mermut A. Vertic features. In: Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths / Eds.: G. Stoops, V. Marcelino, F. Mees. Elsevier, 2010. P. 117-137.). Для внутрипедной массы характерно большое количество мелких обрывков углистых тканей и частиц (Рисунок 14, А-III-в), образование которых может быть связано с разложением растительных тканей в восстановительной среде при временном застойном переувлажнении.

Минералы крупных фракций имеют гнездовой характер распределения и остроугольные формы, что связано, на наш взгляд, с растрескиванием и фрагментированием песчаных частиц на более мелкие пылеватые зерна.

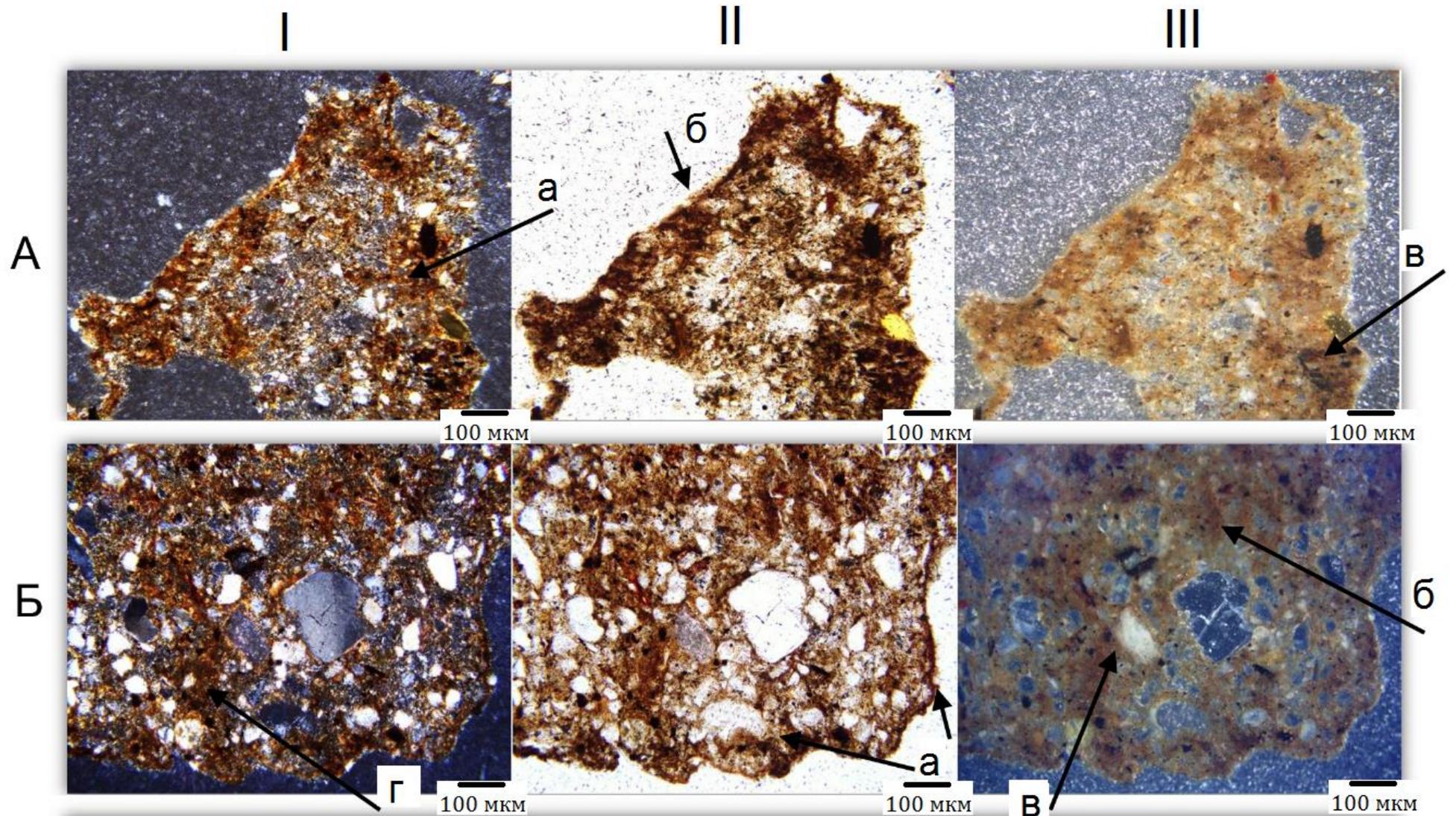


Рисунок 14. Микроморфологическое строение агрегатов размером 1-2 мм из уплотненных горизонтов: I - скрещенные николи, II - параллельные николи, III - отраженный свет.
Примечание: А - «Кубань» (2_5ю_2); Б - «Маркс» (F13).

«Маркс» (F13). Характерны анизометричные формы агрегатов «вытянутые» по углам. Окраска и микросложение агрегатов из уплотненного горизонта неоднородны, что определяется неравномерным распределением пылевато-песчаных частиц, гумусово-глинистой плазмы, железисто-гумусовых и глинистых новообразований (Рисунок 14, Б). Особенностью агрегатов являются малошероховатая поверхность, довольно высокое содержание тонкодисперсного органического вещества, тесно связанного с тонкодисперсным силикатным материалом, и мелких углистых частиц. Обогащенность гумусом и тонкодисперсными частицами отчетливо диагностируется в отраженном свете (Рисунок 14, Б-III-б). Единично встречаются растительные остатки.

Гумусово-глинистые новообразования представлены разными микроформами: тонкими кутанами на поверхности агрегатов и на минералах крупных фракций; плотными инфиллингами (заполнениями) тонких внутрипедных пор; мелкими обрывками кутан (папулами), ассимилированными внутрипедной массой (Рисунок 14, Б-II-а). Данные микроморфологические показатели являются диагностическими для солонцеватого процесса, вызывающего подвижность глинистого и органо-глинистого материала с образованием различных кутан, которые при процессах набухания и усадки постепенно разрушаются и ассимилируются внутрипедной массой с образованием их фрагментов – папул.

Мелкие углистые частицы, железисто-гумусово-глинистые кутаны и мелкие гумусово-железистые стяжения являются диагностическими микропризнаками периодической смены окислительно-восстановительных условий, обусловленных поверхностным периодическим переувлажнением.

Минеральная часть представлена зернами кварца, калиевых полевых шпатов, плагиоклазами, глауконитом, слюдами, эпидот-цоизитом и обломками метаморфических пород кварцитов. По форме скелетных зерен преобладают округло-окатанные минералы, в небольшом количестве присутствуют окатанные. Среди скелетных зерен наиболее выветрелыми минералами являются плагиоклазы, которые отличаются наличием микропризнаков корродированности и

трещиноватости (Рисунок 14, Б-III-в), внутри некоторых отмечены псевдоморфозы из гумусово-глинистого вещества.

По особенностям микростроения агрегатов можно сделать следующее заключение: обогащенность агрегатов тонкодисперсным органическим, органо-глинистым и железисто-глинистым веществом (Рисунок 14, Б-I-г) позволяет утверждать, что эти агрегаты принадлежат относительно гумусированной почве (таблица 8, «Гумус»), для которой характерны современные процессы осолонцевания и периодического поверхностного гидроморфизма.

«Энгельс» (ЛС-7). В уплотненных агрегатах этой почвы на микроуровне были диагностированы признаки, которые не наблюдались в описанных выше образцах. Особенностью этих макроагрегатов является многопорядковая организация: для них характерна высокая ажурная внутриведная пористость и микроагрегированность (Рисунок 15, Г-II-г). Глинисто-гумусовые округлые микроагрегаты и сгустки, предположительно, являются ассимилированными копролитами. Общая гумусированность плазмы высокая и ее распределение относительно равномерное (Рисунок 15, Г-I-в). Углистые частицы отсутствуют, но появляются разные по размеру и степени разложенности корни, чего не было в других почвах. Интересной особенностью изучаемых образцов является характер поверхности минералов крупных фракций – внутри агрегатов они имеют глинисто-гумусовые кутаны, на поверхности же эти кутаны очень тонкие и фрагментарные (Рисунок 15, Г-II-б), или отсутствуют (Рисунок 15, Г-II-а), что позволяет говорить о снятии пленок с зерен, расположенных в краевых зонах агрегатов, вероятно за счет современного глеевого процесса.

Минералогический состав по сравнению с другими образцами отличается большим количеством слюд, очень небольшим количеством рудных и тяжелых минералов и отсутствием глауконита.

