

УДК 631.4

## ИЗМЕНЕНИЕ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ГУМУСОВЫХ АГРЕГАТАХ ДЕРНОВО- ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

© 2018 г. Е. Б. Скворцова<sup>1</sup>, Е. В. Шейн<sup>1,2</sup>, К. А. Романенко<sup>1</sup>,  
К. Н. Абросимов<sup>1</sup>, А. В. Юдина<sup>1</sup>, В. В. Ключева<sup>1</sup>,  
Д. Д. Хайдапова<sup>2</sup>, В. В. Рогов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева,  
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, 1  
e-mail: eskvora@mail.ru

Рассмотрены основные этапы трансформации твердой фазы и порового пространства почвенных агрегатов при цикличном замораживании–оттаивании в лабораторных условиях. С помощью рентгеновской компьютерной микротомографии исследована динамика морфологического строения пор в агрегате  $d = 3$  мм из гумусового горизонта дерново-подзолистой почвы при капиллярном увлажнении и последующем 1, 5, 10 и 20-кратном замораживании ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) и оттаивании ( $+20^{\circ}\text{C}$ ). Показано, что при капиллярном увлажнении общая пористость агрегата, измеренная на томографических реконструкциях, возрастает более чем в 2 раза (от 6.5 до 15.4%). В ходе 1, 5, 10 циклов замораживания–оттаивания происходит постоянное сокращение численности пор и их средних габаритов, а также уменьшение общей томографической пористости агрегата до 13.7, 10.6 и 5.6% соответственно. После 10 циклов наступает относительная стабилизация внутреннего строения агрегата, объем пор с ледяными включениями снижается до воздушно-сухого уровня. Микроморфометрический анализ показал, что однократное замораживание не приводит к существенному изменению формы агрегата и пор. После пяти циклов замораживания–оттаивания начинается деформация агрегата и изменение формы внутриагрегатных пор. 10-кратное замораживание и оттаивание приводит к оплыванию агрегата, снижению общей пористости, исчезновению пор трещиновидной формы и появлению множества пузырьковых пор. После 20 циклов замораживания–оттаивания все крупные внутриагрегатные поры приобретают округлую слабоизрезанную и пузырьковую форму. Низкая устойчивость гумусовых агрегатов к цикличному замораживанию и оттаиванию согласуется с их низкой механической прочностью.

*Ключевые слова:* циклы замораживания–оттаивания, микротомография, микроморфометрия, набухание агрегатов, форма пор

**DOI:** 10.19047/0136-1694-2018-91-6-20

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение циклов замораживания–оттаивания дисперсных пород и почв часто проводят в контролируемых лабораторных экспериментах, которые позволяют регулировать амплитуду и длительность температурных изменений, а также снижают вероятность влияния внешних факторов на результаты исследования ([Hugh, 2007](#)). В настоящее время в лабораторных условиях исследованы многие свойства глинистых пород до и после воздействия циклов замораживания–оттаивания. Описаны морозные изменения коэффициентов фильтрации и диффузии воды в глинистых породах различного гранулометрического состава, изменения плотности и влагосодержания пород ([Курилко, 2000](#)). Описано влияние циклов замораживания–оттаивания на механическую прочность и водопрочность глинистых пород различного гранулометрического состава ([Курилко, 2004](#); [Курилко, Иудин, 2010](#); [Ратькова и др., 2013](#)), на пористость лесных глинистых почвогрунтов ([Ратькова и др., 2015](#)). Зарубежными авторами показано, что увеличение числа циклов замораживания–оттаивания приводит к снижению прочности образцов глины на сжатие на 20–25% ([Ghazavi, Roustaei, 2010](#)).

