

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.472.8

### ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА ПОЧВ ПОД ВЛИЯНИЕМ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ<sup>1</sup>

© 2021 г. Е. Ю. Прудникова<sup>a, b, \*</sup>, И. Ю. Савин<sup>a, b</sup>, М. П. Лебедева<sup>a</sup>, Д. С. Волков<sup>a, c</sup>,  
О. Б. Рогова<sup>a</sup>, Е. Б. Варламов<sup>a</sup>, К. Н. Абросимов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Институт экологии РУДН, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

<sup>c</sup>Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: prudnikova\_eyu@esoil.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 15.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Целью исследований явился анализ особенностей трансформации поверхностного слоя пахотных горизонтов черноземов, серых лесных и дерново-подзолистых почв под воздействием атмосферных осадков. Исследования проводили с использованием образцов почв, отобранных на ключевых участках, полевых наблюдений, а также результатов модельного эксперимента. Анализировали состояние поверхности почв, ее цвет, микроморфологическое и микротомографическое строение и химический состав. Установлено, что воздействие атмосферных осадков приводит к изменению свойств поверхностного слоя пахотного горизонта почв. Изменения минералогического состава выражаются в перераспределении минералов между гранулометрическими фракциями. Чем дольше почва остается открытой под воздействием чередования осадков и высыхания, тем более выражено формирование поверхностных микрослоев вымывания (элювиальных) и микрослоев вмывания (иллювиальных), различающихся содержанием тонкодисперсных органико-минеральных веществ и их структурной организацией. Исходное состояние гумуса и гранулометрический состав почвы определяют специфику формирующихся на поверхности микрогоризонтов. При этом в верхней части образуется слой из пылеватого или песчаного материала с минимальным количеством микроагрегатов и тонкодисперсного вещества, а ниже отчетливо увеличивается размер и количество агрегатов. Выявленные закономерности следует учитывать при дистанционном мониторинге и картографировании свойств почв. Для определения содержания гумуса в пахотном горизонте необходимо проводить съемку свежеспаханных и проборонованных полей. Минералогический состав, в свою очередь, будет лучше детектироваться по изображениям трансформированной поверхности пашни.

*Ключевые слова:* пахотные почвы, спектральная отражательная способность, деградация почв, бесконтактные методы изучения почв, почвенная корка, Albic Retisols, Luvisols, Luvic Chernic Phaeozems, Luvic Greyzemic Phaeozems

DOI: 10.31857/S0032180X21110113

#### ВВЕДЕНИЕ

Поверхность почвы — место максимального воздействия на почву атмосферных, метеорологических условий (температуры, осадков, снеготаяния, ветра, солнечной энергии), а также человека при сельскохозяйственном использовании почв. Особенно сильно это выражено на пахотных почвах, поверхность которых продолжительное время находится в открытом состоянии. Максимального изменения поверхность почв под влиянием этих факторов достигает в орошаемых

почвах аридных и субаридных регионов, что проявляется в образовании корок.

Мощность корок составляет от 1 мм до 5 см. Они отличаются от подстилающего материала хрупкостью, пористостью (размерами и формами пор) и плотностью, при высыхании растрескиваются. В настоящее время корки делятся на 3 типа [37]: 1) *физические* корки образуются при деструкции исходных почвенных агрегатов поверхностного горизонта за счет воздействия дождевых капель или седиментационных процессов (отложения ила, например, мутными водами); 2) *биологические* корки связаны с жизнедеятельностью мхов, лишайников, грибов, водорослей, которые вызывают связывание частиц почв; 3) *химические или соле-*

<sup>1</sup> К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизированных пользователей по <https://doi.org/10.31857/S0032180X21110113>.

вые корки связаны с накоплением тех или иных соединений, но чаще всего солей на поверхности почвы, преимущественно в аридном климате. Эти 3 формы корок не исключают их сочетания в естественных и агрогенных ландшафтах [28].

Для регионов с умеренным климатом физические корки описаны для суглинистых почв с низким содержанием органического вещества, особенно в условиях деградации почв при их нерациональном сельскохозяйственном использовании. Микроморфологические, микроморфометрические исследования позволяют увидеть начальные этапы изменения структуры, пористости, взаимоотношение крупных и тонких частиц в разных частях поверхностных горизонтов с образованием поверхностных физических корок — слоев с признаками разрушения исходных почвенных агрегатов, с остаточным накоплением пылевато-песчаных частиц за счет сопряженных процессов вымывания-вмывания тонкодисперсного вещества [16, 21, 22, 26, 27].

В настоящее время микротомографические исследования в комплексе с микроморфологическими проведены преимущественно для изучения генезиса и свойств физических корок естественных пустынных почв, для которых отмечено образование пузырчатого верхнего и тонкоплитчатого нижнего слоев [19]. Подобные микропризнаки были описаны, например, для ирригационных корок в пахотных южных черноземах Украины, орошаемых щелочными водами из оз. Сасык [10].

В регионах с умеренным климатом трансформация поверхности пахотных почв происходит преимущественно под влиянием атмосферных условий и/или при снеготаянии. При этом меняются свойства поверхностного слоя и самой поверхности пахотных почв. Характер изменений зависит как от погоды, так и от свойств почв, а также от особенностей механического воздействия на пахотный горизонт сельскохозяйственных орудий. В результате изменяется радиационный баланс, цвет, структура, влажность, органическое вещество, минералогический и гранулометрический состав поверхностного слоя почв [1, 6, 7, 9, 11, 15, 20, 25, 31].

Несмотря на то, что поверхность пахотных почв в умеренных широтах трансформируется гораздо слабее, чем в аридных и субаридных регионах при орошении, периодическая распашка вполне может приводить к постепенному изменению свойств всего пахотного горизонта. Состояние поверхности используется в качестве одного из индикаторов начальной фазы деградации почв [2, 37]. Также известно, что ее свойства предопределяют возможности дистанционной индикации вещественного состава с использованием спутниковых данных и данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов при картографировании и мониторинге почв [7, 9, 12,

14, 24, 29]. Несмотря на это, процессы трансформации поверхности пахотных почв под воздействием атмосферных условий в умеренных широтах до сих пор остаются малоисследованными.

Цель исследования — комплексное изучение характера трансформации поверхности пахотных горизонтов дерново-подзолистой, серой лесной и черноземной почв центра европейской части России в естественных условиях и в ходе модельного эксперимента под воздействием атмосферных осадков.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Для лабораторных исследований использовались образцы пахотного горизонта дерново-подзолистых (Albic Retisols [17]), серых лесных почв (Luvisols [17]), выщелоченных и оподзоленных черноземов (Luvic Chernic Phaeozems и Luvic Greyzemc Phaeozems [17]), отобранные на ключевых участках в Тульской (Ясногорский, Веневский, Щекинский, и Плавский районы) и Московской (Домодедовский район) областях (рис. S1). Также на ключевых участках проведены полевые наблюдения за динамикой поверхности пахотных почв и измерена ее спектральная отражательная способность в течение теплого времени года. Отбор образцов на ключевых участках осуществляли одновременно со съемкой спектральных кривых на каждом ключевом участке. Образцы отбирали на водораздельных участках, поэтому в данном случае поверхностный смыв не влиял на формирование поверхностного слоя анализируемых почв. На полях использовали общепринятую в данном регионе агротехнику возделывания сельскохозяйственных культур. Использованы результаты модельного эксперимента по изучению процесса коркообразования под воздействием атмосферных осадков с насыпными образцами пахотного горизонта дерново-подзолистой, серой лесной почв и выщелоченного чернозема (отобранные на ключевых участках в Ясногорском и Плавском районах Тульской области и Домодедовском районе Московской области) в лотках [1]. Серая лесная почва и выщелоченный чернозем имеют средне-суглинистый гранулометрический состав, дерново-подзолистая почва имеет супесчаный гранулометрический состав. Почвообразующими породами для серых лесных почв и черноземов являются покровные суглинки, для дерново-подзолистой почвы — супеси.