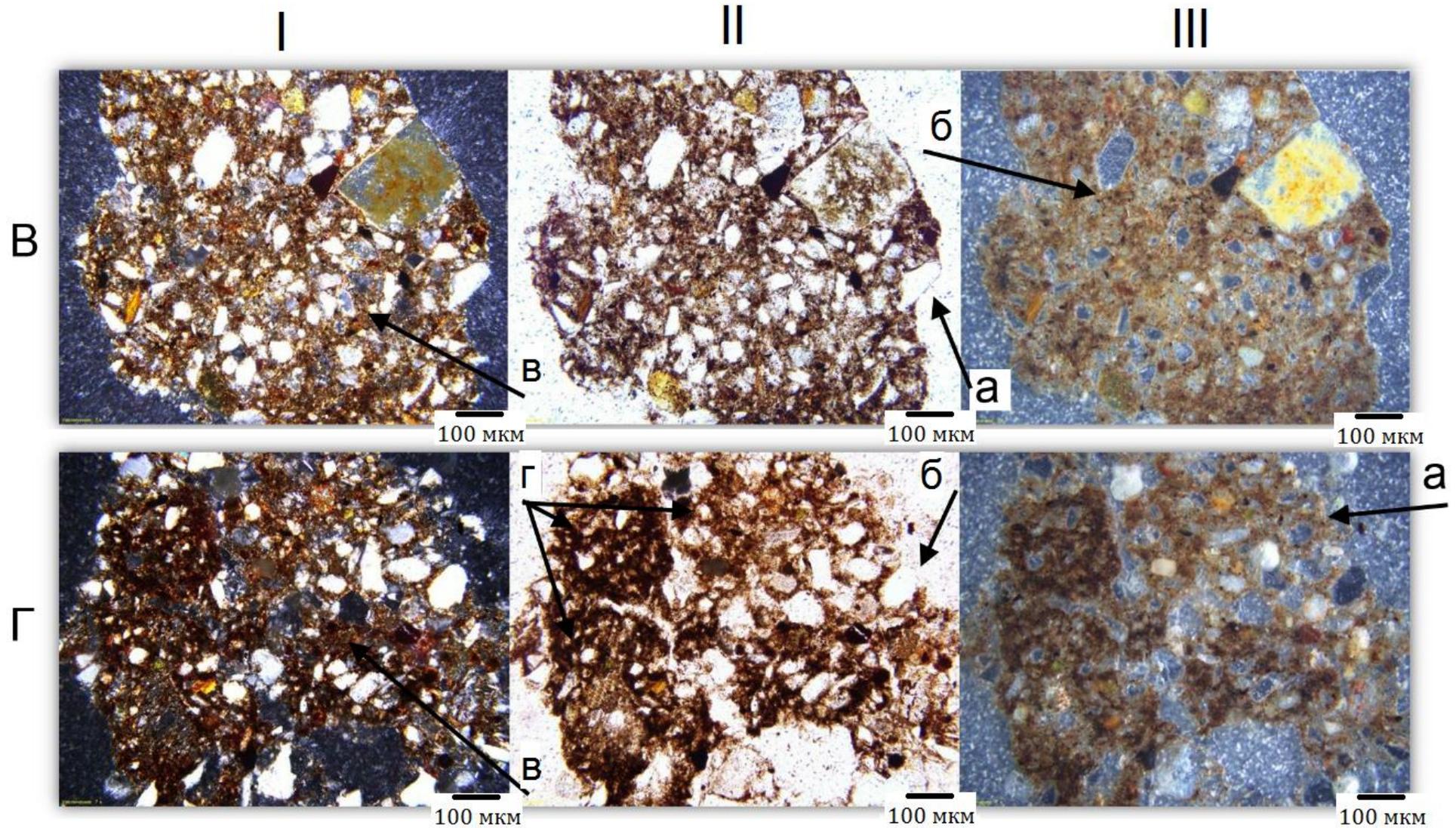


Рисунок 15. Микроморфологическое строение агрегатов размером 1-2 мм из уплотненных горизонтов: I - скрещенные николи, II - параллельные николи, III - отраженный свет.
Примечание: В – Энгельс (Bogara); Г - «Энгельс» (ЛС-7).

«Энгельс» (Bogara). В ряду сравниваемых почв для этого образца характерна относительно равномерная пропитка глинистого материала гумусом, плазма практически изотропная (только при больших увеличениях видна раздельно-чешуйчатая оптическая ориентация), глинисто-гумусового состава и является цементом между песчано-пылевыми зернами скелета (Рисунок 15, В-I-в). Преобладают темные коллоидные пропиточные и тонкодисперсные микроформы гумуса (Рисунок 15, В-III-б). Углистые частицы очень мелкие и единичные. Пленки на поверхности педов тонкие (Рисунок 15, В-II-а).

Минералы крупных фракций имеют преимущественно округлую форму. Если сравнивать с другими почвами, они более выветрелые и имеют железистые и гумусово-железистые псевдоморфозы, встречаются зерна со старыми колониями железобактерий. На фоне преобладающей кварц-полевошпатовой ассоциации здесь наблюдается несколько меньшее количество зерен глауконита, эпидота и повышенное - рудных минералов.

Итак, микроморфологический анализ позволил выявить диагностические признаки генезиса уплотненных горизонтов изученных почв: 1) в «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 внутripедной массы с образованием стресс-кутан и очень тонкие кутаны на поверхности агрегатов. Эти микропризнаки внутripедной подвижности глины также подтверждаются высокими значениями ВПИ, а большое количество мелких обрывков углистых тканей и частиц в почвенной массе позволяет говорить о процессах периодического застоя влаги; 2) в «Маркс» (F13) на фоне 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. Наличие смены окислительно-восстановительных условий читается по многочисленным железистым новообразованиям; 3) в «Энгельс» (ЛС-7) отмечено сохранение характерного для плодородных почв губчатого микростроения и активной биогенной переработки в

виде сохранившихся копролитов и большого количества растительных остатков. Отсутствие глинисто-гумусовых кутан на минералах крупных фракций, залегающих на поверхности изученных агрегатов, свидетельствует о периодическом переувлажнении при орошении; 4) в «Энгельс» (Bogara) в отличие от «Энгельс» (ЛС-7) и других отсутствуют микропризнаки активной внутриведной миграции вещества, тонкодисперсное глинисто-гумусовое вещество равномерно пропитывает почвенную массу, отсутствуют текстурные новообразования, что позволяет говорить о богарных условиях почвообразования.

Таким образом имеющийся методический аппарат и наработки по описанию микроморфологических свойств (наличие кутан на поверхности педов и пор, ориентация гумусового материала, состав плазмы и равномерность ее распределения, коррозия минеральных зерен, обилие микроформ гумуса, пористость, строение и форма микроагрегатов) в большинстве случаев может быть использован для детальной характеристики и диагностики процессов, происходящих в уплотненных почвах. Однако, для того чтобы получить качественную и количественную информацию о форме агрегатов и внутренних пор, в частности в 3-х мерном пространстве, результаты микроморфологического необходимо дополнить данными томографического анализа.

Томографический анализ используют для изучения влияния циклов изменения влажности на структуру почвы (Pires L.F., Vacchi O.O.S., Reichardt K. Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis // Soil and Tillage Research. 2007. V. 94. P. 537–545.), для измерения общей пористость почвы, ее объемной плотности и влажности (Pires L.F., Borges J.A.R., Vacchi O.O.S., Reichardt K. Twenty five years of computed tomography in soil physics: F literature review of Brazilian contribution // Soil and Tillage Research. 2010. V. 110. P. 197–210; Pires L.F., Cassaro F.A.M., Vacchi O.O.S., Reichardt K. Nondestructive image analysis of soil surface porosity and bulk density dynamics // Radiation Physics and Chemistry. 2011. V. 80. P. 561–566.), используют данные трехмерного моделирования, чтобы сделать выводы о наличии в почве предпочтительных проводящих путей миграции растворов (Luo L., Lin H., Halleck

P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computed tomography // *Am. Soil Sci. Soc. J.* 2008. V. 72. P. 1058–1069; Luo L., Lin H., Li S. Quantification of 3D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography // *J. hydrology.* 2010. V. 393. P. 53–64.); оценить деформационные процессы в почвах и грунтах (Picuela J., Alvarez A., Andina D., Heck R.J., Tarquis A.M. Quantifying soil pore distribution from 3D images: Multifractal spectrum through wavelet approach // *Geoderma.* 2010. V. 155. P. 203–210.); используют для анализа объемной плотности, общей структуры почвы и порового пространства с целью описать различные почвенно-генетические условия, например, на пашне и защитных лесополосах (Udawatta R., Anderson S.H., 2008); в генетических горизонтах дерново-подзолистых и серых лесных почв центра Русской равнины (Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В., 2012); для изучения влияния сельскохозяйственного использования на структурное состояние почв, их уплотнение (Kim H.M. et al., 2010).

