

УДК 631.4

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВЫХ ПОР В АГРЕГАТАХ ИЗ ЭЛЮВИАЛЬНОГО ГОРИЗОНТА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2020 г. Е. Б. Скворцова^{а, *}, Е. В. Шейн^{а, б}, К. А. Романенко^а, К. Н. Абросимов^а^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия^бМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: eskvora@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.

После доработки 12.12.2019 г.

Принята к публикации 27.12.2019 г.

В лабораторных условиях с помощью микротомографического анализа исследовано участие капиллярного увлажнения и 5–20-кратного замораживания–оттаивания в зарождении и развитии внутриагрегатных пузырьковых микро- и мезопор в обособленном агрегате $d = 3$ мм из горизонта E1 лесной дерново-подзолистой почвы. Показано, что основные томографически видимые изменения порового пространства приурочены к стадиям капиллярного увлажнения и первым четырем циклам замораживания–оттаивания. Капиллярное увлажнение воздушно-сухого агрегата обуславливает зарождение пузырьковых микропор в почвенной массе. Первичное замораживание увлажненного агрегата фиксирует новообразованные пузырьки и добавляет признаки внутриагрегатной микрошлировости. Первичное оттаивание замороженного агрегата запускает процессы обособления и постепенного укрупнения пузырьковых пор. В последующих трех циклах опыта замораживание фиксирует сложившуюся картину пузырьковой пористости, а оттаивание способствует слиянию мелких пузырьков в более крупные. На пятом и последующих циклах многие из пузырьковых пор выходят за пределы расплывшегося агрегата и при 10–20-кратном замораживании в мерзлом агрегате преобладают горизонтально ориентированные морозные микрошлиры.

Ключевые слова: физика почв, морфология почв, микроморфология почв, поровое пространство почвы, капиллярное увлажнение, замораживание–оттаивание, Albic Glossic Retisol (Lomic, Cutanic)

DOI: 10.31857/S0032180X2007014X

ВВЕДЕНИЕ

Среди генетического разнообразия почвенных пор особое место занимают пузырьковые или везикулярные полости. В отличие от пор упаковки, каналов и камер пузырьковые поры не имеют прямой связи с расположением твердых структурных отделностей и не обусловлены распространением в почве корней и почвенной фауны. В то же время агрегированность почвенной массы и ее биологическая активность прямо или косвенно влияют на появление пузырьковых пор наравне с такими важными факторами как химический состав и гидротермический режим почвы. Отсутствие очевидных причинно-следственных связей приводит к тому, что вопросы генезиса и локализации пузырьков в почвенном профиле до настоящего времени не получили исчерпывающих ответов.

Большинство исследований, посвященных пузырьковым порам, рассматривает их в контексте поверхностных везикулярных горизонтов, распространенных в засушливых и полувесушливых территориях на разных континентах Земли [21, 26]. При этом генезис пузырьков часто не отделяют от

генезиса самих поверхностных горизонтов или корок [9, 12, 13].

В пустынных регионах одним из агентов формирования пузырьков считается периодическое увлажнение–иссушение материала везикулярных горизонтов [14, 15, 22, 24] и свежего эолового материала [21]. Формирование отдельных везикулярных пор в корковом горизонте пустынных почв потенциально может быть связано с выщелачиванием округлых солевых новообразований (поры выщелачивания солей и их стяжений) [2].

Если отойти от привязки к везикулярным горизонтам, то ареалы встречаемости почвенных пузырьковых пор существенно расширяются. Было показано, что пузырьки являются важным механизмом выноса биогенного CH_4 из торфа в атмосферу [10]. Пузырьковые поры составляют основу строения природной вулканической пемзы [3]. С помощью рентгеновской компьютерной микротомографии выявлены обильные пузырьковые поры в элювиальной толще дерново-подзолистых почв (рис. 1, [5]). Измерения в двумерных томографических срезах показали, что в этой

толще численность пузырьков может достигать 17% от общего количества пор, видимых на томограммах при разрешении 8.6 мкм [7].

Проблема формирования пузырьков пор в подзолистом горизонте имеет различные физические и генетические аспекты. Почему пузырьковые поры локализованы в элювиальном и слабо представлены в гумусово-аккумулятивном, а также практически отсутствуют в текстурном горизонте дерново-подзолистых почв [7]. Какие факторы и процессы обуславливают появление везикулярной пористости в экранированном от поверхности гор. EL?

Элювиальные горизонты залегают на малой глубине, доступной текущим педотурбационным нарушениям, интенсивному воздействию корней и почвенной фауны. Поэтому реликтовое происхождение пузырьков представляется маловероятным. Современные процессы растворения округлых орштейнов также маловероятны, поскольку формирование везикулярных пор считается весьма динамичным почвенным явлением [26]. Так, в полевых условиях в нарушенных пустынных почвах наблюдали восстановление везикул всего за 4 месяца [28].

Для дерново-подзолистых почв характерно весенне-осеннее (часто и зимнее) цикличное чередование мерзлых и талых периодов, а также резкие перепады влажности в летнее время. Логично предположить, что появление везикулярной пористости связано с современными процессами увлажнения, промерзания и оттаивания почвенной массы. Согласно имеющимся данным, при увлажнении высушенных и оттаивании замерзших почв происходит резкое, хотя и кратковременное, усиление биогенного и физико-химического выделения газов [4, 11, 16, 18–20, 25, 27]. И если в гумусовом горизонте эти газы легко рассеиваются в рыхлой комковатой почве, то в уплотненном пылеватом горизонте EL следы их выделения могут сохраниться в виде везикулярных пор.