Помимо физических свойств в лабораторных условиях были детально исследовано микростроение мерзлых тонкодисперсных пород ([Микростроение мерзлых пород, 1988](#)). Установлено, что при лабораторном промораживании глин, тяжелых и средних суглинков сходного минералогического состава (монтмориллонит-гидрослюдистый ил при кварц-полевошпатовом скелете) в верхней быстро промерзающей части образцов формируется неполнослоистая структура с ледяными шлирами мощностью 0.1–2 мм. Мощность минеральных прослоев между шлирами льда увеличивалась в ряду глина – тяжелый суглинок – средний суглинок и составляла в среднем соответственно 1.5, 2.0 и 4.5 мм. В нижней части мерзлой зоны тяжелого суглинка образовалась неполносетчатая структура, в глине и среднем суглинке – неполнослоистая ([Микростроение мерзлых пород, 1988](#)). Сходные результаты получены при лабораторном изучении циклов замораживания–оттаивания глинистых образцов ([Pardini et al., 1996](#)). Микроморфологические наблюдения выявили формирование структуры пластинчатого типа, вызванное повторными циклами замораживания. Помимо этого, в образцах была увеличена общая видимая в шлифах пористость с образованием большого числа нерегулярных и округлых пор.

Аналогичные исследования проводили для почв разного генезиса. Исследовано влияние замораживания и оттаивания на водопрочность агрегатов трех размерных групп (0–1, 1–2 и 2–4 мм) из почв, сформированных на различных почвообразующих породах, в условиях трех, шести и девяти циклов замораживания при температуре –4 и –18°C. Установлено, что в результате замораживания–оттаивания совокупное содержание водопрочных агрегатов уменьшается на 28.6–51.7% в зависимости от типа почвы, причем снижение водопрочности было тем сильнее, чем выше влажность агрегатов перед замораживанием. В различных размерных группах снижение водопрочности составляло 13.8–57.7%. При этом увеличение количества циклов замораживания–оттаивания с трех до шести в целом сопровождалось увеличением водопрочности агрегатов, а после шести циклов – водопрочность агрегатов снижается. Процент водопрочных агрегатов во всех почвах при температуре –18°C был ниже, чем при –4°C ([Oztas, Fayetorbay, 2003](#)). В ходе циклического замораживания–оттаивания почвенных монолитов установлено, что при высокой исходной плотности образцов заморозка приводит к их деформации, а при низкой исходной плотности – к уплотнению почвы ([Wang et al., 2014](#)). Имеются также сведения, что после 1–4 циклов замораживания–оттаивания в суглинистых почвах отмечается незначительное изменение порога напряжения сдвига ([Hazirbaba et al., 2011](#)). Специальные исследования показали, что влияние замораживания–оттаивания на макроагрегатах сказывается сильнее, чем на микроагрегатах ([Six et al., 2004](#)). Микроморфологический анализ выявил интенсивное морозное трещинообразование и формирование шлировой структуры в пахотных суглинистых почвах, сильно уплотненных сельскохозяйственной техникой ([Скворцова, Сапожников, 1998](#)).

Появление компьютерных томографов существенно расширило возможности изучения мерзлых пород и почв. Томографический анализ мерзлых почвенных образцов позволяет получать трехмерную картину морозного изменения структуры почвы и перераспределения влаги с образованием ледяных линз, шлик и прослоек различной ориентации ([Torrance et al., 2008](#); [Taina et al., 2013](#)). Установлено, что при циклическом замораживании и оттаивании горных пород происходит изменение структуры порового пространства не только в поверхностном слое, но и во всем объеме породы. При этом общая пористость увеличивается за счет образования новых

пор, не выходящих на поверхность образца ([Вайсберг, Каменева, 2015](#)). Рентгенограммы Ниагарской глины показали увеличение количества горизонтальных трещин при замораживании образцов. При этом пять и десять циклов замораживания–оттаивания показали аналогичные результаты (т.е. без дальнейшего изменения в структуре глины) ([Laplanche, 1998](#)). С помощью компьютерной микротомографии описаны существенные морозные изменения микроструктуры насыпных образцов почв, пропущенных через сито в 1 мм ([Романенко и др., 2016](#)). Опыты показали, что почвенный материал разного генезиса по-разному откликается на воздействие в виде многократного замораживания–оттаивания. Изменения строения образца за счет многократного перехода влаги из жидкого состояния в твердое накладывает на изначальный характер строения насыпного образца. По силе отклика объектов на температурное воздействие можно выделить ряд в порядке убывания изменений в структуре: текстурный горизонт дерново-подзолистой почвы > гумусовый горизонт чернозема типичного > солонцовый горизонт солонца.