Анализ агрегатов был выполнен с помощью микротомографа Bruker SkyScan 1172, который позволяет получать рентгеновские изображения объектов с разрешением от 0.6 до 26 мкм/пиксель. Наши 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). Полученные томографические данные обрабатывались в специальном программном обеспечении фирмы Bruker: в программе STan производился послойный анализ полученных томографических данных, подсчитывалась видимая на томограммах пористость (открытая и закрытая), в той же программе производилось 3D моделирование порового пространства (объемная модель); в программах STvox и DataViewer оценивались особенности морфологического строения агрегатов и порового пространства. 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. Нефтегазопромысловая геология и подсчет запасов нефти и газа. М.: Недра, 1970. 488 с; Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966. 384 с.); 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. Введение в мембранную технологию. Уч. пособие. РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2006. 170 с.); 3) “открытые поры” - этот термин пока в почвоведении не устоялся, и для него нет строгого определения. В настоящей работе под этим термином мы понимали совокупность пор, которые пересекаются гранями куба, вписанного в 3D изображение анализируемого образца (ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением).

Томографический анализ позволил на количественном уровне охарактеризовать поровое пространство в агрегатах сравниваемых почв и подтвердить наблюдения микроморфологического анализа. Результаты томографического исследования представлены в виде подборки двухмерных рентгеновских изображений и трехмерных компьютерных моделей для каждого образца с разрешением 0.88 мкм и таблицы с обработанными данными съемки для двух разрешений 0.88 и 2.4 мкм (Рисунки 16, 17 и Таблица 10).

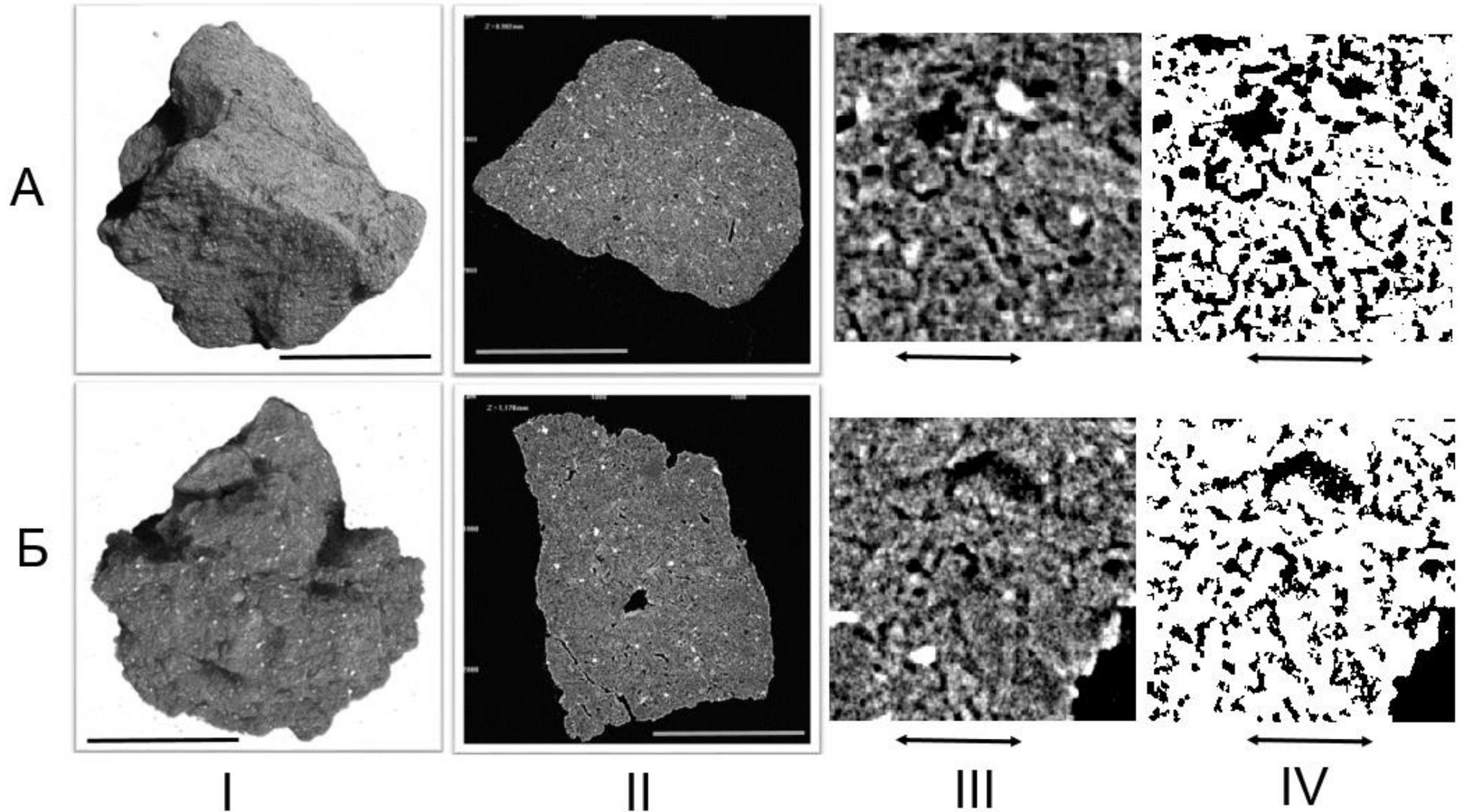


Рисунок 16. Визуализация агрегатов размером 1-2 мм (разрешение 0.88 мкм) из уплотненных горизонтов.

Примечание: А – «Кубань» (2_5ю_2); Б – «Маркс» (F13); I - трехмерная, II - послойная двумерная, III и VI - исходное и бинаризованное изображения. Масштаб: для _____ (1000 мкм); для \longleftrightarrow (100 мкм).