Возможную связь генезиса пузырьков пор с перечисленными процессами можно проследить в контролируемых лабораторных экспериментах, которые позволяют стандартизировать температурные изменения, а также уменьшают вероятность влияния внешних факторов на результаты исследования [17]. Ранее в лабораторном эксперименте было показано, что после пятикратного замораживания–оттаивания в увлажненных агрегатах из элювиальной толщи дерново-подзолистой почвы сформировалась внутриагрегатная пористость везикулярного типа [8]. Сходные результаты были получены другими авторами. Так, при лабораторном изучении циклического замораживания–оттаивания глинистых образцов было выявлено не только формирование структуры пластинчатого типа, но также образование большого числа пор нерегулярной и округлой формы [23].

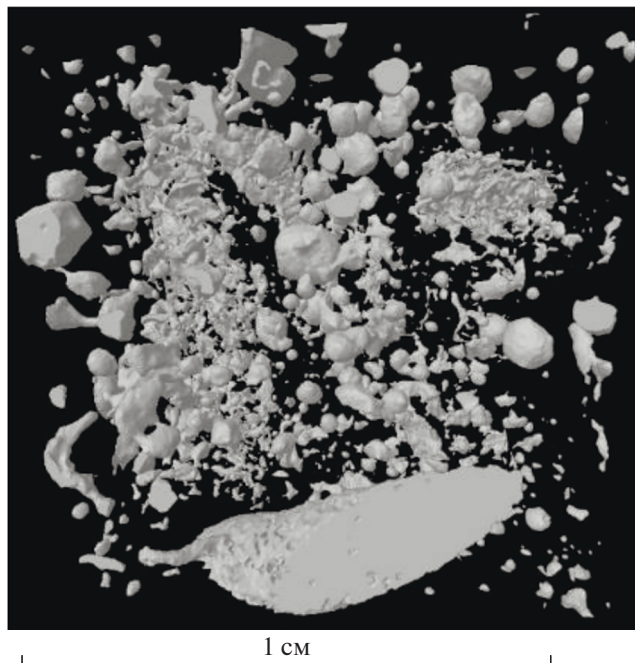


Рис. 1. Трехмерная компьютерная модель порового пространства в микромонолите из гор. EL дерново-подзолистой почвы. Сканирование на микротомографе Bruker Sky Scan 1172 с энергией пучка 100 кэВ и разрешением 15.8 мкм [5]. Поры светлые.

Остается неясным дифференцированный вклад процессов увлажнения, промерзания и оттаивания почвенной массы в итоговое формирование пузырьков пор. Разделить эти процессы можно путем томографического сканирования одного и того же почвенного образца на каждом из этапов его экспериментального увлажнения, замораживания и оттаивания. При этом актуально исследование образцов малого размера, что позволяет провести наблюдения на микроскопическом уровне. Именно на этом уровне можно обнаружить начальные изменения в строении почвы, связанные с образованием и дальнейшей трансформацией газовых пузырьков. В предлагаемой статье исследовано участие капиллярного увлажнения и циклического замораживания–оттаивания в зарождении и развитии внутриагрегатных пузырьков микро- и мезопор в агрегатах из элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы. Исследования проводили с использованием метода рентгеновской микротомографии, особенно информативного при изучении порового пространства почвы [1].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования послужили агрегаты $d = 3$ мм из горизонта EL лесной дерново-подзолистой почвы на покровных суглинках (по классификации WRB 2014 г. (версия 2015 г.) Albic Glossic Retisol (Lomic, Cutanic)). Разрез был за-

Таблица 1. Гранулометрический состав дерново-подзолистой почвы по методу Качинского [8]

№ образца	Горизонт	Глубина образца, см	Гигроскопическая влажность, %	Содержание фракций, % (размер частиц, мм)						Сумма частиц	
				1.0–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	>0.01	<0.01
1	AY	0–4	1.56*	0.7	15.2	57.3	10.3	9.5	7.0	73.2	26.8
2	AEL	6–12	0.94	0.6	8.6	59.7	10.7	10.7	9.6	69.0	31.0
3	EL	17–23	0.49	0.3	8.6	65.1	10.7	9.6	5.7	74.0	26.0
4	BEL	30–40	1.48	1.0	6.2	47.7	10.2	10.6	24.4	54.8	45.2
5	BT1	50–60	2.25	0.9	5.5	40.8	9.4	10.8	32.6	47.2	52.8
6	BT2	70–80	2.81	0.9	6.8	32.7	10.5	12.7	35.4	41.4	58.6
7	C	150–155	2.71	6.0	16.4	24.2	9.7	14.6	29.0	46.7	53.3

* Встречаются растительные остатки.

Таблица 2. Химические свойства дерново-подзолистой почвы [8]

№ п/п	Горизонт	Глубина образца, см	Гумус, %	pH		Ca _{обм}	Mg _{обм}	Fe ₂ O ₃ , %	
				H ₂ O	KCl			смоль(экв)/кг	по Тамму
1	AY	0–4	5.72	4.73	3.91	7.93	0.43	0.67	1.07
2	AEL	6–12	1.11	4.63	3.81	0.98	0.07	0.68	1.04
3	EL	17–23	0.42	4.52	3.85	1.00	0.03	0.30	0.62
4	BEL	30–40	0.31	5.04	3.56	8.54	1.60	0.47	1.45
5	BT1	50–60	0.16	5.2	3.41	16.3	4.16	0.39	1.99
6	BT2	70–80	0.84	5.43	3.48	21.3	6.29	0.37	1.83
7	C	150–155	1.58	5.8	3.71	17.2	6.12	0.33	1.69

ложен под 90-летним еловым лесом с примесью березы в районе д. Дарьино Московской области РФ. Координаты разреза N 56°5'54.00"; E 37°49'27.00". Аналитические свойства исследованной почвы опубликованы ранее ([8], табл. 1 и 2).

Агрегаты выбранного размера обладают однородным строением, в минимальной степени осложненным наличием Fe–Mn-конкреций и биогенных пор, присущих элювиальному горизонту лесных почв. Однородное строение агрегата способствует выявлению роли изучаемых процессов в образовании пузырьков.