В рамках проведенного эксперимента лотки с образцами почв экспонировались под открытым небом в течение теплого сезона года. В ходе эксперимента образцы не перемешивали, появляющуюся растительность аккуратно удаляли пинцетом таким образом, чтобы не нарушить поверхность экспонируемых образцов. В модельном эксперименте образцы отбирали на анализы в на-

чале и в конце эксперимента. В конце эксперимента, после воздействия осадков и солнечной радиации в течение теплого времени года из лотков были отобраны микромонолиты почв для анализа их свойств.

Анализ всех образцов почв проводился следующими методами.

*Состояние поверхности* пахотных почв изучали в модельном эксперименте и по данным полевых наблюдений. Регулярно проводили фотографирование поверхности почв (для количественного анализа степени морфологической трансформации) как в модельном эксперименте, так и при полевых обследованиях. Более подробно модельный эксперимент описан ранее [1, 6].

*Изменение цвета поверхности* пахотных почв при ее трансформации оценивали по изменению ее спектральной отражательной способности (СОС). Для измерения СОС использовали полевой спектрометр HandHeld-2, регистрирующий СОС в диапазоне длин волн 325–1075 нм. Измерения проводили в пятикратной повторности. Из-за высокой зашумленности сигнала в анализе использовали только участок спектра 350–900 нм. Перед анализом спектральные кривые усредняли и сглаживали фильтром Савицкого-Голея в программе R (пакет *prospectr* [34]). Изучали изменение спектральной отражательной способности поверхности пахотных почв в течение вегетационного сезона 2019 г. в полевых условиях на тестовых участках, а также в рамках модельного эксперимента в 2017 г. с насыпными образцами пахотного горизонта этих же почв [6].

В конце модельного эксперимента в лотках (после трансформации поверхности) были отобраны микромонолиты (диаметром 1.5 и высотой до 4 см), вертикальный срез которых использовали для микроморфологического, томографического и химического анализов.

*Микроморфологический анализ* сделан с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX51 с цифровой камерой Olympus DP26 и программным обеспечением Stream Basic. Описания элементов микростроения проведены по международной классификации микропризнаков [35].

*Томографические исследования* внутренней структуры и порового пространства осуществлены с использованием рентгеновского микромографа SkyScan 1172G при энергии рентгеновской трубки 70 кВ и разрешении съемки 8 мкм. Обработка томографических данных и получение томографических срезов осуществлено при помощи программного обеспечения nRecon (Bruker, SkyScan) [33]. Томографические срезы обработаны и проанализированы при помощи программного обеспечения: STvox – генерация фрагмента объемной структуры образца со всеми выявленными рентген-контрастными фазами [32]; STanalyzer

(STan) – математическая обработка и расчеты объемных морфометрических показателей внутренней структуры для рентген-контрастных фаз. Были определены такие морфометрические показатели, как общая пористость (%), открытая и закрытая пористость (%) [23], объемная доля пор разного размера, а также содержание минеральных зерен различного размера (%).

*Химические свойства.* Во всех образцах почв, отобранных в поле и насыпных, в лотках, определены рН водный и солевой, содержание гумуса (по Тюрину), подвижный фосфор (по Кирсанову), обменный калий (по Масловой) и натрий (по ГОСТ 26950) обменные основания по Шолленбергу.

Общее содержание макро- и микроэлементов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре РеСпект в соответствии с ГОСТ 33850-2016.

Картирование элементов для вертикальных срезов микромонолитов выполнено с помощью спектрометра микрорентгенофлуоресценции ( $\mu$ -XRF) Tornado M4 Plus (Bruker Nano GmbH, Германия). Для генерации рентгеновского излучения использовали рентгеновскую трубку с родиевым анодом с апертурой коллиматора 500 мкм (50 кВ, 600 мкА) и поликапиллярной линзой, при этом размер пятна рентгеновского излучения составлял 20 мкм. Для регистрации флуоресцентного излучения использовали 2 идентичных энергодисперсионных детектора (при максимальной пропускной способности импульса 90 тыс. имп./с; максимальная энергия 40 кэВ, температура –35°C). Для картирования спектры (диапазон 0–40 кэВ) собирали в каждой точке через 8 мкм с временем измерения 10 мс в точке. Линии  $K\alpha$  использовались для построения карт распределения всех элементов. Измерения проводились в вакууме (около 2 мбар).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Трансформация поверхности на макроуровне.** Практически каждый дождь приводил к разрушению поверхностных агрегатов насыпных образцов. Поверхность образца сглаживалась и при высыхании – растрескивалась. После воздействия каждого последующего дождя уплотнение, выравнивание и растрескивание поверхности усиливались для образцов каждого типа почв.

По результатам модельного эксперимента образцы серой лесной почвы и выщелоченного чернозема в целом трансформировались похожим образом, хотя на поверхности выщелоченного чернозема трещины растрескивания были глубже и шире. В поле на поверхности черноземных почв местами отмечалось присутствие неразрушенных дождем водонепроницаемых гумусированных агрегатов

(рис. S2). Но в модельном эксперименте это было выражено достаточно слабо.

Механизм трансформации образца дерново-подзолистой почвы предопределялся его супесчаным гранулометрическим составом. Под воздействием осадков происходило “запечатывание” поверхности тонкодисперсным материалом. При этом на поверхности оставалась песчаная фракция и отмытые крупные минеральные зерна (рис. S3).

Данные модельного эксперимента подтвердились результатами полевых наблюдений. Было установлено, что в течение теплого сезона года поверхностный слой пахотных почв проходит несколько циклов трансформации. Началом нового цикла служит дождь, после которого заново при подсыхании поверхности происходит формирование трещин и корки. Под “коркой” мы понимаем поверхностный слой почвы, который выделяется морфологически на макроуровне. В полевых условиях новый цикл трансформации может начинаться также и с обработки почвы сельскохозяйственными орудиями, которая приводит к полному разрушению сформировавшейся корки и перемешиванию почвенного материала в пределах глубины воздействия. После подобной обработки трансформация поверхности начнется заново после выпадения первого же дождя.

**Микроморфологическая характеристика трансформации поверхности пахотных почв.** Анализ элементов микростроения поверхностного слоя образцов почв в ходе модельного эксперимента под воздействием атмосферных осадков показал присутствие признаков начала формирования поверхностных микрогоризонтов в слое корки: самый поверхностный микрогоризонт отличается наиболее низким содержанием тонкодисперсного вещества по сравнению с нижележащим, тонкопылеватым составом и повышенной уплотненностью. Глубже него отмечено увеличение размера микроагрегатов, включенных в пылеватый силикатный материал (рис. 1, 2). Степень выраженности этих микрогоризонтов в разных типах почв различна, что определяется их свойствами. В первую очередь это связано с исходно разным гранулометрическим составом. В ряду почв: чернозем — серая лесная — дерново-подзолистая наиболее сильно опесчаненная является последняя. В черноземе песчаные зерна отмечены в очень небольшом количестве.