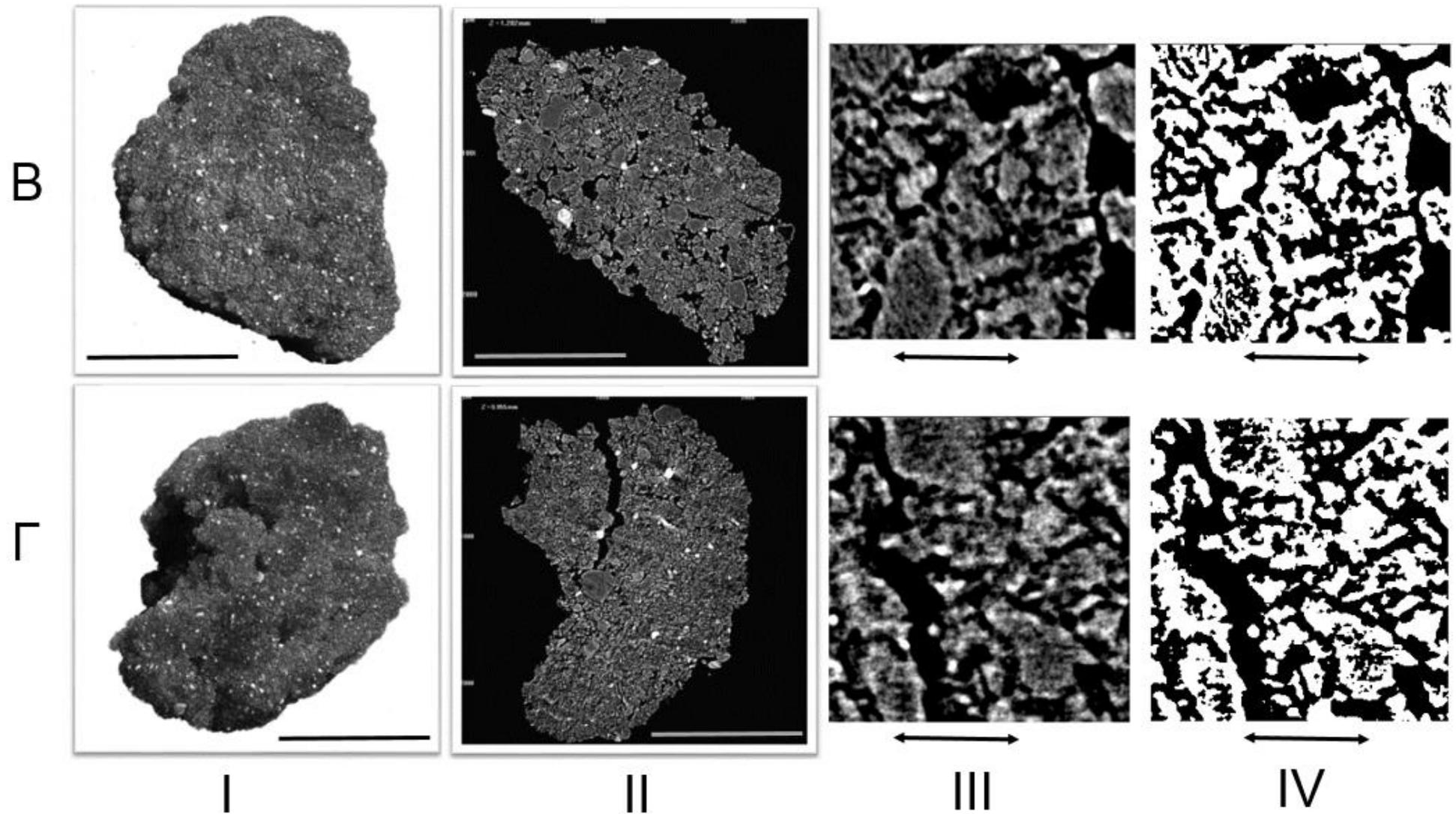


Рисунок 17. Визуализация агрегатов размером 1-2 мм (разрешение 0.88 мкм) из уплотненных горизонтов.

Примечание: В – «Энгельс» (Vogara); Г – «Энгельс» (ЛС-7); I - трехмерная, II - послойная двумерная, III и VI - исходное и бинаризованное изображения. Масштаб: для — (1000 мкм); для \longleftrightarrow (100 мкм).

Исследованные агрегаты имеют значительные различия на смоделированных трехмерных изображениях. Агрегаты «Кубань» (2_5ю_2) имеют наиболее компактное строение, на их поверхности различимы острые крупные и мельчайшие грани. Агрегаты «Маркс» (F13) тоже имеют компактное строение, но визуальное это мало заметно, так как на поверхности агрегата можно рассмотреть микротрещины и относительно более крупные образования. Агрегаты «Энгельс» (ЛС-7) и «Энгельс» (Bogara) качественно отличаются от предыдущих агрегатов. Они трещиноваты, имеют множество зерен и обособленных уплотнений на поверхности образцов, в их составе преобладают округлые формы.

В “мелких” агрегатах размером 1-2 мм (разрешение 0.88 мкм) общая видимая на томограммах пористость варьируется от 35 до 50%. Наименьшее значение характерно для «Маркс» (F13). Стоит отметить, что видимая общая пористость для «Кубань» (2_5ю_2) составляет 50% и приближается к значениям показателя пористости для целинных черноземов. Однако, в “крупных”, агрономически ценных агрегатах размером 3-5 мм (разрешение 2.4 мкм) ситуация для «Кубань» (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 (Таблица 10).

Как было показано ранее, особенности состава и строения уплотненного горизонта «Кубань» (2_5ю_2) свидетельствует в пользу развития здесь признаков слитогенеза. В то же время значения общей видимой пористости у “крупных” агрономически ценных агрегатов (разрешение 2.44 мкм) из уплотненного горизонта «Кубань» (2_5ю_2) более чем в 2 раза меньше, чем у других агрегатов, что, вероятно, связано с образованием большого количества особо тонких пор со средним диаметром (7-12 мкм). Дело в том, что общая видимая пористость “мелких” агрегатов (разрешение 0.88 мкм) составляет 50%, а средний диаметр пор 7-12 мкм сохраняется.

Таблица 10. 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	Агрегат компактный, однородный, поверхность ровная, грани острые	Агрегат компактный с микротрещинами, поверхность неровная, грани острые	Агрегат неоднородный, пористый, поверхность неровная, грани тупые	Агрегат неоднородный, трещиноватый, поверхность неровная, грани тупые

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

Если вернуться к результатам микроморфологического исследования, мы можем показать, что низкие значения видимой на томограммах общей (37%) и открытой пористости (9%) в “мелких” агрегатах из горизонтов «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 внутриведной массе, что уменьшает объем и сообщаемость пор внутри агрегатов.

Таким образом, наибольший интерес для установления ключевых различий между уплотненными горизонтами разного генезиса представляют данные томографического анализа в комплексе с микроморфологическими исследованиями. При общем сходстве протовертикальных и солонцеватых горизонтов по морфологическим, физическим и химическим признакам,

специфической особенностью проявления слитогенеза является большое количество внутриагрегатных тонких пор (7-12 мкм). Для агрегатов с обилием глинистого материала в порах и внутривагетной массе, генезис которых связан с проявлением осолонцевания, 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 зерен и обособленных уплотнений на поверхности образцов, а их значения видимой общей пористости относительно высоки (42-45%) как в “мелких”, так и в “крупных” агрегатах. Отличие богарных условий от орошения заключается в отсутствии микропризнаков активной внутривагетной миграции тонкодисперсного глинисто-гумусового вещества и в отсутствии текстурных новообразований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере четырех участков, расположенных на территории Краснодарского края и Саратовской области исследованы процессы формирования уплотнённых горизонтов разных типов агрогенных почв юга степной зоны Европейской территории России.

Предложенная группировка уплотненных горизонтов почв по морфологическим признакам: плотность, твердость, структура, распространение корней, пористость и трещиноватость, и их сочетаний в верхних горизонтах, показывает, что в почвах повышенных элементов рельефа признаки уплотнения выражены слабее, чем в почвах, занимающих локальные понижения.

Выявлены актуальные признаки уплотнения с помощью традиционных исследований морфологических и физических свойств, описанных в засушливый период (стратификация верхней части профиля почв на горизонты; плотность и пористость почвы; форма агрегатов, четкость ребер и граней, сочетание видов структур, качество структуры; характер распространения корней).

Показано, что морфологические признаки уплотнения, как правило, не обнаруживают прямой связи с физическими свойствами почв. Следует говорить о том, что комплекс физико-механических характеристик исследуемых почв и их профильное распределение указывают на потенциальную предрасположенность почв к уплотнению.

Для прогноза предрасположенности почв к переуплотнению и диагностики генетической природы уплотнения наряду с морфологическими и микроморфологическими признаками дополнительную информацию предоставляют количественные показатели: гранулометрический состав, содержание водно-пептизированного ила, содержание гумуса, рН, содержание обменного натрия.

Были выявлены следующие особенности генезиса уплотненных подпахотных горизонтов залегающих, как правило по понижениям рельефа: на объекте «Кубань» преимущественное значение имеет формирование так называемых «протовертикальных» горизонтов; объекту «Маркс» характерны

признаки солонцеватости («содиковые» признаки), по всей вероятности, остаточной; на объекте «Энгельс» в большей степени выражено физическое агроуплотнение как в условиях орошения, так и в богарных условиях.

Проведенные исследования позволили предположить, что, в отличие от классических вертисолей ведущими процессами развития “вертикальных” признаков и формирования «протовертикального» горизонта в исследованных почвах являются пластичные трансформации почвенной массы в водонасыщенном состоянии, связанные с высокой степенью пептизируемости и подвижности почвенной массы, склонной к заплыванию. Агротехнологический комплекс приемов, предусматривающий периодическое оголение поверхности почв, механическую обработку, стимулирует усиление частоты циклов набухания-усадки при их высокой скорости и повторяемости, и может способствовать актуализации рисков развития уплотнения. Указанные явления в совокупности приводят к деградации почвенной структуры в верхней части гумусового горизонта черноземов.

При помощи микроморфологических свойств (наличие кутан на поверхности педов и пор, ориентация гумусового материала, состав плазмы и равномерность ее распределения, коррозия минеральных зерен, обилие микроформ гумуса, пористость, строение и форма микроагрегатов) была дана детальная характеристика процессов, происходящих в уплотненных почвах.

Наибольший интерес для установления ключевых различий между уплотненными горизонтами разного генезиса представляют данные томографического анализа в комплексе с микроморфологическими исследованиями. При общем сходстве вертикальных и солонцеватых горизонтов по морфологии, физическим и химическим свойствам, специфической особенностью проявления слитогенеза является большое количество внутриагрегатных тонких пор (7-12 мкм). Для агрегатов с обилием глинистого материала в порах и внутрипедной массе, генезис которых связан с проявлением осолонцевания, 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 зерен и обособленных уплотнений на поверхности образцов, а их значения видимой общей пористости относительно высоки (42-45%) 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.