Лабораторный эксперимент проводили в ФГБНУ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”. Основным методом исследования являлся томографический анализ на рентгеновском микротомографе Bruker Sky Scan 1172, оснащенный терморегулирующим модульным столиком Sky Scan microcooling stage (Бельгия). Столик содержит охлаждающий элемент Пельтье и предназначен для охлаждения образца до температуры –15°C и поддержания в образце отрицательной температуры на всем протяжении томографического сканирования. Опыт заключался в последовательном томографическом сканировании одного и того же агрегата при различной влажности и температуре: а) в исходном воздушно-сухом состоянии; б) после капиллярного насыщения во-

дой; в) после замораживания при капиллярной влажности; г) после оттаивания при комнатной температуре. Для проведения опыта была разработана специальная методика, частично описанная ранее [8]. Согласно разработанной методике, воздушно-сухой агрегат помещали в пластиковый цилиндр с металлическим дном с резьбой для установки цилиндра на терморегулирующий модульный столик SkyScan microcooling stage. Предварительно на дно цилиндра укладывали кружок фильтровальной бумаги. Конструкцию с фильтровальной бумагой и агрегатом помещали в терморегулирующий столик, который, в свою очередь, устанавливали в камере томографа Bruker Sky Scan 1172 и производили первичное томографическое сканирование сухого агрегата.

Затем агрегат, не вынимая из столика и камеры томографа, капиллярно увлажняли через лежащую на дне фильтровальную бумагу с помощью шприца до полного потемнения всей поверхности агрегата. Цилиндр с увлажненным агрегатом закрывали резиновой крышкой для предотвращения высыхания почвы. Поверх цилиндра с образцом навинчивали пластиковый колпак с поролоновой шубой для поддержания стабильной температуры образца и повышения продуктивности охлаждающего элемента. Затем увлажненный образец подвергали повторному томографическому сканиро-

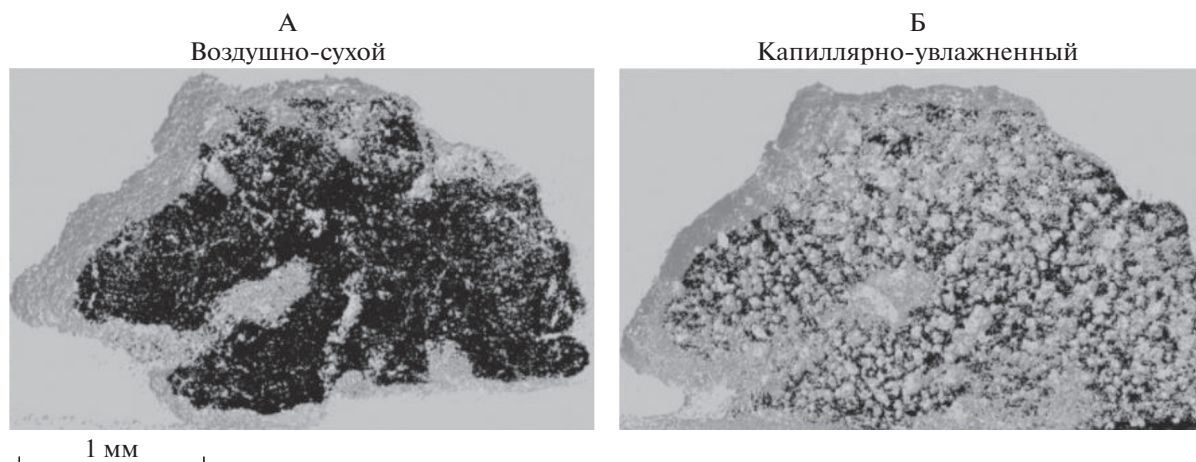


Рис. 2. Трехмерные томографические реконструкции внутреннего строения воздушно-сухого (А) и капиллярно-увлажненного (Б) агрегата. Почвенная масса черная, поры и лед светлые.

ванию. Далее проводили циклическое замораживание и оттаивание агрегата по следующей схеме: температуру в столике понижали до -10°C и замораживали увлажненный агрегат в течение 1 ч. Затем проводили микротомографическое сканирование мерзлого агрегата при отрицательной температуре. Затем выключали охлаждение, открывали камеру томографа и позволяли агрегату оттаивать по мере увеличения температуры в столике до $+20^{\circ}\text{C}$. В течение 1 ч выдерживали агрегат при комнатной температуре, после чего сканировали агрегат в его талом состоянии. Сканирование мерзлого и талого агрегата проводили в пятикратном цикле замораживания–оттаивания. Для изучения большего количества циклов продолжали циклическое замораживание и оттаивание агрегата, но томографическое сканирование проводили только в замороженном состоянии на 10- и 20-м циклах. На всех этапах работы положение агрегата в пространстве не изменялось. Источником холода являлось дно цилиндра, промерзание агрегатов шло в вертикальном направлении снизу вверх.

Разрешение томографического сканирования составляло 2.75 мкм на пиксель, что допускает анализ почвенной массы на мезо- и микроуровнях. Компьютерную реконструкцию изображений по данным сканирования проводили с использованием программного обеспечения Sky Scan. Количественный анализ изображений проводили в трехмерных компьютерных реконструкциях и в двумерных вертикальных срезах через их центральную часть с использованием программ Sky Scan и Image-Pro.

В трехмерных реконструкциях согласно принятому разрешению измеряли поры $d > 10$ мкм. При сегментации изображений в силу близости рентгеновской плотности не проводили разделение фаз воздух–вода–лед, объединяя в одну совокупность все детали изображения, не относящиеся

к твердой фазе почвы. Измерения проводили в пределах виртуальных цилиндров (анализируемых объемов), вписанных в трехмерные реконструкции агрегатов. Для всех агрегатов величина анализируемого объема составляла 10.92 мм^3 . В этих пределах определяли суммарный объем томографически видимых пор (% от анализируемого объема), а также величины открытой и закрытой пористости. Согласно программам Sky Scan, закрытую пористость определяли как суммарный объем пор, полностью расположенных внутри анализируемого цилиндра, открытую – как суммарный объем пор, пересекающих его границы.