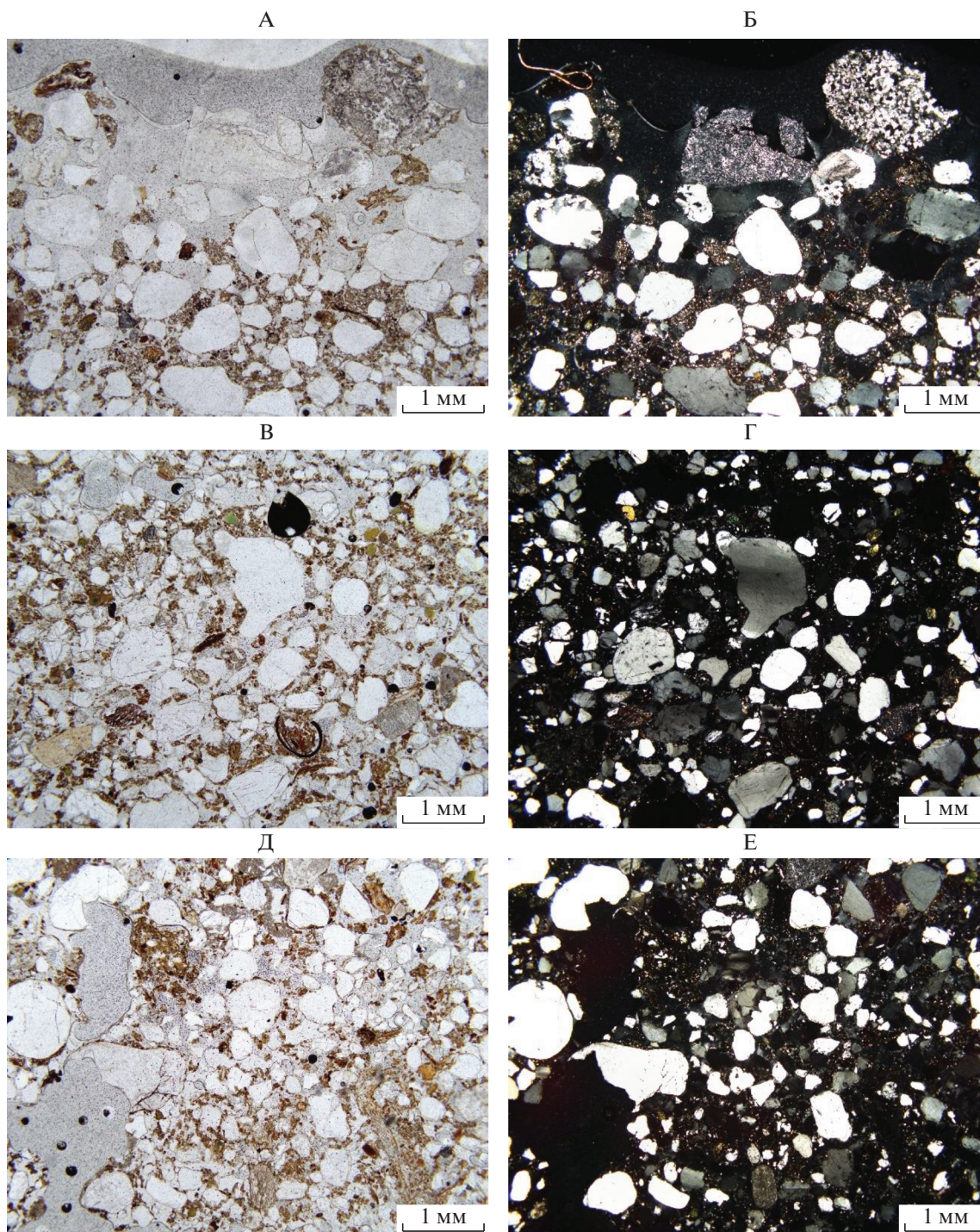
В срединной и нижней частях микромонолита дерново-подзолистой почвы отмечено низкое содержание тонкодисперсного материала, который представлен мелкими органо-минеральными сгустками с рыхлой упаковкой между песчаными зернами или образующими тонкие фрагментарные покровы (кутаны) на поверхности крупнопесчаных частиц (рис. 1, А, Б). Диффе-

ренциация материала в микромонолите за время экспонирования образца в модельном эксперименте проявилась: 1 — в остаточном накоплении на поверхности почвы наиболее крупных песчаных зерен с чистыми (отмытыми от пленок) поверхностями; минералогический состав крупных фракций представлен кварцем, полевыми шпатами и темноцветными выветрелыми минералами и обломками пород; 2 — в накоплении и уплотнении под отмытым остаточным песчаным слоем тонкодисперсного материала с чешуйчатой оптической ориентацией глины и более мелких песчаных частиц, вероятно частично перемещенных с верхних 2 мм (рис. 1, Б). В средней и нижней частях микромонолита отмечен рыхлый исходно гомогенизированный почвенный материал с межагрегатной пористостью, со слабо разложенными растительными остатками и микросгустковой глинисто-органической микромассой (рис. 1, В–Г).

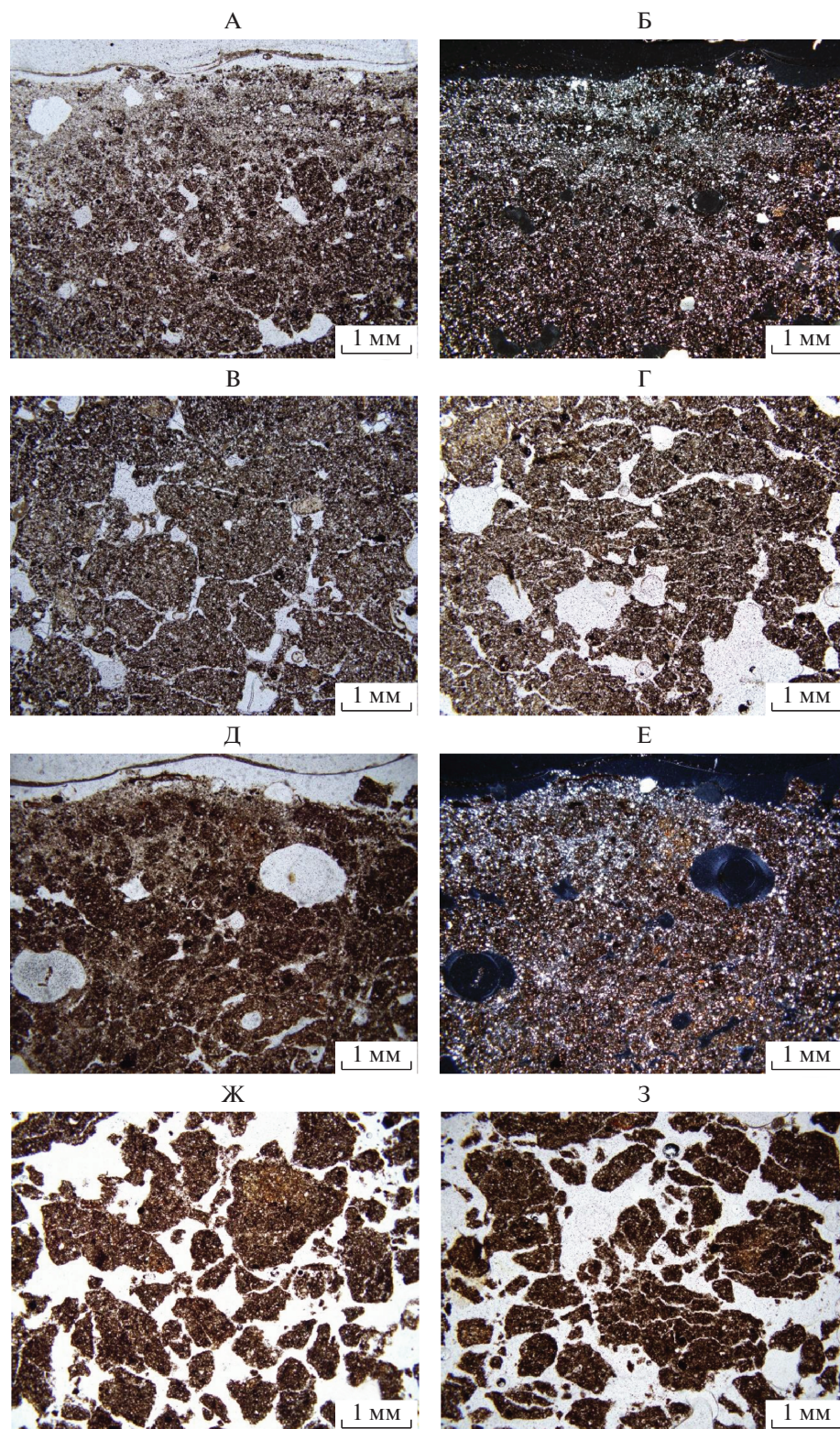
В образце чернозема, имеющего более высокое содержание органо-минерального тонкодисперсного материала и крупнопылеватых частиц (песчаные зерна единичны), отмечена отчетливая структурная и вещественная дифференциация внутри новообразованной светлой (на макроуровне) корки (рис. 2).