Таким образом, 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, механическим (агро-) переуплотнением в орошаемых и богарных условиях. Впервые проведены совместные томографические и микроморфологические исследования агрегатов $d=1-2$ мм и $d=3-5$ 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.

Диагностика различных проявлений уплотнения почв позволит точнее прогнозировать скорость и степень развития процессов деградации и предпринимать адекватные эффективные меры по их предупреждению и мелиорации земель.

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 протопертиковых горизонтов и горизонтов с признаками солонцеватости по морфологии, физическим и химическим свойствам, специфической особенностью агрегатов протопертиковых 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов-Каратаев И.Н. Вопросы происхождения и географического распространения солонцов СССР / Мелиорация солонцов в СССР. М., 1953. С. 11-266.
2. Ачканов А.Я., Николаева С.А. Вторичный гидроморфизм почв степных ландшафтов Западного Предкавказья // Почвоведение. 1999. № 12. С. 1424-1432.
3. Базовые шкалы свойств морфологических элементов почв. М.: ВАСХНИЛ, Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1982. 55 с.
4. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 4. С.285-302.
5. Безуглова О.С., Назаренко О.Г. Генезис и свойства мочаристых почв Предкавказья // Почвоведение. 1998. №12. С. 1423-1430.
6. Березин П.Н. Диагностика потенциальной и актуальной слитости по физическим критериям // Почвоведение. 1990. № 5. С. 65-75.
7. Березин П.Н., Воронин А.Д., Шеин Е.В. Структура почвы: энергетических подход к количественной оценке // Почвоведение. 1983. № 10. С. 63-69.
8. Березин П.Н., Воронин А.Д., Шеин Е.В. Физические основы и критерии слитогенеза // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1989. № 1. С. 31-38.
9. Большев Н.Н., Капустина Н.А. Природа, состав и свойства поглощенного комплекса солонцов // Почвоведение. 1964. № 2. С. 32-41.
10. Бондарев А.Г. Проблема уплотнения почв сельскохозяйственной техникой и пути ее решения // Почвоведение. 1990. № 5. С. 31-37.
11. Бондарев А.Г., Кузнецова И.В., Сапожников П.М. Переуплотнение почв сельскохозяйственной техникой, прогноз явления и процессы разуплотнения // Почвоведение. 1994. № 4. С. 58-64.
12. Быстрицкая Т.Л., Тюрюканов А.Н. Черные слитые почвы Евразии. М.: Наука, 1971. 255с.

13. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы определения физических свойств почв и грунтов. М., 1973.
14. Власенко В.П. Развитие гидроморфизма в почвах западных агроландшафтов Западного Предкавказья // Почвоведение. 2009. №5. С. 532-539.
15. Волобуев В.Р. О слитых черноземах // Почвоведение. 1948. № 11. С. 670-677.
16. Воробьева Л. А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
17. Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России // Почвоведение. 2012. № 7. С. 781-791.
18. Горбунов Н.И. Минералогия и физическая химия почв. М.: Наука, 1978. 293 с.
19. Горбунов Н.И., Абрикова Л.П. Реологические свойства и минералогический состав слитых почв // Почвоведение. 1974. № 8. С. 74–85.
20. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением.
21. Деградация и охрана почв / Под. ред. Г.В. Добровольского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 654 с.
22. Добровольский Г.В., Шоба С.А. Растровая электронная микроскопия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 142 с.
23. Елисеева Н.В. Физические свойства и режим влажности слитых черноземов западного Предкавказья // Почвоведение. 1983. №4. С.56-62.
24. Жданов М.А. Нефтегазопромысловая геология и подсчет запасов нефти и газа. М.: Недра, 1970. 488 с.
25. Зайдельман Ф.Р. Гидрологический фактор антропогенной деградации почвенного покрова России и меры ее предупреждения // Аграрная деградация почвенного покрова России и меры ее предупреждения. Всесоюз. конф. М., 1998. Т. 2. С. 70-72.
26. Иванов А.Л., Скворцова Е.Б., Корост Д.В., Герке К. М., Абросимов К.Н., Колокольцев В.В. Томографические исследования в российском почвоведении. Тезисы докладов Первой Всероссийской конференции «Практическая микротомография». Казань 2011. С. 75-83.

- 27.Изменение агрофизических свойств почв под воздействием антропогенных факторов / Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1990.
- 28.Караваева Н.А., Герасимова М.И. Карта «Агрогенные изменения запасов гумуса и уплотнение почв» масштаб 1:10 млн. // Почвоведение. 1997. № 3. С. 301-309.
- 29.Качинский Н.А. Физика почвы. Часть 1. Высшая школа. М., 1965. 328с.
- 30.Каштанов А.Н. Концепция устойчивого развития земледелия в России в XXI веке // Почвоведение. 2001. №3. С. 263-265.
- 31.Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- 32.Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
- 33.Ковда И.В. Вертисоли: проблемы классификации, эволюции // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1506-1518.
- 34.Ковда И.В. Географические закономерности, факторы и прогноз трансформации слитости почв // Почвоведение. 1995. № 6. С. 695–704.
- 35.Ковда И.В., Моргун Е.Г., Алексеева Т.В. Формирование и развитие почвенного покрова гильгай (на примере Центрального Предкавказья) // Почвоведение. 1992. № 3. С. 19–34.
- 36.Козловский Ф.И. Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв (на примере степной зоны). Автореф. дис. ... геогр. н. М., 1987. 50с.
- 37.Козловский Ф.И., Корнблум Э.А. Мелиоративные проблемы освоения пойм степной зоны. М.: Наука, 1972. 220с.
- 38.Козловский Ф.И., Целищева Л.К. Об антропогенной деградации южного чернозема в связи с уплотнением // География и генезис антропогенно-измененных и естественных почв. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В.Докучаева. М., 1986. С. 62-71.
- 39.Корнблум Э.А., Любимова И.Н. Почвенные факторы и механизм слитообразования. Прогноз слитообразования в орошаемых почвах (гипотеза и основные направления исследования) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В.Докучаева. 1972. Вып. 5. С. 138-152.

40. Корнблум Э.А., Любимова И.Н., Иванов А.М. О роли изменений плотности и твердости в образовании слитых черноземов Кубани // Почвоведение. 1977. №1. С. 14-30.
41. Куст Г.С. Диагностика степени солонцеватости почв по морфологическим критериям // Вест. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1988. № 2. С. 26-33.
42. Куст Г.С. Диагностические критерии степени солонцеватости южных черноземов // Почвоведение. 1985. №10. С. 23-30.
43. Куст Г.С. Опыт диагностики солонцеватых горизонтов // Почвоведение. 1989. № 8. С. 133-139.
44. Медведев В.В. Изменчивость оптимальной плотности сложения почв и ее причины // Почвоведение. 1990. № 5. С. 20-30.
45. Медведев В.В. Оптимизация агрофизических свойств черноземов. М.: Агропромиздат. 1988. 160с.
46. Медведев В.В. Физические свойства и характер залегания плужной подошвы в разных типах пахотных почв // Почвоведение. 2011. №12. С. 1487-1495.
47. Минкин М.Б., Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П. Карбонатно-кальциевое равновесие в почвенных растворах. М.: Изд-во МСХА. 1995. 210с.;
48. Николаева С.А., Еремина А.М. Трансформация соединений железа в черноземах в условиях повышенной увлажненности почв // Почвоведение. 2001. № 8. С. 963-969.
49. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1981. 272 с.
50. Основы экологии и охраны окружающей среды / А.Г. Банников, А.А. Вакулин, А.К. Рустамов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1999. С. 97.
51. Панов Н.П., Гончарова Н.А. Особенности генезиса малонатриевых солонцов степной зоны // Тр. ин-та почвоведения и агрохимии. Ереван, 1971. Вып. 6. С. 503-507.
52. Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. М.: Наука, 1977. 198 с.