При изучении двумерных срезов особое внимание уделяли форме пор. С этой целью в квадратных полях зрения, площадь которых составляла 2.2×2.2 мм, для каждой поры определяли площадь (S), периметр (P), поперечный (D) и продольный (L) габариты пор. Затем по предложенной ранее формуле $F = (4\pi S/P^2 + D/L)/2$ рассчитывали фактор формы F , который позволяет выделять 5 классов формы пор в двумерных срезах: трещиновидные ($F \leq 0.2$), вытянутые изрезанные ($0.2 < F \leq 0.4$), изометричные изрезанные ($0.4 < F \leq 0.6$), изометричные слабоизрезанные ($0.6 < F \leq 0.8$) и округлые ($0.8 < F \leq 1$) [6]. Фактор формы определяли для пор $d > 30$ мкм, отличающиеся большим разнообразием формы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Визуальный анализ трехмерных томографических реконструкций показал, что в ходе капиллярного увлажнения и при последующем циклическом замораживании–оттаивании строение агрегата $d = 3$ мм из элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы существенно изменяется (рис. 2, 3).

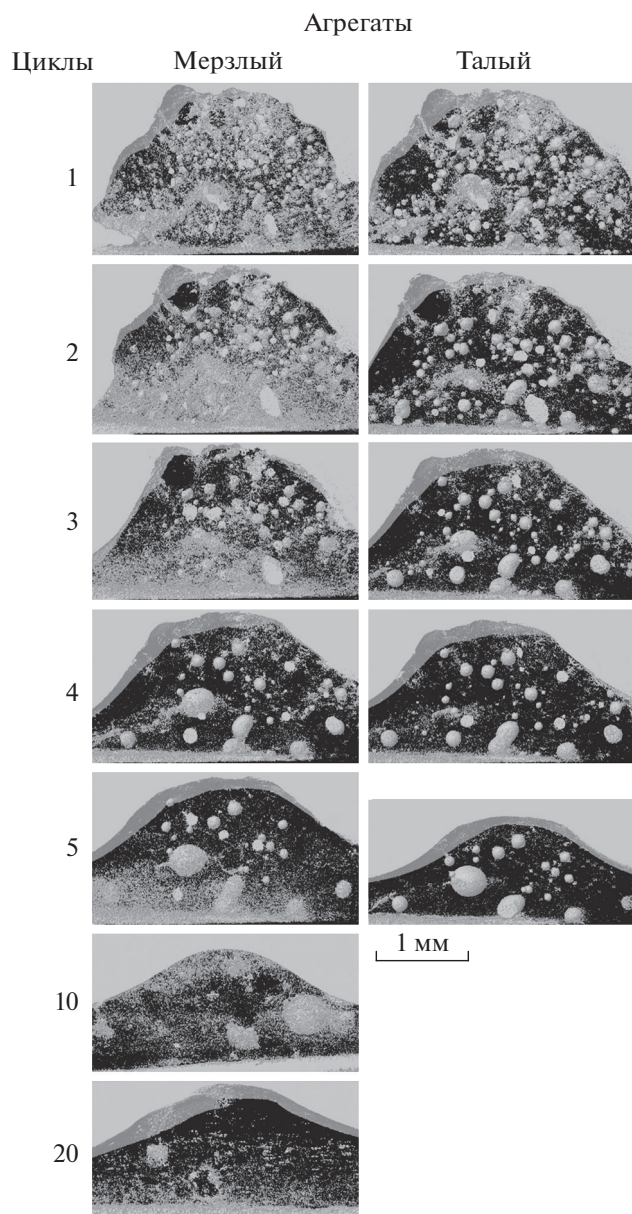


Рис. 3. Трехмерные томографические реконструкции внутреннего строения агрегата при циклическом замораживании—оттаивании. Почвенная масса черная, поры и лед светлые.

Исходный воздушно-сухой агрегат имеет массивное сложение с малым количеством разрозненных тонких пор разной степени изрезанности. Уже на первой стадии опыта в результате капиллярного увлажнения в толще агрегата формируется множество мелких пузырьковых пор, равномерно распределенных в почвенной массе (рис. 2, Б). Общий объем томографически видимых пор $d > 10$ мкм при этом возрастает более, чем в 2 раза (рис. 4).

В дальнейшем на протяжении пяти циклов замораживания—оттаивания в мерзлом агрегате сохраняется высокая томографическая пористость,

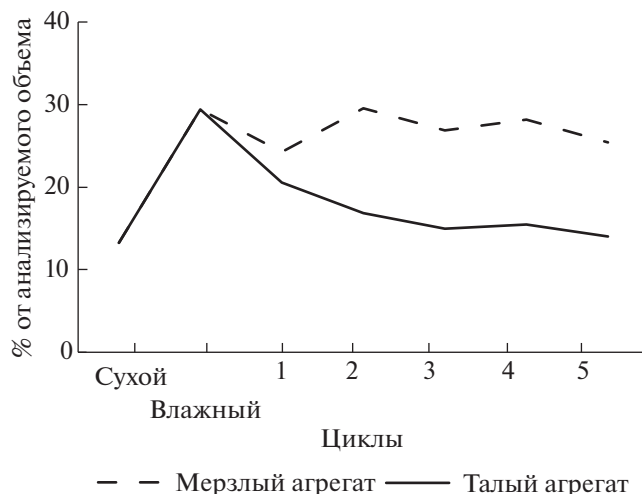


Рис. 4. Общий объем томографически видимых пор $d > 10$ мкм в мерзлом и талом агрегате на первых пяти циклах опыта.