Разнообразие опубликованных работ отражает существующий интерес к изучению динамики строения пород и почв в условиях циклического замораживания и оттаивания. Одной из актуальных проблем в этой области является изучение устойчивости строения и свойств субстратов в условиях фазовых переходов. В том числе остается неясным, в какой степени последствия циклов замораживания–оттаивания могут накапливаться или стираться при увеличении количества циклов ([Hugh, 2007](#)).

Цель работы – характеристика основных этапов трансформации твердой фазы и порового пространства почвенных агрегатов при циклическом замораживании–оттаивании в лабораторных условиях.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служили агрегаты  $d = 3$  мм из гумусового горизонта дерново-подзолистой почвы на покровных суглинках. Разрез заложен под 90-летним еловым лесом с примесью березы в районе д. Дарьино Московской области. Гранулометрический состав гумусового горизонта представлен в табл. 1. Содержание гумуса в агрегатах составляло 2.5%, механическая прочность агрегатов низкая, резко уменьшается при капиллярном увлажнении (табл. 2).

**Таблица 1.** Гранулометрический состав гор. АУ дерново-подзолистой почвы под ельником (метод лазерной дифрактометрии на анализаторе Microtrac S3500 серия BlueWave 1, MicrotracInc.)

Горизонт, глубина, см	Размер агрегатов, мм						
	<0.001	0.001–0.005	0.005–0.01	0.01–0.05	0.05–0.25	0.25–1	>1
АУ, 0–5	4.16	19.28	15.64	55.07	3.82	1.99	39.08

**Таблица 2.** Механическая прочность воздушно-сухих и капиллярно-увлажненных агрегатов размером 3–5 мм (метод конического пластомера Ребиндера)

Горизонт	Агрегаты			
	воздушно-сухие		капиллярно-увлажненные	
	<i>P</i> , кг/см <sup>2</sup>	<i>W</i> , %	<i>P</i> , кг/см <sup>2</sup>	<i>W</i> , %
АУ	1.38	1.15	0.06	30.90

Лабораторный эксперимент проводили в ФГБНУ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”. Основным методом исследования являлся микротомографический анализ агрегата с помощью лабораторного микротомографа Bruker SkyScan 1172, оснащенного терморегулирующим модульным столиком SkyScan microcooling stage (Бельгия). Столик содержит охлаждающий элемент Пельтье и предназначен для охлаждения образца до температуры  $-15^{\circ}\text{C}$  и поддержания в образце отрицательной температуры на всем протяжении томографического сканирования. Опыт заключался в последовательном томографическом сканировании одного и того же образца в следующих его состояниях: воздушно-сухом, при капиллярном насыщении водой, в мерзлом при однократном замораживании, в мерзлом после пяти циклов оттаивания–замораживания, в мерзлом после 10 циклов оттаивания–замораживания и в мерзлом состоянии после 20 таких циклов. Насыщение агрегата водой и все этапы замораживания–оттаивания проводили, не вынимая агрегат из камеры томографа. С этой целью была разработана специальная методика.

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 (рис. 1), который устанавливали в камере томографа Bruker SkyScan 1172, и производили первичное томографическое сканирование сухого агрегата.



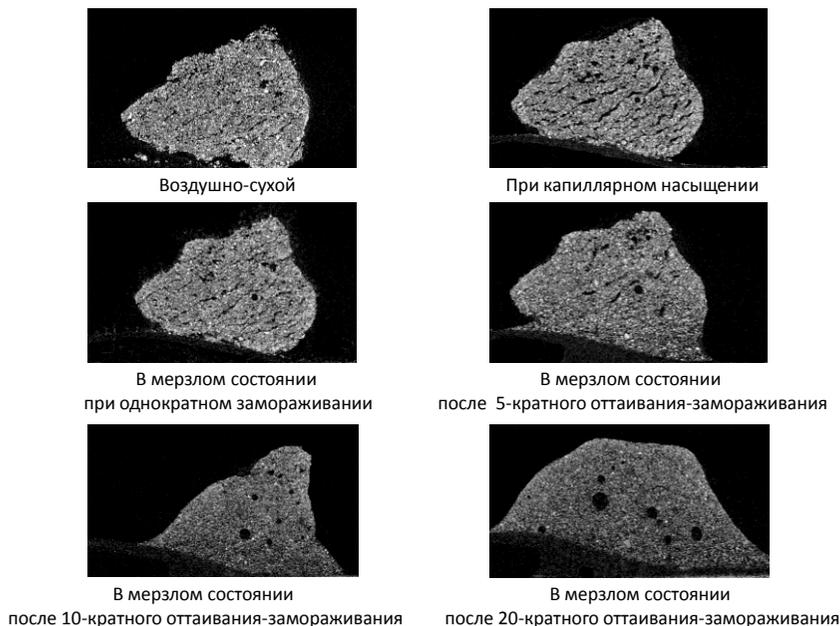
**Рис. 1.** Терморегулирующий модульный столик с почвенным агрегатом.