53. Переуплотнение пахотных почв: причины, следствия, пути уменьшения / Под ред. чл.-кор. АН СССР В.А. Ковды. М.: Наука, 1987. 216 с.
54. Почвенный справочник / Под ред. М.И. Герасимовой, перевод И.В. Ковда. Ойкумена, 2000. 228 с.
55. Природно-техногенные воздействия на земельный фонд России и страхование имущественных интересов участников земельного рынка / Под общ. ред. Л.Л. Шишова, Е.И. Путилина, Д.С. Булгакова, И.И. Карманова. М. Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2000. 252с.
56. Пятый национальный доклад. Сохранение биоразнообразия в Российской Федерации. М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. 2015. 124с.
57. Рожков В.А., Скворцова Е.Б. 2009. Тектология почвенной мегасистемы (общность организации и анализа данных). Почвоведение, № 10, с. 1155-1164.
58. Розанов Б.Г. Генетическая морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 293с.
59. Розанов Б.Г. Морфология почв. Учебник для высшей школы. М.: Академический проект, 2004. 432 с.
60. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966. 384 с.
61. Сапожников П.М. Деградация физических свойств почв при антропогенных воздействиях // Почвоведение. 1994. № 11. С. 60-67.
62. Свитцов А.А. Введение в мембранную технологию. Уч. пособие. РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2006. 170 с.
63. Сервис Яндекс.Карты [Электронный ресурс]. ООО «ЯНДЕКС», 2015. Режим доступа: <http://www.maps.yandex.ru>.
64. Силева Т.М., Макеева В.И., Прохоров А.Н. Оценка возможной слитизации почв Ставрополя при орошении // Вест. Моск. ун-та. Серия 17. Почвоведение. 1997. № 4. С. 8–13.
65. Скворцова Е.Б. Изменение геометрического строения пор и агрегатов как показатель деградации структуры пахотных почв // Почвоведение. 2009. № 11. С. 1345–1353.

- 66.Скворцова Е.Б. Микроморфометрия порового пространства и диагностика почвенной структуры // Почвоведение. 1994. № 11. С. 42-50.
- 67.Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р. Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства // Почвоведение. 1993. № 6. С. 49-57.
- 68.Слитоземы и слитые почвы / Под ред. Е.М. Самойловой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 182 с.
- 69.Соколов В.Н. Проблема лёссов // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 86–93.
- 70.Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах: Уч. пособие. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.
- 71.Сорокин А.С., Куст Г.С. Уплотнение черноземов правобережья реки Кубань // Почвоведение. 2015. № 1. С. 71-80.
- 72.Тыртышный В.П. К вопросу о генезисе слитых черноземов // Тр. Азово-Черномор. Селекцентра. 1936. Вып. 1. С. 10-15.
- 73.Физические и водно-физические свойства почв: Учебно-методическое пособие для студентов специальностей 2604.00 и 2605.00. М.: МГУЛ, 2002. 73 с.
- 74.Хитров Н.Б. Выбор диагностических критериев слитогенеза с степени его выраженности // Почвоведение. 2003. № 10. С. 1157-1167.
- 75.Хитров Н.Б. Выбор диагностических критериев существования и степени выраженности солонцового процесса в почвах // Почвоведение. 2004. № 1. С. 18-31.
- 76.Хитров Н.Б. Генезис, диагностика, свойства и функционирование глинистых набухающих почв Центрального Предкавказья. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 505 с.
- 77.Хитров Н.Б. Деградация почв и почвенного покрова: понятия и подходы к получению оценок / Антропогенная деградация почвенного покрова и меры ее предупреждения // Тез. докл. Всерос. конф. 16-18 июня 1998. Т. 1. М., 1998. С. 20-26.

- 78.Хитров Н.Б. Слитогенез в почвах Центрального-черноземных областей России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 935–943.
- 79.Чухров Ф.В., Горшков А.И., Березовская В.В., Тюрюканов А.Н., Сивцов А.В. К геохимии и минералогии марганца и железа в молодых продуктах гипергенеза // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1980. № 7. С. 5-24.
- 80.IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2014. 191p.
- 81.IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 2006. 145p.
- 82.Kim H.M., Anderson S.H., Motavalli P.P., Gantzer C.J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field // Geoderma. 2010. V. 160. P. 244–251.
- 83.Kovda I., Mermut A. Vertic features. In: Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths / Eds.: G. Stoops, V. Marcelino, F. Mees. Elsevier, 2010. P. 117-137.
- 84.Luo L., Lin H., Halleck P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computed tomography // Am. Soil Sci. Soc. J. 2008. V. 72. P. 1058–1069.
- 85.Luo L., Lin H., Li S. Quantification of 3D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography // J. hydrology. 2010. V. 393. P. 53–64.
- 86.Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., Sombroek W.G. World map of the status of human-induced soil degradation. ISRIS-UNEP, 1992.
- 87.Pires L.F., Bacchi O.O.S., Reichardt K. Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis // Soil and Tillage Research. 2007. V. 94. P. 537–545.
- 88.Pires L.F., Borges J.A.R., Bacchi O.O.S., Reichardt K. Twenty five years of computed tomography in soil physics: F literature review of Brazilian contribution // Soil and Tillage Research. 2010. V. 110. P. 197–210.

89. Pires L.F., Cassaro F.A.M., Bacchi O.O.S., Reichardt K. Nondestructive image analysis of soil surface porosity and bulk density dynamics // *Radiation Physics and Chemistry*. 2011. V. 80. P. 561–566.
90. Picuela J., Alvarez A., Andina D., Heck R.J., Tarquis A.M. Quantifying soil pore distribution from 3D images: Multifractal spectrum through wavelet approach // *Geoderma*. 2010. V. 155. P. 203–210.
91. Rasband W.S. *ImageJ*. Bethesda, MD, USA, U.S. National Institutes of Health. 1997. (also available at imagej.nih.gov/ij/)
92. Stoops G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin section. Published by Soil Sci. Soc. Am. Inc. Madison, Wisconsin, USA. 2003. 184 p.
93. Udawatta R., Anderson S.H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers // *Geoderma*. 2008. V. 145. P. 381–389.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список названий таблиц и подрисуночных подписей:

Таблица 11. Основные физико-механические свойства почв объекта «Кубань» с учетом группировки.

Таблица 12. Основные физико-механические свойства почв объекта «Маркс» с учетом группировки.

Таблица 13. Основные физико-механические свойства почв объекта «Энгельс» с учетом группировки.

Таблица 14. Минералогический состав илистой фракции почв (менее 0.001 мм).

Рисунок 18. Обработанное изображение россыпи агрегатов почв размером 1-2 мм из уплотненных горизонтов.

Рисунок 19. Профили пахотных почв с признаками уплотнения разного генезиса.

Таблица 11. Основные физико-механические свойства почв объекта «Кубань» с учетом группировки: D – плотность почвы, <0.001 мм – содержание фракции менее 0.001 мм, ВПИ/ Ил – отношение содержания водно-пептизированного ила к содержанию фракции менее 0.001 мм, <0.01 мм – содержание фракции менее 0.01 мм, P_c – «гранулометрический показатель структурности», $R_v(Rh)$ – набухаемость почвы по объему и высоте, $h_{0.5}/H$ – относительное набухание почвенной массы через 0.5 часа после начала набухания, W_r – влажность максимального набухания, Гумус – содержание гумуса в %, Na – содержание обменного натрия в ППК в %, pH – значение показателя, отражающего реакцию среды.

GPS	Участок	Гори- зонт	Группа	Глубины (мощность), см	D , г/см ³	ВПИ/ Ил	<0.001 мм	<0.01 мм	P_c	$R_v(Rh)$	$h_{0.5}/H$	W_r	Гумус	Na	pH
Повышенные участки мезорельефа															
N45,27671 E039,61512	1_1с_1	Ap	(а)	0-22 (22)	1,4	30,8	34,1	56,5	118	18,6	82,0	48,8	3,3	0	7,2
		Apd	(б)	22-30 (8)	1,4	40,8	35,9	61,4	122	21,1	84,4	51,4	3,2	0	7,0
		A		30-92 (62)	1,3	99,5	38,3	55,9	108	23,2	86,4	56,3	4,1	0	7,3
N45,31634 E039,61985	2_5ю_1	Ap	(в)	0-20 (20)	1,5	99,3	33,2	56,9	119	16,5	81,8	49,3	3,7	0	7,1
		Apd	(в)	20-35 (15)	1,5	64,2	35,3	54,8	118	19,0	81,1	51,4	4,1	0	7,0
		A		35-94 (59)	1,4	68,0	34,1	56,0	105	24,1	85,1	56,9	4,0	0	7,2
Участки склонов															
N45,27350 E039,61117	1_1с_3	Ap	(а)	0-23 (23)	1,3	68,7	32,5	56,8	138	17,2	80,2	46,1	3,5	0	7,1
		Apd	(б)	23-40 (17)	1,4	62,8	33,2	56,1	104	20,9	84,2	52,5	3,6	0	7,0
		A		40-92 (52)	1,3	68,7	35,1	55,7	99	21,3	84,0	52,7	4,1	0	7,2
N45,31814 E039,62117	2_5ю_3	Ap	(б)	0-21 (21)	1,3	99,6	33,1	55,9	111	17,3	83,8	48,3	3,5	0	7,0
		Apd	(в)	21-40 (19)	1,4	72,7	35,3	58,0	102	19,9	82,9	50,3	3,7	0	7,1
		A		40-91 (51)	1,4	99,3	35,3	59,3	127	25,3	85,0	56,4	3,6	0	7,3
Локальные пониженные участки мезорельефа															
N45,27783 E039,61187	1_1с_2	Ap	(б)	0-24 (24)	1,4	78,9	35,0	58,1	120	19,2	81,9	48,9	3,5	0	7,3
		Apd	(г)	24-42 (18)	1,5	55,2	36,5	58,8	116	23,1	85,4	49,6	3,6	0	7,2
		A		42-92 (50)	1,4	24,1	34,5	58,3	115	24,2	84,3	53,3	4,2	0	7,4
N45,32082 E039,62196	2_5ю_2	Ap	(в)	0-21 (21)	1,5	74,2	35,2	57,5	120	20,6	77,5	47,4	3,5	0	7,0
		Apd	(г)	21-40 (19)	1,5	73,4	34,5	57,6	117	22,4	82,6	49,5	3,4	0	7,2
		A		40-94 (54)	1,4	34,3	33,4	58,6	111	24,5	84,1	53,8	3,6	0	7,3