не превышающая пористость капиллярно-увлажненного агрегата. В талом агрегате общая томографическая пористость постепенно снижается, на первых трех циклах достаточно резко, затем более плавно.

Поддержание в мерзлых агрегатах высоких значений общей томографической пористости связано с появлением в почвенной массе множества тонких ледяных включений (микрошлир), которые по условиям сегментации были отнесены к поровому пространству. После пяти циклов замораживания—оттаивания высокая томографическая пористость мерзлых агрегатов сохраняется. Так, после 10 замораживаний общий объем томографически видимых пор $d > 10$ мкм составил 41%, после 20 замораживаний — 31% от анализируемого объема.

Информативным томографическим показателем является объем закрытых пор, не выходящих за пределы анализируемого объема почвы. Чем больше величина закрытой пористости, тем меньше общая связность порового пространства, тем больше содержание в поровом пространстве изолированных, в том числе пузырьковых пор. В проведенном опыте изменение величины относительной закрытой пористости (% от общей томографической пористости) отражает наличие изолированных пор в мерзлом и талом агрегате (рис. 5).

В массивном воздушно-сухом агрегате более 30% общей томографической пористости приходится на закрытые поры. В увлажненном агрегате множество новообразованных мелких пузырьковых связаны в грозди и агломераты (рис. 2, Б), что существенно уменьшает как абсолютный, так и относительный объем закрытых пор (0.9 и 3.0% соответственно). В дальнейшем в мерзлом агрегате

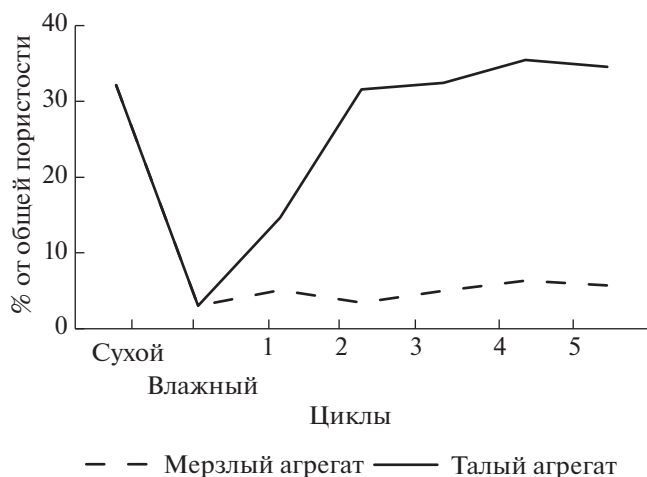


Рис. 5. Относительный объем закрытых томографически видимых пор $d > 10$ мкм в мерзлом и талом агрегате на первых пяти циклах опыта.

относительная закрытая пористость остается на низком уровне, достигая на 10- и 20-м циклах замораживания значений 1–5%. В то же время в талом агрегате относительная закрытая пористость возрастает (рис. 5). Наиболее резкое увеличение доли закрытых пор в талой почве приходится на первый и второй циклы замораживания–оттаивания. В ходе этих циклов зародившиеся при увлажнении гроздь пузырьковых пор превращаются в обособленные везикулы, что увеличивает относительный объем закрытых пор на фоне уменьшения общей томографической пористости. В ходе третьего и четвертого циклов опыта относительная закрытая пористость сохраняет высокие значения, на пятом цикле наблюдается слабая тенденция к ее уменьшению.

Морфометрический анализ формы пор в двумерных томографических срезах позволил количественно охарактеризовать долю округлых пузырьков в поровом пространстве агрегата на разных этапах опыта. Анализировали поры $d > 30$ мкм, отличающиеся большим разнообразием формы. Получено, что на первых четырех циклах замораживания–оттаивания и в мерзлом, и в талом агрегатах происходит постепенное увеличение процентного содержания округлых пор (рис. 6). При этом в талом агрегате содержание округлых пор на всех четырех циклах больше, чем в мерзлом, поскольку в талом агрегате отсутствуют характерные для мерзлой почвы сильноизрезанные поры, занятые ледяными микрошпирами. На пятом цикле содержание пузырьков уменьшается как в мерзлом, так и в талом состоянии агрегата. В мерзлом агрегате это связано с резким увеличением содержания микрошпир (до 42% от общего количества измеренных пор). В талом агрегате отмечено абсолютное уменьшение численности пузырьковых пор в результате слияния мелких пузырьков в более крупные разрозненные полости.

При дальнейшем замораживании–оттаивании образца содержание пузырьковых пор продолжает уменьшаться. Так, на 20-м цикле в мерзлом агрегате на долю пузырьков приходится менее 7% от общего количества измеренных пор. Более 70% составляют поры сильно изрезанной формы.

Важно отметить, что в ходе циклического замораживания–оттаивания агрегата происходит существенное изменение размеров пузырьковых пор. Так, после первой заморозки в талом агрегате округлые поры с фактором формы $0.8 < F \leq 1$ встречаются во всех размерных группах (рис. 7, А). После четырех циклов замораживания–оттаивания фактор формы $F > 0.8$ наблюдается только для