Затем образец, не вынимая из камеры томографа, капиллярно увлажняли через лежащую на дне фильтровальную бумагу с помощью шприца до полного потемнения всей поверхности образца, и закрывали цилиндр 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. Далее увлажненный образец подвергали повторному томографическому сканированию. Затем агрегат замораживали в столике до  $-10^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность заморозки составляла 1 ч. Далее проводили томографическое сканирование мерзлого образца, в ходе которого поддерживалась его отрицательная температура. Сканирование агрегата в мерзлом состоянии проводили при первичном замораживании, а также после 5-, 10- и 20-кратного оттаивания–замораживания. На всех этапах работы образец оставался в камере томографа, и его положение в пространстве не изменялось.

Разрешение съемки составляло 2.75 мкм/пиксель, что допускает анализ почвенной массы на мезо- и микроуровнях. Компьютерную реконструкцию изображений по данным томографического сканирования проводили с использованием программного обеспечения SkyScan. Микроморфометрический анализ пор в полученных реконструкциях проводили по программам Image-Pro.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Визуальный анализ полученных томографических изображений показал, что воздушно-сухой агрегат имеет четкие контуры, и его поровое пространство включает изометричные изрезанные, вытянутые изрезанные и трещиновидные поры. В ходе капиллярного насыщения происходит заметное увеличение толщины и протяженности трещиновидных пор (рис. 2).



**Рис. 2.** Двумерные срезы через компьютерные томографические реконструкции агрегата  $d = 3$  мм из гор. АУ целинной дерново-подзолистой почвы в условиях циклического замораживания–оттаивания. Разрешение сканирования 2.75 мкм/пиксель, разрешение реконструкции – 5.0 мкм/пиксель.

Для количественной характеристики порового пространства в вертикальных двумерных срезах через томографические реконструкции агрегатов был проведен морфометрический анализ пор  $d > 30$  мкм. Во всех вариантах опыта измерения проводили в поле зрения  $2.2 \times 2.2$  мм (табл. 3).

Измерения показали, что в результате набухания при капиллярном насыщении общая видимая пористость агрегата увеличилась более, чем в 2 раза.

**Таблица 3.** Морфометрические показатели пор в агрегате диаметром 3 мм дерново-подзолистой почве под ельником, гор. АУ

Состояние агрегата	Общая видимая пористость, % от площади поля зрения	Количество пор в поле зрения	Статистика	Морфометрические показатели			
				площадь пор $S$ , мм <sup>2</sup>	габариты пор		фактор формы пор $F^*$
					продольные $L$ , мм	поперечные $D$ , мм	
Воздушно-сухой	6.5	49	$M$	0.0066	0.157	0.080	0.44
			$\sigma$	0.0051	0.078	0.032	0.14
Капиллярно увлажненный	15.4	69	$M$	0.011	0.200	0.080	0.46
			$\sigma$	0.010	0.130	0.040	0.14
1 заморозка	13.7	72	$M$	0.0092	0.190	0.103	0.44
			$\sigma$	0.0063	0.100	0.039	0.14
5 заморозок	10.6	58	$M$	0.0089	0.173	0.093	0.45
			$\sigma$	0.0075	0.081	0.034	0.14
10 заморозок	5.6	39	$M$	0.0070	0.143	0.085	0.47
			$\sigma$	0.0092	0.045	0.039	0.17
20 заморозок	6.4	23	$M$	0.0130	0.160	0.103	0.51
			$\sigma$	0.0250	0.084	0.072	0.17