Таблица 12. Основные физико-механические свойства почв объекта «Маркс» с учетом группировки: D – плотность почвы, <0.001 мм – содержание фракции менее 0.001 мм, ВПИ/ Ил – отношение содержания водно-пептизированного ила к содержанию фракции менее 0.001 мм, <0.01 мм – содержание фракции менее 0.01 мм, $Rv(Rh)$ – набухаемость почвы по объему и высоте, $h0.5/H$ – относительное набухание почвенной массы через 0.5 часа после начала набухания, Wr – влажность максимального набухания, Гумус – содержание гумуса, Na – содержание обменного натрия в ППК, pH – значение показателя, отражающего реакцию среды.

GPS	Участок	Горизонт	Группа	Глубины (мощность), см	D , г/см ³	ВПИ/ Ил	<0,001 мм	<0,01 мм	$Rv(Rh)$	$h0,5/H$	Wr	Гумус	Na	pH
Повышенные участки мезорельефа														
N51,71582 E047,13292	F2	Ap	(a)	0-11 (11)	1,2	27,5	24,79	39,59	8,20	80,2	46,1	2,7	4,1	7,6
		Apd	(b)	11-27 (16)	1,3	35,8	35,51	46,45	14,18	79,6	52,5	2,8	4,1	7,7
		A		27-48 (21)	1,3	15,0	33,72	47,58	11,12	75,5	52,7	2,9	4,3	7,9
Участки склонов														
N51,71889 E047,18005	F9	Ap	(a)	0-26 (21)	1,3	37,8	21,32	38,16	7,05	76,6	47,4	2,8	4,5	7,9
		Bd	(a)	26-37 (11)	1,4	43,3	26,68	49,32	5,60	82,1	49,5	1,5	6,1	8,2
		B		37-94 (57)	1,4	39,1	27,84	48,36	7,39	81,2	53,8	1,5	5,9	8,5
N51,71973 E047,18126	F10	Ap	(a)	0-14 (14)	1,3	29,5	25,23	41,60	4,77	86,4	48,8	2,6	4,0	7,7
		Apd	(a)	14-21 (7)	1,3	44,4	25,85	43,24	10,51	83,2	51,4	2,7	5,4	7,9
		A		21-35 (14)	1,3	24,0	25,72	45,96	4,00	80,0	56,3	2,8	5,7	7,9
Пониженные участки мезорельефа														
N51,71992 E047,19115	F13	Ap	(a)	0-10 (10)	1,3	66,2	26,84	43,22	14,52	78,5	48,9	2,8	5,1	7,9
		Bd	(r)	10-29 (19)	1,4	64,2	34,58	49,95	14,31	83,9	49,6	2,1	9,8	8,3
		B		29-80 (51)	1,4	88,6	32,80	48,99	6,57	79,1	53,3	1,9	17,4	8,7

Таблица 13. Основные физико-механические свойства почв объекта «Энгельс» с учетом группировки: D – плотность почвы, <0.001 мм – содержание фракции менее 0.001 мм, ВПИ/ Ил – отношение содержания водно-пептизированного ила к содержанию фракции менее 0.001 мм, <0.01 мм – содержание фракции менее 0.01 мм, $Rv(Rh)$ – набухаемость почвы по объему и высоте, $h0,5/H$ – относительное набухание почвенной массы через 0.5 часа после начала набухания, Wr – влажность максимального набухания, Гумус – содержание гумуса, Na – содержание обменного натрия в ППК, pH – значение показателя, отражающего реакцию среды.

GPS	Участок	Горизонт	Группа	Глубины (мощность), см	D , г/см ³	ВПИ/ Ил	<0,001 мм	<0,01 мм	$Rv(Rh)$	$h0,5/H$	Wr	Гумус	Na	pH
Повышенные участки мезорельефа														
N51,39162 E046,05177	ЛС-3	Ap	(a)	0-21 (21)	1,2	16,8	21,4	35,2	15,3	86	65,2	3,0	0	6,8
		Apd	(a)	21-31 (10)	1,4	14,1	22,8	35,3	17,6	84	67,1	3,2	0	6,9
		A		31-48 (17)	1,3	14,8	21,0	32,3	13,7	91	68,0	3,2	0	7,3
N51,37277 E046,06025	ЛС-8	Ap	(a)	0-19 (19)	1,2	15,3	18,8	35,9	11,8	88	67,1	3,1	0	7,2
		Apd	(a)	19-29 (10)	1,4	13,0	22,7	35,4	15,2	93	67,3	3,1	0	7,0
		A		29-41 (12)	1,3	16,4	20,2	36,2	17,0	91	66,7	3,1	0	7,3
Участки микро-склонов														
N51,39165 E046,05111	ЛС-2	Ap	(a)	0-20 (20)	1,3	14,0	20,5	30,8	12,0	85	66,2	2,9	0	6,9
		Apd	(a)	20-33 (13)	1,4	12,7	21,3	32,6	13,6	90	66,5	3,0	0	7,0
		A		33-45 (12)	1,2	11,4	19,3	31,5	13,8	92	66,7	3,3	0	6,9
N51,35928 E046,06412	Богара	Ap	(a)	0-14 (14)	1,3	15,6	20,9	33,5	17,6	84	66,1	2,8	0,5	7,3
		Apd	(a)	14-26 (12)	1,4	17,7	22,4	34,4	19,0	88	67,1	2,8	2,1	7,5
		A		26-43 (17)	1,4	19,3	23,0	34,9	18,5	86	67,0	2,7	3,0	7,9
Локальные пониженные участки мезорельефа														
N51,39179 E046,05066	ЛС-1	Ap	(б)	0-15 (15)	1,3	16,0	19,2	29,2	14,3	86	66,3	3,0	0	7,1
		Apd	(б)	15-24 (9)	1,4	18,4	20,9	30,4	15,7	88	66,2	3,1	0	7,0
		A		24-39 (15)	1,3	18,4	19,4	29,6	14,1	86	66,5	2,9	0	6,9
N51,38377 E046,05525	ЛС-7	Ap	(б)	0-10 (10)	1,3	16,2	22,2	34,3	16,5	90	66,7	3,4	0	6,9
		Apd	(б)	10-23 (13)	1,4	14,4	23,6	36,1	17,7	93	66,1	3,5	0	6,9
		A		23-30 (7)	1,3	11,8	23,0	35,3	16,5	89	67,1	3,3	0	6,9

Таблица 14. Минералогический состав илистой фракции почв (менее 0.001 мм).