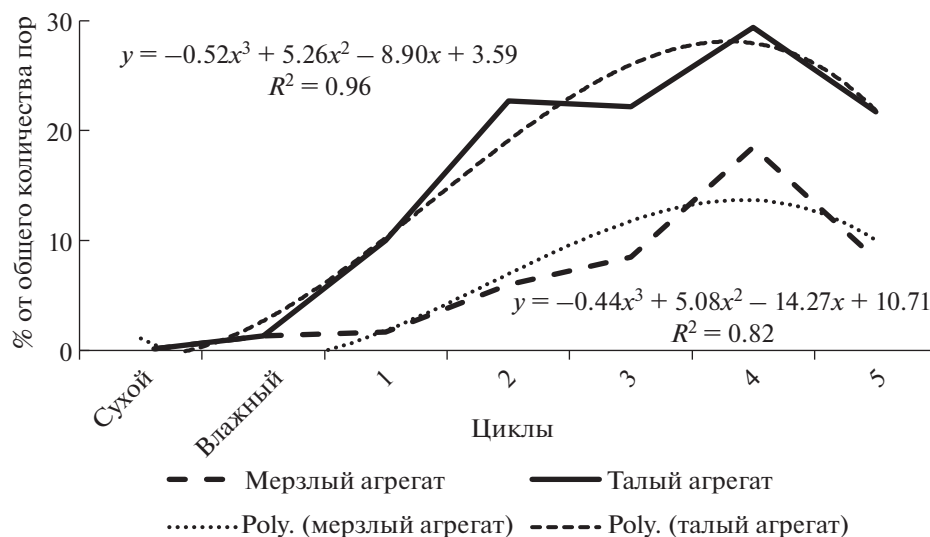


Рис. 6. Содержание пор с округлыми срезами ($0.8 < F \leq 1$) в мерзлом и талом агрегате на первых пяти циклах опыта.

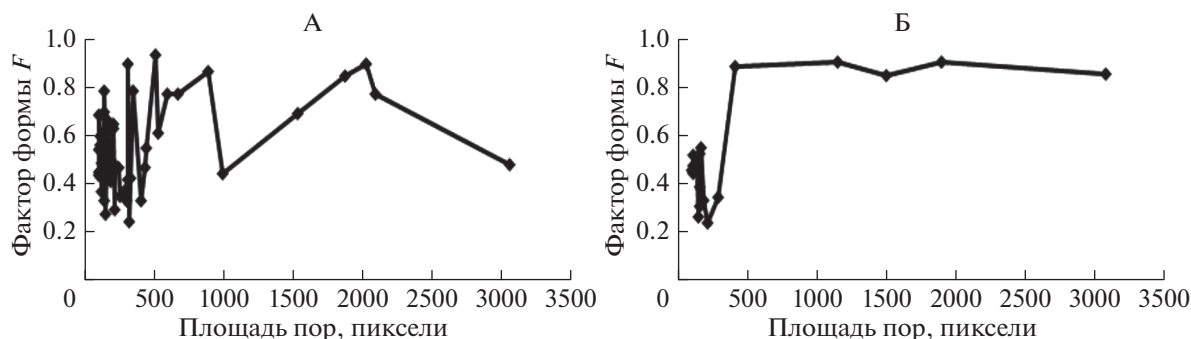


Рис. 7. Величина фактора формы F для пор разного размера в талом агрегате. А – после первого замораживания–оттаивания, Б – после четвертого замораживания–оттаивания.

крупномерных пор площадью более 500 пикселей. При принятом в работе разрешении площадь в 500 пикселей соответствует округлым срезам с диаметром около 75 мкм. Таким образом, после четырех циклов замораживания–оттаивания все тонкие макропоры с $d > 75$ мкм в талых агрегатах имеют округлую форму.

Проведенный лабораторный эксперимент показал морфологические изменения внутриагрегатного порового пространства исходно воздушно-сухого агрегата $d = 3$ мм при его капиллярном увлажнении и последующем многократном замораживании–оттаивании. Каждый из перечисленных факторов оказал существенное влияние на количество, размеры и форму внутриагрегатных почвенных пор. Общую картину изменений можно представить следующим образом.

Исходный воздушно-сухой агрегат имеет уплотненное сложение и обладает низкой томографической пористостью при использованном разрешении в 2.75 мкм на пиксель. Помимо томографически видимых пор в агрегате присутствует множество более тонких микро- и субмикропор, которые недоступны томографическому сканированию, но наравне с видимыми порами заполнены защемленными и адсорбированными газами.

В ходе капиллярного увлажнения поровое пространство агрегата частично заполняется капиллярной водой и частично бывшим адсорбированным, защемленным и растворенным в воде воздухом, во влажной среде представленным в виде многочисленных микропузырьков. Поскольку капиллярная подпитка агрегата водой происходила снизу вверх, часть вытесненного водой воздуха могла выйти за пределы агрегата по сквозным микротрещинам. Тем не менее, в результате капиллярного увлажнения томографическая пористость агрегата увеличилась более, чем в 2 раза. При этом совокупный объем томографически видимых пор $d > 10$ мкм достиг 30% от анализируемого объема агрегата. Большая часть этой пори-

стости представлена новообразованными пузырьками, со всех сторон изолированными водой в окружающих капиллярах.

Несмотря на видимое обилие пузырьковых пор, величина закрытой томографической пористости в капиллярно увлажненном агрегате очень невелика. Это обусловлено тем, что методика проведенного исследования не позволила томографически разделить воздух и воду. Поэтому при томографической реконструкции новообразованные мелкие пузырьки и заполненные водой микрокапилляры оказались связаны в разветвленные агломераты. Такие “грозди” пузырьков, в отличие от обособленных везикулярных пор, не попадали в категорию закрытой пористости. В дальнейшем при анализе циклов замораживания–оттаивания диагностическая роль закрытой томографической пористости окажется более выраженной.

Таким образом, в результате капиллярного увлажнения происходит зарождение пузырьковых микропор в агрегате. Первичное замораживание добавляет к общей картине порового пространства признаки морозной микрошлировости в дезагрегированной почвенной массе. Первичное оттаивание агрегата запускает процессы обособления и постепенного укрупнения пузырьковых пор. Уже на первом цикле опыта в талом агрегате при заданном разрешении исчезает основная масса тонких капиллярных связей между пузырьками. Благодаря этому почти в пять раз увеличиваются количество обособленных пузырьков и совокупный томографический объем закрытых пор. В последующих четырех циклах опыта замораживание фиксирует сложившуюся картину пузырьковой пористости (с некоторыми искажениями, обусловленными появлением морозной шлировости), а оттаивание способствует слиянию пузырьков в более крупные редкие везикулы.