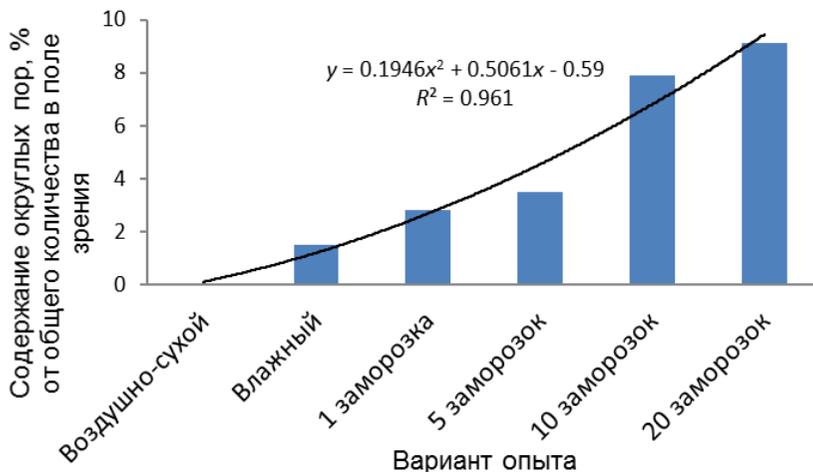
\*Фактор формы  $F = (4\pi S/P^2 + D/L)/2$ , где  $S$  – площадь,  $P$  – периметр,  $D$  – поперечный габарит,  $L$  – продольный габарит пор в двумерных срезах (Скворцова, Калинина, 2004),  $M$  – среднее арифметическое;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

Увеличение пористости произошло в результате роста численности пор и увеличения их габаритов. При первичном замораживании количество пор также немного возрастает, однако их габариты уменьшаются, в результате чего снижается общая видимая пористость. Указанные изменения малы по абсолютным величинам и не меняют общую картину внутриагрегатного порового пространства. Поскольку внешние контуры агрегата также изменяются незначительно, можно заключить, что однократное замораживание не вызывает значимых изменений агрегата в целом.

Увеличение количества циклов оттаивания–замораживания в ряду от 1 до 10 сопровождается постоянным сокращением численности пор, их средних габаритов и уменьшением общей видимой пористости агрегата. Однако после 20-кратных циклов оттаивания–замораживания средние габариты пор резко увеличиваются, что обуславливает некоторое увеличение общей пористости почвы в целом, несмотря на сокращение численности измеряемых пор. Увеличение средних размеров пор, в первую очередь их средней площади, обусловлено появлением в почве крупномерных полостей округлой формы.

Для количественной характеристики формы пор в 2D-изображениях использовали фактор формы  $F = (4\pi S/P^2 + D/L)/2$ , где  $S$  – площадь,  $P$  – периметр,  $D$  – поперечный габарит,  $L$  – продольный габарит пор в двумерных срезах ([Скворцова, Калинина, 2004](#)). Согласно формуле, величина фактора  $F$  для пор округлой формы равна или приближается к 1.0. На рис. 3 показано, что при многочисленных циклах оттаивания–замораживания доля округлых пор с  $F = 0.8–1.0$  в поровом пространстве агрегата существенно возрастает.

Ранее показано, что ледяные включения на томографических изображениях имеют темно-серую окраску, а пустоты, занятые воздухом, окрашены в черный цвет ([Романенко и др., 2016](#)). Судя по тому, что новообразованные округлые полости на изображениях имеют черную окраску, эти полости заняты не льдом, а почвенным воздухом. Предположительно, выделение пузырьков газа происходит в периоды оттаивания при высокой влажности и слабо выраженной дифференциации почвы на внутриагрегатные структурные отдельности.



**Рис. 3.** Содержание пор округлой формы в сухом, влажном и мерзлом агрегате на разных стадиях опыта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Набухание агрегата диаметром 3 мм из среднесуглинистого гумусового горизонта целинной дерново-подзолистой почвы при его капиллярном увлажнении сопровождается увеличением общего объема внутриагрегатного порового пространства в результате появления крупномерных пор вытянутой изрезанной формы.