Краткое название	Горизонт	Мезорельеф	Бейделит	Каолинит	Диоктаэдрический иллит	Диоктаэдрический монтмориллонит	Диоктаэдрический вермикулит	Галлуазит	Почвенный хлорит	Триоктаэдрический хлорит	Триоктаэдрический иллит
«Кубань» LP103-2	A	Повышенные участки	-	+	+/-	-	-	-	+	-	+/-
«Кубань» (2_5ю_2)	Apd	Пониженные участки	+/-	++	+/-	-	-	-	+	++/-	+/-
«Кубань» (2_5ю_2)	A	Пониженные участки	-	+	+/-	-	+/-	-	+	+/-	+/-
«Энгельс» Bogara	Apd	Участки склонов	-	+	+/-	-	+/-	-	+	+	+/-
«Энгельс» Bogara	A	Участки склонов	-	+	+/-	-	+/-	-	+/-	+	+/-
«Энгельс» LS7	Ap	Пониженные участки	+/-	+	+/-	+/-	+/-	-	+	-	+/-
«Энгельс» LS7	Apd	Пониженные участки	-	+	+/-	-	+/-	-	+	+/-	+/-
«Энгельс» LS7	A	Пониженные участки	-	+	+/-	-	+/-	-	+/-	+	+/-
«Маркс» F2	A	Повышенные участки	-	+	+/-	-	+/-	-	+	+/-	+/-
«Маркс» F10	A	Участки склонов	-	+	+	-	+	-	+	-	+/-
«Маркс» F13	Ap	Пониженные участки	-	+	+/-	-	+	-	+	+	+/-
«Маркс» F13	Bd	Пониженные участки	-	+	+/-	-	+	-	+	-	+/-

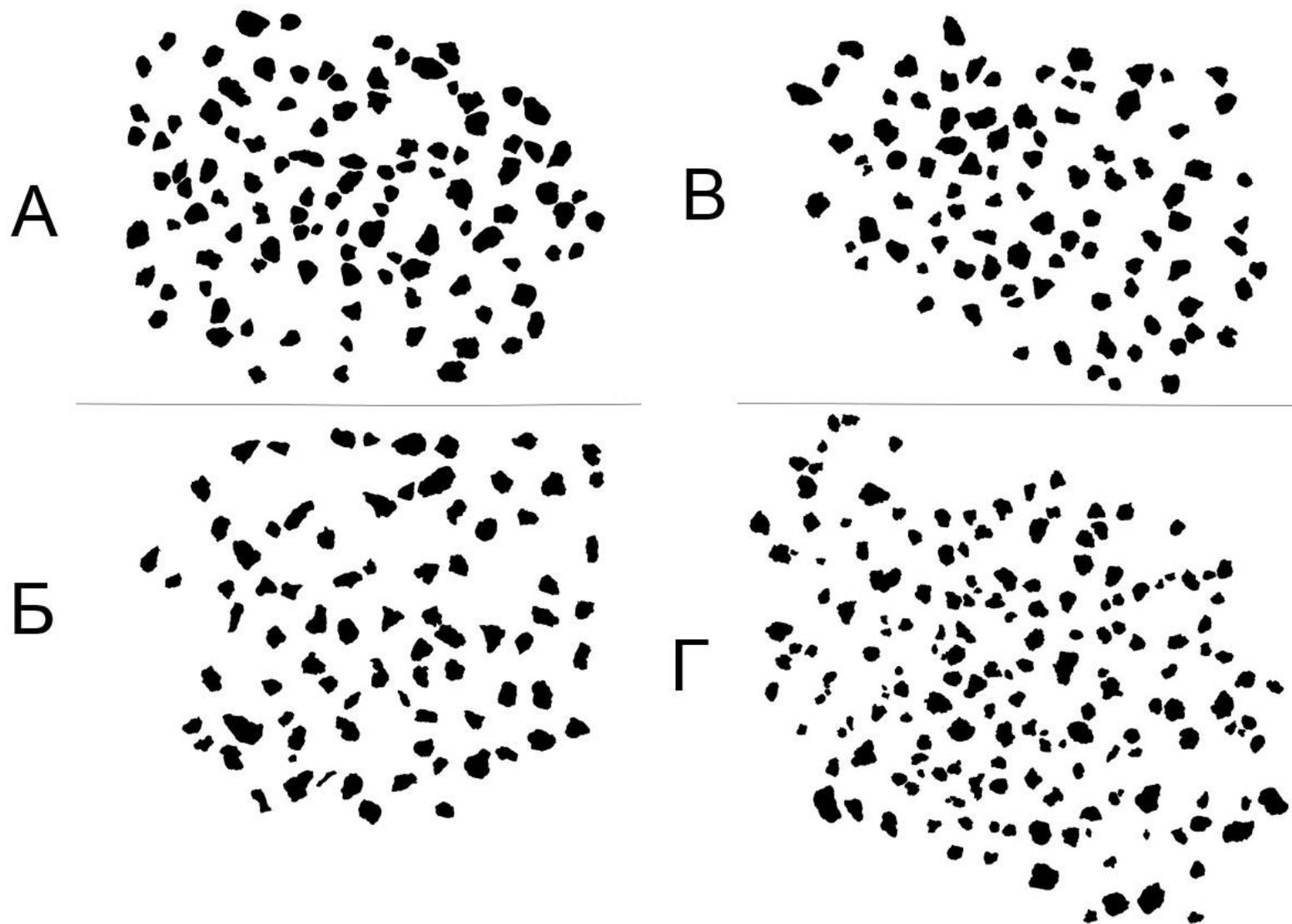


Рисунок 18. Обработанное изображение россыпи агрегатов почв размером 1-2 мм из уплотненных горизонтов.

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

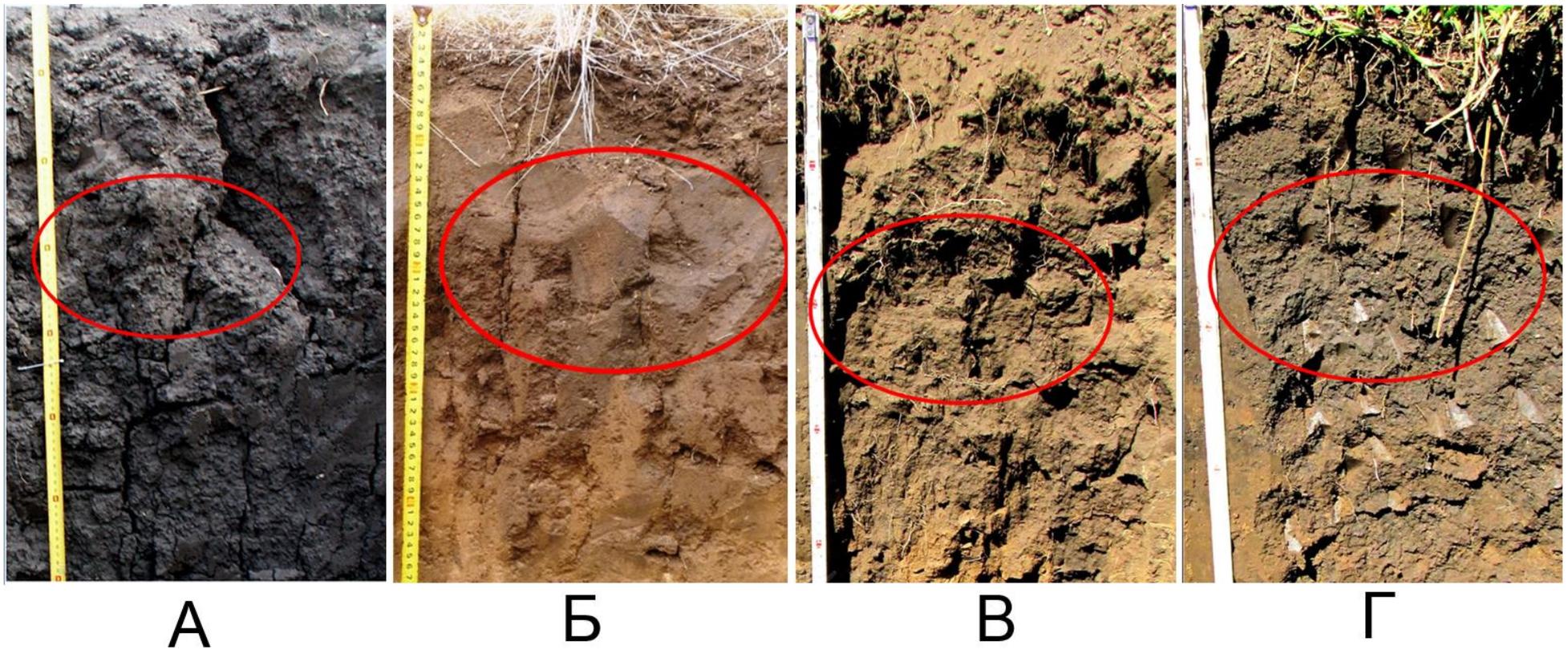


Рисунок 19. Профили пахотных почв с признаками уплотнения разного генезиса.

Примечание: А – «Кубань» (2_5ю_2); Б – «Маркс» (F13); В – «Энгельс» (Vogara); Г – «Энгельс» (ЛС-7). Красным овалом выделены области расположения подпахотных уплотненных горизонтов почв.