В поверхностных 2 мм отмечена очень тонкая слоистость из чередования чисто пылеватого материала и микрослоев с очень мелкими агрегатами, при этом отмечено постепенное увеличение размера глинисто-гумусовых агрегатов сверху вниз, что связано с их разрушением на самой поверхности микромонолита (рис. 2, А, Б).

В результате под тонкой слоистостью отмечен материал с более крупными агрегатами, между которыми есть заполнения трещин (инфиллинги) отмытой пылью — вероятно они маркируют бывшие трещины-растрескивания корки в сухой период с заплыванием тонкопылеватого материала при дождях (рис. 2, Б). В пределах микромонолита отчетливо меняется характер пористости — от единичных изометричных изолированных пор в самой верхней части до типичной для черноземов губчатой пористости в средней части (рис. 2, В). В нижней части отмечено появление субпараллельной ориентации пор в плитчатых агрегатах (рис. 2, Г). Наличие изолированных пор с тонкопылеватого-глинистыми кутанами может быть связано с частичной диспергацией ила в условиях некоторого застоя воды после дождей на поверхности корки. Тонкодисперсный материал большинства агрегатов представлен изотропными микросгустками глинисто-гумусового состава, единично отмечены агрегаты, скорее всего, припаханные из нижележащего горизонта АВ с повышенным содержанием желтой глины (видимые при параллельных николях) и пониженным содержанием гумуса (рис. 2, Г).



**Рис. 1.** Элементы микростроения корковых микрогоризонтов насыпного пахотного материала из дерново-подзолистой почвы после эксперимента: А, Б – двухслойное строение поверхности корки – верхний микрослой из чисто песчаных зерен разного минералогического состава, нижний – песчаные зерна расположены в уплотненном тонкодисперсном материале (0–5 мм; А – II N; Б – X N); В, Г – сгустковое глинисто-гумусовое вещество между песчаными зернами, единичные растительные остатки (20–25 мм; В – II N; Г – X N); Д, Е – неравное распределение микросгусткового глинисто-гумусового вещества между песчаными зернами (35–40 мм, Д – II N; Е – X N).



**Рис. 2.** Элементы микростроения корковых микрогоризонтов насыпного пахотного материала из чернозема оподзоленного (А–Г) и серой лесной почвы (Д–З) после эксперимента: А, Б – плотный тонкопылеватый микрослой с остатками разрушенных мелких агрегатов подстилается более крупными глинисто-гумусовыми агрегатами (0–5 мм; А – II N; Б – X); В – угловато-округлые и плитчатые глинисто-гумусовые агрегаты (20–25 мм; II N); Г – плитчатые глинисто-гумусовые агрегаты (35–40 мм, II N); Д, Е – уплотненный глинисто-пылеватый микрослой с включением глинистых и глинисто-гумусовых агрегатов подстилается более крупными агрегатами с пылеватыми тонкими инфилингами (0–5 мм; Д – II N; Е – X N); Ж – угловатые остроугольные глинисто-гумусовые агрегаты (20–25 мм; II N); З – деление угловатых глинисто-гумусовых агрегатов на тонкие плитки (35–40 мм, II N).

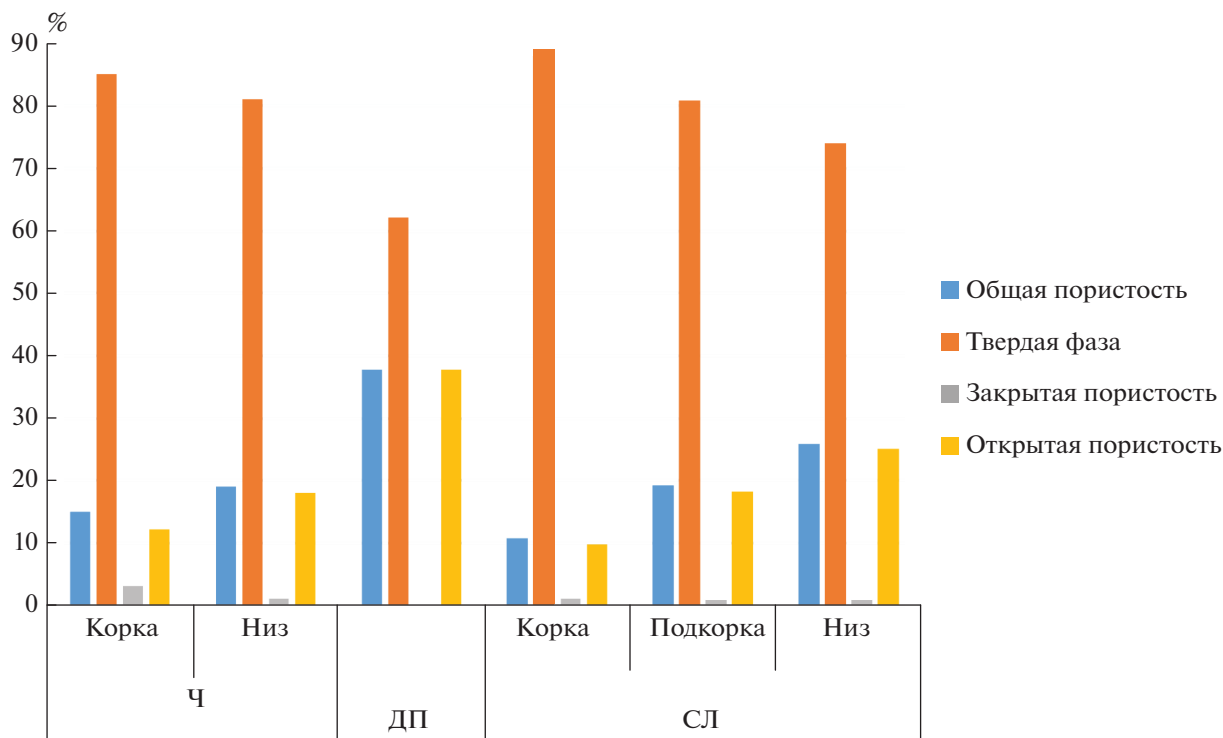


Рис. 3. Изменение порового пространства в процессе трансформации поверхности (Ч – выщелоченный чернозем, СЛ – серая лесная почва, ДП – дерново-подзолистая почва).