На рис. 8 показана динамика содержания пузырьковых пор в первых пяти циклах опыта. Благодаря появлению трещиновидных микрошлир во всех замороженных состояниях агрегата про-

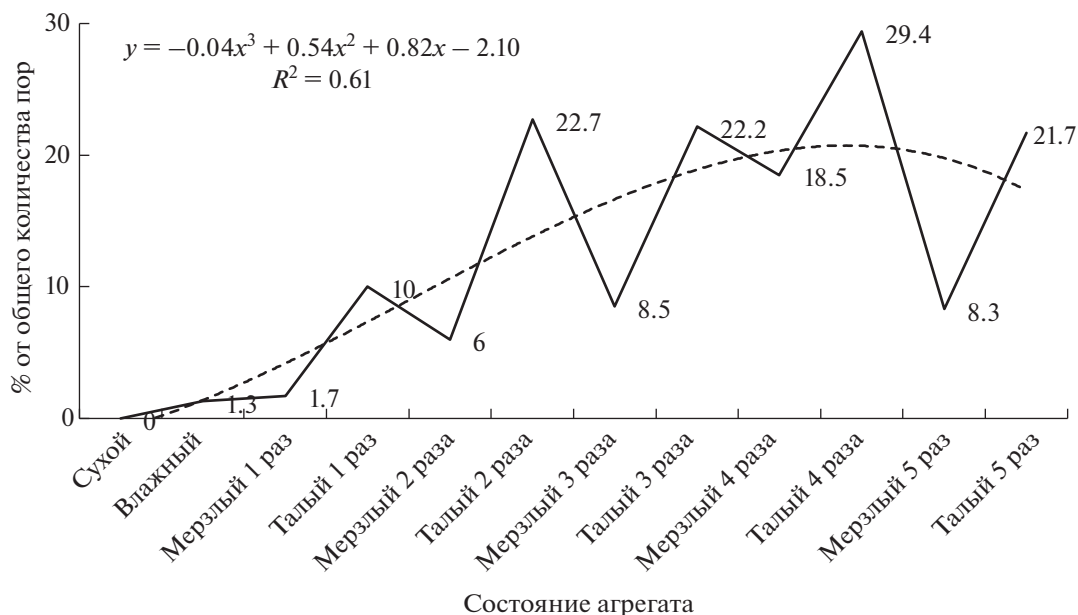


Рис. 8. Динамика содержания пор с округлыми срезами ($0.8 < F \leq 1$) при капиллярном увлажнении, замораживании и оттаивании агрегата в первых пяти циклах опыта.

центное содержание пузырьков ниже, чем в его талых состояниях. При этом содержание пузырьков пор заметно возрастает от первого к четвертому циклу. На пятом цикле развитие пузырьков пор затухает, талый агрегат полностью теряет свою форму, расплывается, количество пузырьков пор в почвенной массе уменьшается в силу их укрупнения и в результате выхода пузырьков за пределы почвенной массы. Последующее 10- и 20-кратное замораживание показало, что в мерзлом агрегате можно обнаружить единичные пузырьковые поры, однако ведущим мотивом структурной организации диспергированной почвенной массы становятся горизонтально ориентированные морозные микрошлиры.

Следует подчеркнуть, что результаты, полученные при лабораторном исследовании обособленного агрегата, не могут непосредственно распространяться на агрегаты, расположенные в толще горизонта, и, тем более, на весь горизонт в целом. Однако проведенный опыт дает представление о специфической роли капиллярного увлажнения, замораживания, оттаивания почвы в формировании внутриагрегатной пористости подзолистых горизонтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный лабораторный эксперимент позволил визуализировать и количественно охарактеризовать строение внутриагрегатного порового пространства агрегата $d = 3$ мм из горизонта ЕL дерново-подзолистой почвы в его воз-

душно-сухом состоянии, а также при последующем капиллярном увлажнении и циклическом замораживании—оттаивании. Показано, что в условиях опыта процессы увлажнения, замораживания и оттаивания являются главными факторами развития внутриагрегатной везикулярной пористости в малогумусном пылеватом материале элювиального горизонта. При этом каждый из процессов вносит собственный вклад в итоговое формирование пузырьков пор.

Капиллярное увлажнение воздушно-сухого агрегата обуславливает зарождение пузырьков микропор в почвенной массе. Первичное замораживание добавляет к общей картине порового пространства признаки морозной микрошлирности. Первичное оттаивание замороженного агрегата запускает процессы обособления и постепенного укрупнения пузырьков пор. В последующих циклах опыта замораживание фиксирует сложившуюся картину пузырьковой пористости (и вносит некоторые искажения благодаря появлению шлирности), а оттаивание способствует слиянию пузырьков в более крупные обособленные поры округлой формы.

Основные томографически видимые изменения порового пространства приурочены к стадии капиллярного увлажнения и первым четырем циклам замораживания—оттаивания. На пятом и последующих циклах многие из пузырьков пор выходят за пределы расплывшегося агрегата и при 10–20-кратном замораживании в мерзлом агрегате ведущим мотивом структурной организа-