Однократное замораживание не приводит к существенной трансформации агрегата.

Многократное замораживание–оттаивание приводит к изменению формы агрегата (оплыванию), уменьшению количества тонких пор и появлению крупной везикулярной пористости в массивной почвенной массе.

Исследования показали низкую устойчивость гумусовых агрегатов дерново-подзолистой почвы к деформации в результате циклического замораживания–оттаивания. Это может быть обусловлено небольшим содержанием гумуса в агрегатах (2.5%) и пылеватым гранулометрическим составом почвы. Малая устойчивость к замораживанию и оттаиванию согласуется с низкой механической прочностью исследованных гумусовых агрегатов в капиллярно-насыщенном состоянии.

Результаты проведенных лабораторных исследований циклического замораживания–оттаивания агрегатов суглинистых почв во многом совпадают с имеющимися зарубежными данными. Это касается выявленного морозного перераспределения влаги с образованием ледяных линз ([Torrance et al., 2008](#)), морозного изменения структуры почвы ([Taina et al., 2013](#)). В то же время часть полученных результатов не согласуется с опубликованными за рубежом материалами. По данным Лапланта ([1998](#)), пять и десять циклов замораживания–оттаивания глинистых образцов показали аналогичные результаты (т.е. без дальнейшего изменения в структуре образца). По нашим данным, относительная стабилизация внутреннего строения образца наступает после 10 циклов замораживания–оттаивания. Однако, следует учитывать, что наши результаты получены не для массивных глинистых образцов, а для отдельных гумусовых агрегатов суглинистого гранулометрического состава.

**Благодарность.** Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-04-00949 (разработка методики, микротомографические исследования агрегатов в циклах замораживания–оттаивания) и № 16-04-01111 (исследование гранулометрического состава почвы и механической прочности агрегатов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е.* Изменение структуры горных пород при циклическом замораживании и оттаивании // Обогащение руд. 2015. № 2. С. 28–31. doi: [10.17580/or.2015.02.06](https://doi.org/10.17580/or.2015.02.06)
2. *Курилко А.С.* Влияние циклов замораживания–оттаивания на массообменные свойства дисперсных горных пород. Дис. ... к.т.н. Якутск. 2000. 137 с.
3. *Курилко А.С.* Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания–оттаивания на физико-механические свойства горных пород. Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. 153 с.
4. *Курилко А.С., Иудин М.М.* Каноническое представление влияния циклов замораживания–оттаивания на прочность горных пород // [Горный инженерно-аналитический бюллетень \(научно-технический журнал\)](#). 2010. № 10. С. 310–313.
5. Микростроение мерзлых пород / Под ред. Ершова Э.Д. М.: Изд-во Мшск. ун-та, 1988. 183 с.
6. *Ратькова Е.И., Катаров В.К., Ковалева Н.В.* Уплотнение оснований лесных дорог на глинистых грунтах в межсезонные периоды // Ученые

записки Петрозаводского государственного университета. Биологические науки. 2015. № 4. С. 95–97.

7. *Ратькова Е.И., Сюнев В.С., Катаров В.К.* Влияние цикла замораживания–оттаивания на модуль деформации и коэффициент сжимаемости суглинков // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2013. № 4 (133). С. 75–78.

8. *Романенко К.А., Рогов В.В., Юдина А.В., Абросимов К.Н., Скворцова Е.Б., Курчатова А.Н.* [Исследование микростроения мерзлых почв и дисперсных пород с помощью рентгеновской компьютерной томографии: методы, подходы, перспективы](#) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. № 83. С. 103–117.

9. *Скворцова Е.Б., Калинина Н.В.* Микроморфометрические типы строения порового пространства целинных и пахотных суглинистых почв // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1114–1125.

10. *Скворцова Е.Б., Сапожников П.М.* Трансформация порового пространства уплотненных почв в ходе сезонного промерзания и оттаивания // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1371–1381.

11. *Ghazavi M., Roustaie M.* The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay // Cold Regions Science and Technology. 2010. V. 61. P. 125–131.

12. *Hazirbaba K., Zhang Y., Leroy Hulsey J.* [Evaluation of temperature and freeze-thaw effects on excess pore pressure generation of fine-grained soils](#) // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. T. 31. № 3. С. 372–384.

13. *Hugh A.L. Henry* Soil freeze–thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements // [Soil Biology and Biochemistry](#) 2007. V. 39. Is. 5. P. 977–986.

14. *Laplante C.M.C.* The application of destructive and non-destructive testing techniques to qualitatively analyze the cracking structure produced by freeze–thaw cycles in compacted fine-grained soils Degree: Ph.D., 1998.

15. *Oztas T., Fayetorbay F.* [Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability](#) // Catena. 2003. T. 52. № 1. С. 1–8.

16. *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.

17. *Six J., Bossuyt H., Degryse S., Denef K.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil Tillage Research. 2004. V. 79. P. 7–31.

18. *Taina I.A., Heck R.J., Deen W., Ma E.Y.T.* Quantification of freeze–thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computed tomography // Can. J. Soil Sci. 2013. V. 93. P. 533–553.

19. *Torrance J.K., Elliot T., Martin R., Heck R.J.* X-ray computed tomography of frozen soil // Cold regions science and technology. 2008. V. 53. P. 75–82.

20. Wang T.-L., Bu J.-Q., Xu L., Wang Y., Yan H. [Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles](#) // Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese J. Geotechnical Engineering. 2014. V. 36. № 4. P. 625–632.

## **THE CHANGES IN PORE SPACE IN HUMUS AGGREGATES OF SODDY PODZOLIC SOILS IN CONDITIONS OF MULTIPLE FREEZING AND THAWING PROCESS**

**E. B. Skvortsova<sup>1</sup>, E. V. Shein<sup>1</sup>, K. A. Romanenko<sup>1</sup>,  
K. N. Abrosimov<sup>1</sup>, A. V. Yudina<sup>1</sup>, V. V. Klyueva<sup>1</sup>,  
D. D. Khaidapova<sup>2</sup>, V. V. Rogov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia, 119017, Moscow, Pyzhevskii per. 7-2*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1*

The major laps of the soil solid phase and pore transformation during the cycles of freezing and thawing were considered in the laboratory conditions. With the help of X-Ray computer tomography we studied the dynamics of micromorphological pore composition in the aggregate  $d = 3$  mm from the humus layer of the soddy-podzolic soil at the capillary moistening and the following 1, 5, 10 and 20 times freezing ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) and thawing ( $+20^{\circ}\text{C}$ ). We showed that during the capillary moistening the total porosity of the aggregate, which was measured on the tomographic reconstructions, is increased by more than 2 times (from 6.5 to 15.4%). During 1, 5 and 10 cycles of freezing and thawing the constant decrease of pores number and their average sizes occurs. There is also observed the decrease of the total tomographic aggregates porosity to 13.7, 10.6 and 5.6% correspondingly. After the 10 cycles of freezing and thawing the relative stabilization of the inner aggregates composition occurs. The volume of pores with inclusions of ice was decreased to the air-dry level. The micromorphometric analysis showed that the single freezing doesn't lead to the significant changes in the form of aggregate and pores. After the five cycles of freezing and thawing the deformation of the aggregate and changes in the form of inner aggregate pores occurs. After the 10 times freezing and thawing the sloughing of aggregate occurs, the total porosity decreases, pores with crack-like form disappear, and the numerous vesicular pores occur. After the 20 cycles of freezing and thawing all of the inner aggregate pores obtain the roundish weakly dissected and vesicular form. The low sustainability of humus aggregates to the cyclic freezing and thawing corresponds with their low mechanical stability.

*Keywords:* freezing and thawing cycles, microtomography, micromorphometry, aggregate swelling, pores form

## REFERENCES

1. Vaysberg L.A., Kameneva E.E. Change in the structure of rocks with cyclic freezing and thawing, *Enrichment of ores*, 2015, No. 2, pp. 28-31. doi: 10.17580/or.2015.02.06 (in Russian)
2. Kurilko A.S. *Effect of freeze-thaw cycles on the mass transfer properties of dispersed rocks*. Dis. ... Ph.D. Yakutsk, 2000, 137 p. (in Russian)
3. Kurilko A.S. *Experimental studies of the effect of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of rocks*. Yakutsk: SB RAS Publ. House, 2004, 153 p. (in Russian)
4. Kurilko A.S., Iudin M.M. Canonical representation of the influence of freeze-thaw cycles on the strength of rocks, *Mining information-analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2010, No. 10, pp. 310-313. (in Russian)
5. *Microstructure of frozen rocks* / Ed. Ershova E.D. Moscow: Publ. House Mosk. University, 1988, 183 p. (in Russian)
6. Ratkova E.I., Katarov V.K., Kovaleva N.V. Sealing of the bases of forest roads on clay soils in off-season periods, *Uchenye zapiski Petrozavodsk State University. Biological Sciences*, 2015, No. 4, pp. 95-97. (in Russian)
7. Ratkova E.I., Syunev V.S., Katarov V.K. The influence of the freeze-thaw cycle, the strain modulus and the compressibility coefficient of loam, *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gos. University. Ser. Natural and technical sciences*, 2013, No. 4 (133), pp. 75-78. (in Russian)
8. Romanenko K.A., Rogov V.V., Yudina A.V., Abrosimov KN, Skvortsova E.B., Kurchatova A.N. Frozen soils and sediments microstructure x-ray tomography study: methods, approaches, perspectives, *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2016, No. 83, pp. 103-117. (in Russian)
9. Skvortsova E.B., Kalinina N.V. Micromorphometric types of the pore space structure of virgin and arable loamy soils, *Eurasian Soil Science*, V. 37, No. 9, pp. 980-991.
10. Skvortsova E.B., Sapozhnikov P.M. Transformation of pore space of compacted soils during seasonal freezing and thawing, *Pochvovedenie*, 1998, No. 11, pp. 1371-1381. (in Russian)
11. Ghazavi M., Roustaei M. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, *Cold Regions Science and Technology*, 2010, V. 61, pp. 125-131.
12. Hazirbaba K., Zhang Y., Leroy Hulsey J. [Evaluation of temperature and freeze-thaw effects on excess pore pressure generation of fine-grained soils](#), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, T. 31, № 3, pp. 372-384.
13. Hugh A.L. Henry Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements, [Soil Biology and Biochemistry](#), 2007, V. 39, No. 5, pp. 977-986.

14. Laplante C.M.C. *The application of destructive and non-destructive testing techniques to qualitatively analyze the cracking structure produced by freeze-thaw cycles in compacted fine-grained soils*: Ph.D., 1998.
15. Oztas T., Fayetorbay F. [Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability](#), *Catena*, 2003, V. 52, No. 1, pp. 1–8.
16. 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, No. 3–4, pp. 149–165.
17. Six J., Bossuyt H., Degryse S., Deneff K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Soil Tillage Research*, 2004, V. 79, pp. 7–31.
18. Taina I.A., Heck R.J., Deen W., Ma E.Y.T. Quantification of freeze-thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computed tomography, *Can. J. Soil Sci.*, 2013, V. 93, pp. 533–553.
19. Torrance J.K., Elliot T., Martin R., Heck R.J. X-ray computed tomography of frozen soil, *Cold regions science and technology*, 2008, V. 53, pp. 75–82.
20. Wang T.-L., Bu J.-Q., Xu L., Wang Y., Yan H. [Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles](#) // *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese J. Geotechnical Engineering*. 2014. V. 36. № 4. P. 625–632.

### Ссылки для цитирования

Скворцова Е.Б., Шейн Е.В., Романенко К.А., Абросимов К.Н., Юдина А.В., Ключева В.В., Хайдапова Д.Д., Рогов В.В. Изменение порового пространства в гумусовых агрегатах дерново-подзолистой почвы при многократном замораживании и оттаивании // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 91. С. 6-20. doi: 10.19047/0136-1694-2018-91-6-20

Skvortsova E.B., Shein E.V., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Yudina A.V., Klyueva V.V., Khaidapova D.D., Rogov V.V. The changes in pore space in humus aggregates of soddy podzolic soils in conditions of multiple freezing and thawing process, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 91, pp. 6-20. doi: 10.19047/0136-1694-2018-91-6-20