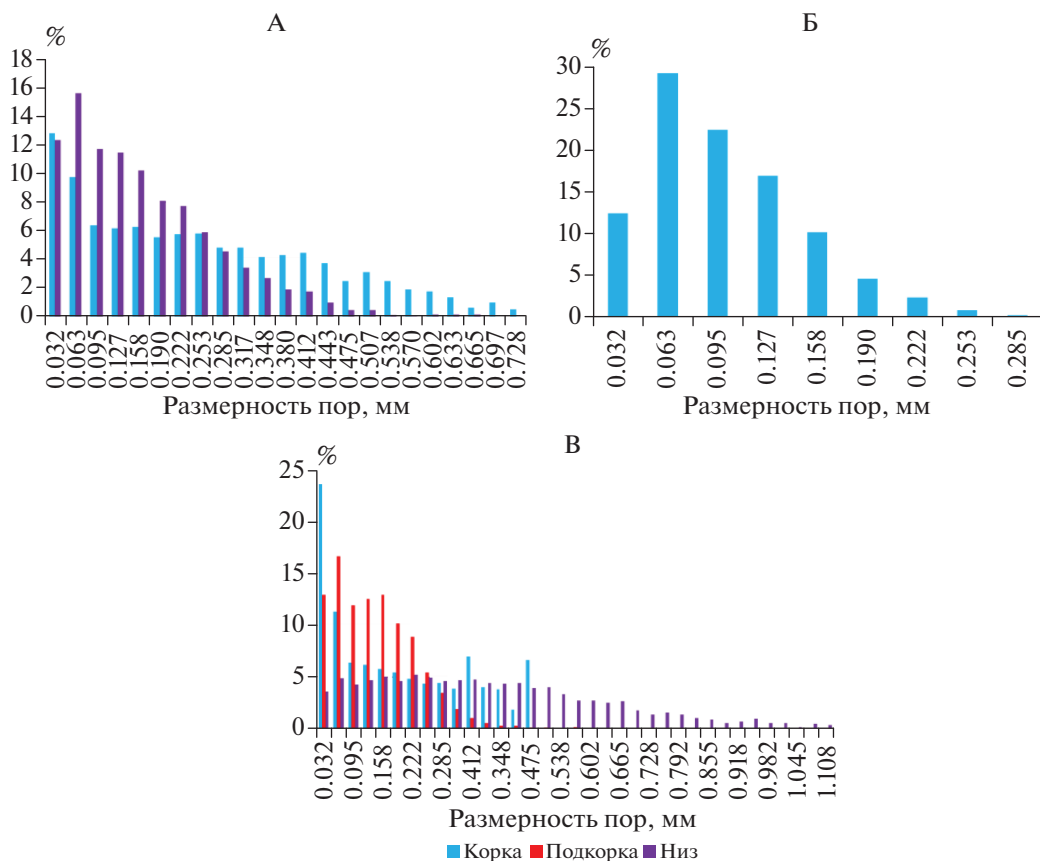
Материал микромонолита серой лесной почвы отличается от других почв более резкими границами угловато-округлых агрегатов, что связано с более высоким содержанием глины и меньшей гумусированностью агрегатов (рис. 2, Д, Е). Поверхностные уплотненные 2 мм отличаются появлением зон с остаточным накоплением крупнопылеватых частиц и мелких агрегатов, образовавшихся от разрушения более крупных (рис. 2, Д, Е). В целом появление пылеватых инфиллингов в процессе разрушения пылевато-гумусовых агрегатов аналогично ситуации, отмеченной выше для чернозема, но оно более локально. В средней и нижней части микромонолита в данной почве отмечается преобладание угловатых агрегатов и отчетливая трещиноватость более крупных структурных отдельностей (рис. 2, Ж, З). Предполагаем, что трещиноватые агрегаты образовались под влиянием уплотняющих проходов сельскохозяйственной техники на материал образца.

Таким образом, микроморфологический анализ показал, что макроморфологически выделяемая на поверхности почв корка состоит из микрогоризонтов, создающих микропрофиль, выраженность которого в разных почвах различна. Мощность микрогоризонтов связана с двумя процессами: 1 – интенсивностью разрушения микроагрегатов, их переорганизацией, остаточным накоплением силикатных частиц и 2 – вы-

ванием органического и глинистого материала с образованием глубже уплотненных микрогоризонтов мощностью до нескольких миллиметров. Под ними расположен материал, свойства которого связаны с характером агрегированности материала пахотных горизонтов, используемого в ходе эксперимента.

**Изменение порового пространства.** Микротомографический анализ тех же самых микромонолитов, из которых были сделаны шлифы, показал, что в случае чернозема слой корки с выраженными вецикулярными порами (они выражены и в шлифах) четко отделяется от подкоркового слоя (рис. S4a). В серой лесной почве между коркой (менее выраженной, чем в черноземе) и нижележащим слоем сформировался промежуточный слой оструктурирования (рис. S4б). Микромонолит дерново-подзолистой почвы, в свою очередь, оказался структурно однородным (рис. S4в).

Расчеты морфометрических показателей, проведенные по выделенным слоям, показали, что в корке уменьшается общая пористость, при этом сокращается открытая пористость и увеличивается закрытая пористость (рис. 3). Последняя, судя по всему, зависит от степени выраженности корки. Чем лучше выражена корка, тем больше в ней закрытых пор. Большой объем порового пространства в анализируемых микромонолитах представ-



**Рис. 4.** Распределение пор различного размера по слоям микромонолита (А – чернозем выщелоченный, Б – дерново-подзолистая почва, В – серая лесная почва).

лен закрытой пористостью при использованном томографическом разрешении.

При формировании корки меняется соотношение пор различного размера. Так, в черноземе уменьшилось число пор небольшого размера и увеличилась доля более крупных пор (рис. 4, А). В серой лесной почве во всех микрогоризонтах преобладали небольшие поры (рис. 4, В). В микромонолите дерново-подзолистой почвы также преобладали небольшие поры (рис. 4, Б).

В выщелоченном черноземе в слое корки оказалось больше минеральных зерен размером от 0.032 до 0.111 мм. В серой лесной почве сохраняются такие же закономерности. Однако величина разницы меньше. В отличие от корки и нижележащего слоя, в промежуточном среднем слое встречаются минеральные зерна (или более глинистые агрегаты) размером более 0.111 мм. Их суммарное содержание составляет 30% от общего количества зерен. В остальных микрогоризонтах их содержание не превышает 3%.

**Изменение химических свойств.** Анализ отобранных в полевых условиях образцов корок (поверхностного слоя трансформированной поверхности почв) и смешанных образцов пахотных го-

ризонтов почв показал, что содержание гумуса в образце корки при трансформации поверхности под воздействием атмосферных условий по отношению к смешанному образцу пахотного горизонта возрастает (табл. 1).

Результаты анализа химических свойств образцов исследуемых почв показали, что в слое корки серой лесной пахотной почвы отмечается более высокое содержание обменного кальция, которое достаточно сильно варьирует (табл. S1). Содержание доступного фосфора и калия в слое корки меньше. По содержанию макроэлементов корка и смешанный образец пахотного горизонта практически не отличаются друг от друга. Наибольшие изменения затронули содержание микроэлементов. В слое корки отмечается уменьшение содержания брома, свинца и рубидия. В ней практически в 2 раза меньше йода. В то же время в ней существенно больше стронция, циркония и ниобия, чем в смешанном образце.

В слое корки чернозема отмечается небольшое уменьшение содержания обменного кальция, доступного фосфора и калия (табл. S2). Содержание макроэлементов, так же, как и в случае серой лесной почвы, практически не изменилось. В корке



**Таблица 1.** Разница между содержанием гумуса в смешанном образце пахотного горизонта серой лесной почвы и чернозема и его содержанием в слое корки после трансформации поверхности под воздействием атмосферных условий

Почва	Смешанный образец	Слой корки	Абсолютная разница	Разница, %
	%			
Серая лесная	3.74	4.48	0.74	19.8
	3.00	4.11	1.11	37.0
	2.16	3.06	0.90	41.7
	5.91	6.05	0.14	2.4
	4.11	5.38	1.27	30.9
	3.27	3.06	-0.21	-6.4
	2.48	2.32	-0.16	-6.5
	2.11	3.16	1.05	49.8
	1.74	3.27	1.53	87.9
	2.75	2.38	-0.37	-13.5
	2.63	3.06	0.43	16.3
	2.58	3.48	0.90	34.9
	Чернозем выщелоченный	3.90	4.37	0.47
4.53		4.43	-0.10	-2.2
4.96		6.22	1.26	25.4
7.65		7.70	0.05	0.7
3.60		4.16	0.56	15.7

**Таблица 2.** Результаты анализа площадного распределения средневзвешенного содержания элементов в корке и нижележащем слое почв

Почва	Al	Ca	Fe	K	Mn	S	Si	Ti
Дерново-подзолистая	--	-	-	--	=	-	--	-
Серая лесная	--	--	--	--	+	-	--	-
Чернозем выщелоченный	--	-	-	-	+	-	--	=

Примечание. -- меньше в слое корки; - немного меньше в слое корки; = одинаково; + немного больше в слое корки.

немного уменьшилось содержание кремния. Содержание микроэлементов изменилось сильнее всего, однако масштабы изменений меньше, чем в случае серой лесной почвы. В корке уменьшилось содержание мышьяка, циркония, стронция и галлия. При этом увеличилось содержание никеля, меди, йода, рубидия и ниобия.