ции становятся горизонтально ориентированные морозные микрошпильеры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-04-01056). Работа выполнена с привлечением оборудования Центра 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Л., Шеин Е.В., Скворцова Е.Б. Томография порового пространства почв: от морфологической характеристики к структурно-функциональным оценкам // Почвоведение. 2019. № 1. С. 61–69. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010064>
2. Лебедева М.П. Микростроение субаридных и аридных почв суббореального пояса Евразии. Дис. ... докт. с.-х. н. М., 2012.
3. Пемза. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия / Под ред. Козловского Е.А. 1984–1991.
4. Семенов В.М., Козут Б.М., Лукин С.М. Влияние повторяющихся циклов высушивания–увлажнения замораживания–оттаивания на активный пул органического вещества почвы // Почвоведение. 2014. № 4. С. 443–454. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14040078>
5. Скворцова Е.Б., Герке К.М., Корост Д.В., Абросимов К.Н. Строение порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (Анализ 2D и 3D изображений) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 65–79.
6. Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р. Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства почвы // Почвоведение. 1993. № 6. С. 49–56.
7. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Хохлов С.Ф., Хайдапова Д.Д., Ключева В.В., Юдина А.В. Микротомографический анализ порового пространства целинной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1328–1336. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16110095>
8. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Юдина А.В., Ключева В.В., Хайдапова Д.Д., Розов В.В. Влияние многократного замораживания–оттаивания на микроструктуру агрегатов дерново-подзолистой почвы (микротомографический анализ) // Почвоведение. 2018. № 2. С. 187–196. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18020065>
9. Anderson K., Wells S., Graham R. Pedogenesis of vesicular horizons // Soil Sci. Soc. Am. J. 2002. V. 66. P. 878–887.
10. Baird A.J., Beckwith C.W., Waldron S., Waddington J.M. Ebullition of methane-containing gas bubbles from near-surface Sphagnum peat // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. L21505. <https://doi.org/10.1029/2004GL021157>
11. Bapiri A., Baath E., Rousk J. Drying–rewetting cycles affect fungal and bacterial growth differently in an arable soil // Microbial Ecology. 2010. V. 60. P. 419–428.
12. Brown K.J., Dunkerley D.L. The influence of hillslope gradient, regolith texture, stone size and stone position on the presence of a vesicular layer and related aspects of hillslope hydrologic processes: A case study from the Australian arid zone // Catena. 1996. V. 26. P. 71–84. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00034-8)
13. Ellis F. Note on soils with vesicular structure and other micromorphological features in Karoo soils. 16th Congr. of the Soil Sci. Soc. of South Africa, Pretoria. 1990. P. 326–336.
14. Evenari M., Yaalon D.H., Gutterman Y. Note on soils with vesicular structure in deserts // Z. Geomorphol. 1974. V. 18. P. 162–172.
15. Figueira H., Stoops G. Application of micromorphometric techniques to the experimental study of vesicular layer formation // Pedologie (Gent). 1983. V. 33. P. 77–89.
16. Herrmann A., Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze–thaw cycles in soils // Soil Biology and Biochemistry. 2002. V. 34. P. 1495–1505.
17. Hugh A.L. Henry Soil freeze–thaw cycle experiments: trends, methodological weaknesses and suggested improvements // Soil Biol. Biochem. 2007. V. 39. Is. 5. P. 977–986. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.11.017>
18. Kim D.-G., Vargas R., Bond-Lamberty B., Turetsky M.R. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 2459–2483. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2459-2012>
19. Koponen H.T., Martikainen P.J. Soil water content and freezing temperature affect freeze thaw related N₂O production in organic soil // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2004. V. 69. P. 213–219.
20. Kurganova I., Teepe R., Loftfield N. Influence of freeze–thaw events on carbon dioxide emission from soil at different moisture and land use // Carbon Balance and Management. 2007. V. 2.2. P. 1–9.
21. 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 aridic soils of Mongolia // Quaternary International. 2016. V. 418. № 5. P. 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.042>
22. Miller D.E. Formation of vesicular structure in Soil // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1971. V. 35. P. 635–637. <https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500040042x>
23. Pardini G., Guidi G.V., Pini R., Regues D., Gallart F. Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting–drying cycles and freezing–thawing cycles // Catena. 1996. V. 27. № 3–4. P. 149–165.
24. Springer M.E. Desert pavement and vesicular layer of some soils of the desert of the Lahontan Basin, Nevada // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1958. V. 22. P. 63–66. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200010017x>

25. Teepe R., Brumme R., Beese F. Nitrous oxide emission from soil during freezing and thawing periods // *Soil Biol. Biochem.* 2001. V. 33. P. 1269–1275.
26. Turk J.K., Graham R.C. Distribution and Properties of Vesicular Horizons in the Western United States // *Pedology*. SSSAJ. 2011. V. 75. № 4. P. 1449–1461.
27. Wagner-Riddle C., Thurtell G.W., Kidd G.K., Beauchamp E.G., Sweetman R. Estimates of nitrous oxide emissions from agriculture fields over 28 months // *Can. J. Soil Sci.* 1997. V. 77. P. 135–144.
28. Yonovitz M., Drohan P.J. Pore morphology characteristics of vesicular horizons in undisturbed and disturbed arid soils; implications for arid land management // *Soil Use Manage.* 2009. V. 25. P. 293–302. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00225.x>

Formation of Vesicular Pores in Aggregates of Eluvial Horizon of Albic Glossic Retisol in Freeze-Thaw Cycles

E. B. Skvortsova^{1,*}, E. V. Shein^{1,2}, K. A. Romanenko¹, and K. N. Abrosimov¹

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: eskvora@mail.ru*

In this article, we discuss the contribution of capillary wetting and multiple freezing and thawing to formation and evolution of vesicular micro- and meso-porosity inside a soil aggregate $d = 3$ mm from the eluvial horizon of Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic). The main visible changes occur during capillary wetting and first four cycles of freezing and thawing. Capillary wetting of air-dry aggregate initiates formation of vesicular micropores in the soil material. The first freezing fixates the newly formed vesicles and contributes to the development of inter-aggregate micro-Schlieren. The first thawing causes isolation and growth of individual vesicular pores. Freezing fixates the aggregate structure of pore space and thawing promotes the coalescence of small vesicular pores into large vesicular pores during the next 3 cycles. Many large vesicular pores leave the deformed aggregates at the 5th freezing – thawing cycle. Starting from 10th cycle Schlieren dominate the pore space of frozen aggregates.

Keywords: soil physics, soil morphology, soil micromorphology, soil pore space, capillary wetting, freezing and thawing, Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic)