КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 4, с. 75–81 **http://www.izdatgeo.ru**

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 631.436.6 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(75-81)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИИ МИКРОСТРОЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ПОЧВ

К.А. Романенко[1], К.Н. Абросимов[2], А.Н. Курчатова[3,6], В.В. Рогов[3–5]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ф-т почвоведения, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; lusteramisho@mail.ru*
[2]*Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия; kv2@bk.ru*
[3]*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия*
[4]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; rogovvic@mail.ru*
[5]*Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия*
[6]*Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 56, Россия; kanny@mail.ru*

Проведены исследования микростроения мерзлых пород и почв методом рентгеновской компьютерной томографии. Показаны преимущества предлагаемого метода перед другими, применяемыми в тех же целях. Охарактеризована динамика структуры грунтов и почв в циклах промерзания–оттаивания. Определены возможности использования рентгеновской компьютерной томографии в исследовании криогенных процессов.

Мерзлота, мерзлая почва, микроморфология, минеральный скелет, лед, поры, агрегаты, рентгеновская компьютерная микротомография

THE EXPERIENCE OF APPLYING X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY TO THE STUDY OF MICROSTRUCTURE OF FROZEN GROUND AND SOILS

K.A. Romanenko[1], K.N. Abrosimov[2], A.N. Kurchatova[3,6], V.V. Rogov[3–5]

[1]*Lomonosov Moscow State University, Department of Soil Science, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; lusteramisho@mail.ru*
[2]*Dokuchaev Soil Science Institute, 7, Pigevskiy per., Moscow, 119017, Russia; kv2@bk.ru*
[3]*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, P/O box 1230, Tyumen, 625000, Russia*
[4]*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; rogovvic@mail.ru*
[5]*Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia*
[6]*Tyumen State Oil and Gas University, 56, Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russia; kanny@mail.ru*

The structure of frozen ground and soils has been studied by X-ray computer tomography. Significant advantages of the proposed method have been demonstrated. The changes in the structure of ground and soils in the freezing-thawing cycles have been described. Prospects for the use of X-ray computer tomography in the study of cryogenic processes have been identified.

Permafrost, frozen soil micromorphology, mineral skeleton, ice, pores, units, X-ray computer microtomography

ВВЕДЕНИЕ

Строению мерзлых грунтов и почв были посвящены многочисленные работы мерзлотоведов [*Шумский, 1955; Коннова, 1957; Конищев, Фаустова, 1966; Конищев, Рогов, 1977; Жесткова и др., 1980*]. В настоящее время установлено, что характер промерзания и результирующие структурные изменения рыхлых отложений зависят от степени дисперсности, минералогического состава, плотности, влагонасыщенности промерзающего субстрата, а также от условий и режима промерзания [*Микростроение..., 1988*]. Известно, что при промерзании суглинистых пород происходит изменение их структурных характеристик, в том числе размера и формы структурных отдельностей. Из-

© К.А. Романенко, К.Н. Абросимов, А.Н. Курчатова, В.В. Рогов, 2017

меняются также объем, форма и ориентация порового пространства. В почвенной толще промерзание суглинистого материала при условии достаточно высокой исходной влажности сопровождается формированием трещиновидных полостей, заполненных льдом, а также участков с повышенной плотностью внутрипедной массы [*Качинский, 1927; Соколов, Шоба, 1982; Губин, 1993*].

Значительные изменения в состав и строение почв и грунтов вносит процесс неоднократного (циклического) промерзания–оттаивания. За более чем полвека изучения таких преобразований накоплен значительный объем данных. Формирование специфических черт микростроения в покровных образованиях и мерзлотных почвах отмечали грунтоведы, мерзлотоведы и почвоведы [*Кошелева, 1958; Мазуров, Тихонова, 1964; Конищев, Рогов, 1977; Парфенова, Ярилова, 1977; Турсина, 1985; Жангуров и др., 2011; Пастухов, 2012*]. При этом все исследователи сталкивались со значительными трудностями в приготовлении пригодных для исследования микростроения препаратов, связанными главным образом с присутствием в объектах льда. До настоящего времени эти трудности обходятся изучением либо реплик [*Рогов, 2009*], либо шлифов из протаявших образцов, т. е. без льда [*Губин, Лупачев, 2012*]. У всех применяемых подходов и методов исследования микростроения мерзлых почв и отложений есть одна общая черта – для подготовки препаратов для исследования необходимо разрушать образец, т. е. так или иначе вносить искажения в его истинный облик. Поэтому давней целью исследователей микростроения природных объектов была разработка методов неразрушающего анализа. Такой метод появился и вошел в практику исследований в почвоведении, геологии и мерзлотоведении только на рубеже XX–XXI вв. – это метод рентгеновской компьютерной томографии.