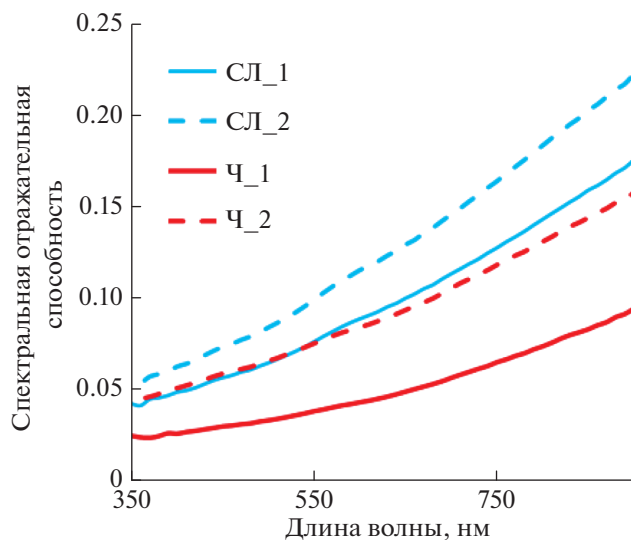
Площадной рентгенофлуоресцентный анализ вертикального среза микромонолитов дерново-подзолистой, серой лесной почв и чернозема показал слабо выраженную профильную дифференциацию валового содержания макроэлементов (табл. 2).

В корке всех исследуемых образцов было меньше алюминосиликатов по сравнению с нижележащим слоем, особенно в дерново-подзолистой и серой лесной почвах (Al, Si, K). Поскольку органическое вещество принимает непосредственное участие в накоплении марганца в почвах, его накопление в корке черноземов и серых лесных

почв по сравнению с дерново-подзолистой почвой связано с тем, что корка этих почв исходно содержит больше органического вещества.

В корке серой лесной почвы отмечается уменьшение содержания валового железа по сравнению с подкорковым слоем. В корке всех исследуемых почв снизилось валовое содержание серы, что свидетельствует о преобладании в ней переработанного органического вещества. Сера в почве находится преимущественно в составе органических соединений и переходит в форму растворимых сульфатионов, которые вымываются атмосферными осадками, только в процессе минерализации органических соединений. Таким образом, уменьшение валового содержания серы под воздействием атмосферных осадков, связано с тем, что из-за минерализации органического вещества она находилась преимущественно в доступной форме.

Таким образом, судя по данным площадного РФА вертикального среза в корках остается мень-



**Рис. 5.** Спектральная отражательная способность поверхностного слоя пахотных почв (0–2 мм): СЛ\_1 – нетрансформированная поверхность серой лесной почвы; СЛ\_2 – корка на поверхности серой лесной почвы; Ч\_1 – нетрансформированная поверхность чернозема; Ч\_2 – корка на поверхности чернозема. Спектральная отражательная способность измеряется в относительных единицах.

ше крупных фракций минералов, меньше растительных остатков, но становится больше тонкодисперсного органического вещества.

Согласно данным площадного РФА наиболее сильная дифференциация валового содержания макроэлементов произошла в серой лесной почве, наименьшая – в дерново-подзолистой почве.

**Изменение цвета открытой поверхности пахотных почв.** Спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв при ее трансформации также изменяется. Полевые измерения показывают, что изменяется как интенсивность спектрального отражения, так и форма спектральной кривой (рис. 5). Изменение интенсивности спектрального отражения связано, в основном, с разрушением почвенных агрегатов поверхностного слоя, которое происходит под воздействием атмосферных осадков и сопровождается сглаживанием поверхности и ее уплотнением. Поскольку поры выступают как ловушки для электромагнитного излучения, то уменьшение их числа и размера является также одной из причин увеличения интенсивности спектрального отражения поверхности почвы [4, 13]. К этому же может приводить и уменьшение содержания глинистых минералов, а также кластогенных минералов, за исключением кварца, который накапливается во фракции >10 мкм.

Изменение формы спектральной кривой вызвано изменением свойств, определяющих цвет

почвы (минералогический состав, органическое вещество).

Изменение СОС поверхности пахотных почв становится более выраженным при увеличении длины волны. При этом СОС поверхности дерново-подзолистой почвы меняется сильнее СОС поверхности остальных почв. В частности, увеличивается разница в отражении между красным и ближним ИК каналах, что может быть связано с началом формирования биологической корки на поверхности данной почвы [18, 30]. Выраженность биологической корки существенно зависит от влажности поверхностного слоя и того, насколько быстро он высыхает после дождя. В данном случае, вероятнее всего, открытая поверхность дерново-подзолистой почвы была перувлажнена определенный период времени до съемки спектральных кривых, что могло привести к формированию немного более выраженной биологической корки.

Результаты, полученные в модельном эксперименте, также подтверждают увеличение интенсивности спектральной отражательной способности при трансформации поверхности почв под воздействием дождей [1]. Чем дольше поверхность почвы находится под воздействием атмосферных осадков, тем сильнее увеличивается интенсивность отражения и возрастает разница между спектральным отражением в разных каналах. При этом наибольшая разница между спектральным отражением поверхности корки и смешанного образца наблюдалась в красной области спектра.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты макроморфологических, микротомографических и химических анализов показывают, что на поверхности почв под воздействием атмосферных осадков формируется в различной степени выраженный слой корки, который по своим свойствам существенно отличается от нижележащей части пахотного горизонта. Микротомографический анализ показал, что под коркой иногда выделяется еще один промежуточный слой (в серой лесной почве). Но по данным площадного химического картографирования достоверно выделяется лишь корка и нижележащий почвенный слой.

Результаты микроморфологического анализа позволили установить формирование под воздействием дождей элювиально-иллювиального микропрофиля, который выделяется в верхней части пахотного горизонта. Это же было отмечено ранее и при изучении гранулометрического и минералогического состава свойств этих же образцов [6]. Под воздействием атмосферных осадков в модельном эксперименте в поверхностном слое всех

исследуемых почв происходило перераспределение гранулометрических фракций. Так, в выщелоченном черноземе и серой лесной почве в поверхностном слое уменьшилось содержание ила, тонкой и средней пыли. При этом увеличилось содержание фракции  $>10$  мкм.

Перераспределение тонкодисперсных фракций за счет периодического разрушения глинисто-гумусовых агрегатов ударной силой дождевых капель, выноса более тонких микроагрегатов или органо-минеральных сгустков и отдельных тонкопылеватых и глинистых частиц в нижележащие слои (ниже поверхностных 2 мм, судя по данным микроморфологического анализа – рис. 1, А, Б; рис. 2, А, Б, Д, Е) вызвало перераспределение в содержании кластогенных и глинистых частиц в корке. Среди минеральных фаз наиболее заметная разница между микрогоризонтами вымывания и вмывания отмечена в содержании лабильных силикатов, как наиболее чувствительных минеральных компонентов.

Необходимо отметить, что фактически микрогоризонты вымывания и вмывания выделяются в слое, который макроморфологически диагностируется как корка и самый ближний подкорковый слой. То есть микроморфологический анализ позволил выявить особенности трансформации поверхности почв под воздействием дождей, которые на основе микротомографического и химического анализов выявить не удалось.

Отмечаемая разница в химическом составе между слоями корки и подкорки связана с изменением органического вещества и минералогического состава в поверхностном слое почвы, в основном, по-видимому, за счет его перераспределения.

В целом наблюдаемые изменения и микротомографически, и микроморфологически схожи с процессами коркообразования в орошаемых щелочными водами почвах или в такырах [37]. Но их выраженность намного слабее, что обусловлено как свойствами пахотного горизонта почвы, так и слабой минерализацией атмосферных осадков.

В полевом определителе почв 2008 г. [5] похожие образования было предложено выделять как генетический признак – корково-подкорковый микропрофиль ( $[akl]$ ), правда для аридных карбонатных почв, что не позволяет напрямую использовать этот генетический признак в нашем случае, хотя по результатам элювиально-иллювиальной дифференциации веществ можно говорить о большом сходстве между ними.

Следовательно, под воздействием атмосферных осадков на поверхности пахотной почвы образуется в различной степени выраженная корка с внутренней элювиально-иллювиальной дифференциацией почвенной массы. Дифференциация

проявляется в структуре и в соотношении крупно- и тонкодисперсных частиц. Чем дольше поверхность почвы открыта и подвергается воздействию атмосферных осадков и ветра, тем больше выражена корка и ее дифференциация на микрогоризонты.

Поверхность корки растрескивается. Интересно отметить, что положение трещин на поверхности в каждом цикле увлажнения поверхности/высыхание остается постоянным, что скорее всего обусловлено физическими свойствами всего пахотного горизонта почв (особенностями локальной макропористости пахотных горизонтов).

На поверхности корки могут остаточным образом накапливаться или водонепроницаемые агрегаты почвы, масса которых не позволяет их перемещение формирующимися во время дождей водными потоками (рис. S3), или более мелкие агрегаты, между которыми, за счет разрушения тонкодисперсного минерально-органического вещества агрегатов, остаются пылеватый силикатный материал, заполняющий межагрегатные поры (рис. 1, Д, Е, 2, А, Б). В почвах легкого гранулометрического состава на поверхности аккумулируются отмытые от гумусово-илистого вещества песчаные зерна, в почвах суглинистого состава с высоким содержанием лабильных глинистых минералов – тонкопылеватые. Полевые обследования также показали, что в черноземных почвах на поверхности корки часто формируется своеобразная “присыпка”, состоящая из водонепроницаемых гумусированных агрегатов [31], но в модельном эксперименте выраженность этого процесса была минимальной. В результате подобной трансформации свойства поверхностного слоя пахотного горизонта (несколько миллиметров) становятся отличными от свойств самого пахотного горизонта. Изменяются цвет поверхности, микростроение, минералогический и химический состав, содержание гумуса. Таким образом, поверхностный слой пахотных почв можно рассматривать как особый пограничный с атмосферой микропрофиль со слоями вымывания и вмывания (четко диагностируемыми микроморфологически), который существует достаточно непродолжительное время и уничтожается распашкой или боронованием, но постоянно восстанавливается после воздействия очередного дождя.

При разрушении этого микропрофиля в результате распашки, его вещество перемешивается со всем пахотным слоем, в результате чего могут постепенно изменяться свойства и самого пахотного горизонта и предопределяться тренды эволюции пахотных почв. Фрагменты подобных трансформированных поверхностных слоев часто находят в виде агрегатов внутри пахотного горизонта [37]. Так, например, теоретически, увеличение количества ливневых осадков в результате глобальных изменений климата [3] мо-

жет приводить к большей выраженности описанной выше трансформации поверхностного слоя почв, и, как следствие, к более быстрому изменению свойств самого пахотного горизонта почв. Для доказательства этой гипотезы необходимы дополнительные специальные исследования.

Формирование на поверхности почв корки с выраженным элювиально-иллювиальным перераспределением веществ и формированием особых по составу и структурной организации микрогоризонтов также оказывает существенное влияние и на энергетический баланс почв (увеличивая отражение солнечной энергии), и, соответственно, на возможности дистанционного [9, 29] и бесконтактного [36] детектирования свойств почв. Именно это может быть одной из причин того, что несмотря на достаточно продолжительные и многочисленные эксперименты, технологии надежного автоматизированного дистанционного и бесконтактного картографирования и мониторинга почв до сих пор так и не разработаны [8].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В умеренной климатической зоне воздействие дождей на открытую поверхность пахотных почв приводит к изменению свойств как поверхности, так и поверхностного слоя пахотного горизонта. Состояние органико-минерального вещества и гранулометрический состав исходной почвы определяют формирование корки, которая морфологически представляет собой микропрофиль с микрогоризонтами вымывания и вмывания (по типу [akl]). Больше всего изменений связано с микростроением, минералогическим составом ила, содержанием гумуса, а также с их соотношением и структурной организацией почв. Перераспределение гранулометрических фракций в каждом новообразованном микрогоризонте обусловлено процессами разрушения исходных микроагрегатов, элювиально-иллювиальным перераспределением тонких агрегатов и/или тонкопылевато-илистых фракций. Среди глинистых минералов в поверхностных элювиальных микрогоризонтах сильнее всего сокращается доля лабильных минералов. В результате свойства трансформированной поверхности пахотных почв отличаются от свойств самого пахотного горизонта почв. И чем дольше поверхность остается экспонированной под дождями, тем больше становится эта разница, тем более отчетливым будет формирование и дифференциация поверхностного микропрофиля с образованием элювиальных и иллювиальных микрогоризонтов.

Увеличение количества и интенсивности осадков может привести к существенному ухудшению свойств пахотных почв и к усилению их деградации.

Изменение вещественного и химического состава поверхностного слоя почв вызывает изме-

нение их спектральной отражательной способности, что необходимо учитывать при детектировании свойств почв по данным дистанционного и бесконтактного зондирования. Например, детектирование содержания гумуса в пахотном горизонте будет более надежным при съемке свежеспанной и проборонованной пашни. Минералогический состав почв, в свою очередь, будет надежнее детектироваться по изображениям трансформированной поверхности почв.

Полученные результаты исследований основаны на комплексном анализе образцов лишь трех типов почв. Для подтверждения полученных выводов необходимо проведение подобных работ и на других почвах.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта РФ в лице Минобрнауки (ИЮС, ЕЮП, анализ цвета поверхности и ее спектров, соглашение № 075-15-2020-909), в рамках Программы стратегического академического лидерства РУДН, а также Программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова (ДСВ, рентгенофлуоресцентный спектрометр Bruker Tornado M4 plus).

Ряд использованного оборудования – поляризационный микроскоп Olympus BX51 с цифровой камерой Olympus DP26 и программным обеспечением Stream Basic; микротомограф Bruker SkyScan 1172G с фирменным ПО – входят в Центр коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Тестовые участки для отбора образцов почв и полевых наблюдений: 1 – Домодедовский район Московской области; 2 – Ясногорский район Тульской области; 3 – Веневский район Тульской области; 4 – Шекинский район Тульской области; 5 – Плавский район Тульской области.

Рис. S2. Водопрочные гумусированные агрегаты на поверхности черноземных почв в поле.

Рис. S3. Трансформация поверхности почв (0–2 мм) под воздействием атмосферных условий в модельном эксперименте (дерново-подзолистая почва (а, г), серая лесная почва (б, д), чернозем выщелоченный (в, е); не-трансформированная поверхность – а, б, в; трансформированная – г, д, е).

Рис. S4. Модели микромоделитов поверхностного четырехсантиметрового слоя почв (а – чернозем выще-

лоченный, б – серая лесная почва, в – дерново-подзолистая почва).

Таблица S1. Химические свойства, содержание макро- и микроэлементов в пахотном горизонте серых лесных пахотных почв (24 образца).

Таблица S2. Химические свойства, содержание макро- и микроэлементов в пахотном горизонте черноземов оподзоленных (14 образцов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виндекер Г.В., Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю. Трансформация открытой поверхности почв под воздействием атмосферных осадков в модельном эксперименте // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 95. С. 23–40. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-95-23-40>
2. Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Яковлев А.С., Булгаков Д.С., Макаров О.А. Отечественные подходы к оценке степени деградации почв и земель // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1394. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15110118>
3. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. А.И. Бедрицкого. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2018. 282 с.
4. Орлов Д.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 175 с.
5. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
6. Прудникова Е.Ю., Варламов Е.Б., Чурилин Н.А., Чурилина А.Е. Дифференциация и баланс минералов при трансформации открытой поверхности пахотных почв под воздействием атмосферных осадков // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 105–131. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-105-131>
7. Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю. Исследование оптических свойств открытой поверхности почв // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 10. С. 79–86. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000642>
8. Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050101>
9. Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю. Об оптимальном сроке спутниковой съемки для картографирования пахотных почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2014. № 74. С. 66–77. <https://yadi.sk/i/F9Vfe-zOfhjqs>
10. Чижикова Н.П., Лебедева (Верба) М.П., Лебедев М.А. Минералогический состав и микростроение почв аккумулятивно-денудационного ландшафта северной части лесостепи и сносимого при эрозии материала // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2010. № 65. С. 36–47. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-36-47>
11. Ben-Dor E., Goldshleger N., Benyamini Y., Agassi M.R., Blumberg D.G. The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2-to 2.5- $\mu\text{m}$  spectral region // Soil Sci. Soc. Am. J. 2003. V. 67. № 1. P. 289–299. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.2890>
12. Cierniewski J., Verbrugge M., Marlewski A. Effects of farming works on soil surface bidirectional reflectance measurements and modelling // Int. J. Remote Sens. 2002. № 23. P. 1075–1094. <https://doi.org/10.1080/01431160110071897>
13. Demattê J.A.M., Nanni M.R., Da Silva A.P., de Melo Filho J.F., Dos Santos W.C., Campos R.C. Soil density evaluated by spectral reflectance as an evidence of compaction effects // Int. J. Remote Sens. 2010. V. 31. № 2. P. 403–422.
14. Denis A., Stevens A., van Wesemael B., Udelhoven T., Tytchon B. Soil organic carbon assessment by field and airborne spectrometry in bare croplands: accounting for soil surface roughness // Geoderma. 2014. V. 226–227. P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.015>
15. Eshel G., Levy G.J., Singer M.J. Spectral reflectance properties of crusted soils under solar illumination // Soil Sci. Soc. Am. J. 2004. V. 68. № 6. P. 1982–1991. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1982>
16. Gerasimova M., Lebedeva M. Organo-mineral Surface Horizons / Chapter 18. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition). Elsevier. 2018. P. 513–538. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00019-X>
17. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World Soil Resour. Rep. 2015.
18. Karnieli A., Sarafis V. Reflectance spectrophotometry of cyanobacteria within soil crusts—A diagnostic tool // Int. J. Remote Sens. 1996. V. 17. P. 1609–1615. <https://doi.org/10.1080/01431169608948726>
19. Lebedeva M.P., Golovanov D.L., Abrosimov K.N. Micromorphological diagnostics of pedogenetic, eolian, and colluvial processes from data on the fabrics of crusty horizons in differently aged extremely arid soils of Mongolia // Quaternary Int. 2016. V. 418. P. 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.042>
20. Le Bissonnais Y., Bruand A., Jamagne M. Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure // Catena. 1989. V. 16. № 4–5. P. 377–392. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(89\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0341-8162(89)90022-2)
21. Malam Issa O., Valentin C., Rajot J.L., Cerdan O., Desprats J.F., Bouchet T. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils // Geoderma. 2011. V. 167. P. 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.013>
22. Mermut A.R., Luk S.H., Römkens M.J.M., Poesen J.W.A. Micromorphological and mineralogical components of surface sealing in loess soils from different geographic regions // Geoderma. 1995. V. 66. P. 71–84. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00053-D](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00053-D)
23. Morphometric parameters measured by Skyscan™ CT analyser software. Bruker, 2012.
24. Minasny B., McBratney A.B., Bellon-Maurel V., Roger J.M., Gobrecht A., Ferrand L., Joalland S. Removing the effect of soil moisture from NIR diffuse reflectance spectra for the prediction of soil organic carbon // Geoderma. 2011. V. 167–168. P. 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.008>

25. Niu J., Yang K., Tang Z., Wang Y. Relationships between Soil Crust Development and Soil Properties in the Desert Region of North China // *Sustainability*. 2017. V. 9. P. 725. <https://doi.org/10.3390/su9050725>
26. Pagliai M., La Marca M., Lucamante G. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage // *J. Soil Sci.* 1983. V. 34. P. 391–403. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01044.x>
27. Pagliai M., Bisdom E.B.A., Ledin S. Changes in surface structure (crusting) after application of sewage sludges and pig slurry to cultivated agricultural soils in northern Italy // *Geoderma*. 1983. V. 30. P. 35–53. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(83\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(83)90055-1)
28. Pagliai M., Vignozzi N., Pellegrini S. Soil Structure and the effect of management practices // *Soil and Till. Res.* 2004. V. 79. P. 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>
29. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu. The effect of open soil surface patterns on soil detectability based on optical remote sensing data // *Proceedings of the 2nd International Electronic Conference on Remote Sensing. Sciforum Electronic Conference Series*. 2018. V. 2. P. 1–8. <https://sciforum.net/manuscripts/5170/manuscript.pdf>
30. Román J.R., Rodríguez-Caballero E., Rodríguez-Lozano B., Roncero-Ramos B., Chamizo S., Águila-Carricondo P., Cantón Y. Spectral response analysis: An indirect and non-destructive methodology for the chlorophyll quantification of biocrusts // *Remote Sens.* 2019. V. 11. P. 1350. <https://doi.org/10.3390/rs11111350>
31. Savin I. Formation of reflectance properties of the surface of tilled chernozem soil // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 1993. V. 2107. P. 304–313. <https://doi.org/10.1117/12.162165>
32. SkyScan CT-Analyzer (“CTan”). User manual. 2020.
33. SkyScan nRecon. User manual. 2016.
34. Stevens A., Ramirez-Lopez L., Stevens M.A. Rcpp L. Package ‘Prospectr’. Technical Report. 2015. Available online: <ftp://rm.mirror.garr.it/mirrors/CRAN/web/packages/prospectr/prospectr.pdf>
35. Stoops G. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Soil Science Society of America. 2003. 184 p.
36. Viscarra Rossel R.A., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C. Chapter Five – Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time // *Advances in Agronomy*. Academic Press. 2011. V. 113. P. 243–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00005-1>
37. Williams A.J., Pagliai M., Stoops G. Physical and Biological Surface Crusts and Seals // *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Chapter 19. Elsevier, 2018. P. 539–574. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00019-X>

## **Transformation of Surface Layer of Ploughed Soil Horizon under the Impact of Atmospheric Precipitation**

**E. Yu. Prudnikova<sup>1,2,\*</sup>, I. Yu. Savin<sup>1,2</sup>, M. P. Lebedeva<sup>1</sup>, D. S. Volkov<sup>1,3</sup>,  
O. B. Rogova<sup>1</sup>, E. B. Varlamov<sup>1</sup>, and K. N. Abrosimov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Ecological Faculty RUDN, Moscow, 117198 Russia*

<sup>3</sup>*Chemical Faculty, Lomonosov Moscow State University Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: prudnikova\_eyu@esoil.ru*

The aim of the research was to analyze the features of the transformation of the surface layer of the arable horizons of chernozem, gray forest and sod-podzolic soils under the influence of atmospheric conditions (precipitation, wind, solar energy). The studies were carried out using soil samples taken at key sites, as well as the results of a model experiment. The state of the soil surface, its color, micromorphological and microtomographic structure, and the chemical composition of the surface layer of the arable soil horizon were analyzed. It has been established that the effect of atmospheric precipitation on the open surface of arable soils leads to a change in the properties of the surface layer of the arable horizon. Changes in the mineralogical composition are expressed in the redistribution of minerals between particle size fractions. The longer the soil surface remains open under the influence of alternating precipitation and drying, the more pronounced is the formation of surface washout microlayers (eluvial) and washin microlayers (illuvial), differing in the content of finely dispersed organo-mineral substances and their structural organization. The initial state of humus and the granulometric composition of the soil predetermine the specificity of the forming surface microhorizons. In this case, a layer of dusty or sandy material with a minimum amount of microaggregates and finely dispersed matter forms in the upper part, and below the size and number of aggregates clearly increase. The revealed regularities must be taken into account when detecting the properties of soils according to the data of remote and non-contact sensing. To detect the humus content in the arable horizon, it is necessary to survey the freshly plowed and burrowed surface of arable soils. The mineralogical composition, in turn, will be better detected from the images of the transformed surface of arable soils.

**Keywords:** arable soils, soil spectral reflectance, soil degradation, contactless methods of soil studies, soil crust, Albic Retisols, Luvisols, Luvic Chernic Phaeozems, Luvic Greyzemic Phaeozems