Рентгеновская компьютерная томография представляет собой неразрушающий метод визуализации и анализа внутренней структуры образцов с использованием рентгеновского излучения. Авторы метода – американский физик А. Кормак и английский инженер-физик Г. Хаунсфилд, удостоенные в 1972 г. за эту разработку Нобелевской премии. Первоначально томографы применялись в медицинских целях. Затем, после появления приборов с более высоким разрешением (микротомографов), компьютерная томография стала использоваться для решения физических, химических, биологических и геологических задач.

Создание томографов расширило возможности изучения мерзлых пород и почв. В то же время литературные обзоры показали, что томографические исследования мерзлых и промерзающих грунтов и почв остаются весьма редкими [*Taina et al., 2008; Torrance et al., 2008; Shi Jie Chen et al., 2014*].

Целью данной статьи является представление первых результатов томографического исследования криогенных элементов строения образцов почв и пород при одно- и многократном промерзании. В задачу исследования входили разработка методики микротомографического изучения почв и грунтов в мерзлом состоянии и выяснение возможностей данного метода. Кроме того, авторы попытались показать закономерности изменения микростроения образцов почв и грунтов в условиях промерзания–оттаивания методом рентгеновской компьютерной томографии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования были выбраны как модельные грунты, так и материал генетических горизонтов различных суглинистых почв европейской территории России. В качестве модельных объектов использовались пористый лед, кварцевый песок фракции 0.25–0.05 мм и смесь каолиновой глины с добавлением 10 % кварцевого песка. В природных объектах (почвах) исследовали образцы, взятые из горизонта BT целинной дерново-подзолистой почвы Московской области (Зеленоградский опорный пункт Почвенного института им. В.В. Докучаева), гумусового горизонта A1 целинного чернозема (Стрелецкая степь Центрально-черноземного заповедника), горизонта Bca целинного солонца (Джанибекский стационар Института лесоведения РАН) (см. таблицу).

Подготовка образцов почв осуществлялась следующим образом: для нивелирования первичных различий в микроорганизации почвенной массы образцы почвы были протерты пестиком с

Содержание (%) различных фракций в образцах грунтов и почв

Грунт–почва	Горизонт (глубина, см)	Размер фракций, мкм						Градация по Качинскому
		1000–250	250–50	50–10	10–5	5–1	<1	
Песок кварцевый	–	–	99	1	–	–	–	Песок среднезернистый
Каолин просяновский	–	–	–	4.2	5.0	17.6	73.2	Глина тяжелая
Дерново-подзолистая	BT (50–60)	0.01	1.59	52.51	17.06	22.92	5.91	Суглинок тяжелый
Чернозем	A1 (10–15)	0.00	2.74	41.04	17.84	33.27	5.11	Суглинок тяжелый
Солонец	Bca (8–15)	0.82	24.56	29.98	12.41	24.56	7.46	Глина легкая

резиновым наконечником и просеяны через сито 250 мкм. Затем грунтовую массу образцов засыпали в пластиковые цилиндры высотой 12 мм и внутренним диаметром 8 мм (эти размеры обусловлены техническими возможностями томографа). Образцы капиллярно насыщали водой и для обеспечения одномерного промерзания, имитирующего природное промерзание, помещали в пенопластовый штатив для исключения бокового промерзания. Однократное промораживание и циклическое промораживание и оттаивание проводили с помощью климатической камеры Espec SH-241. Каждый цикл состоял из фазы промораживания (10 ч при температуре –20 °С) и фазы оттаивания (10 ч при температуре +20 °С).

Рентгеновское сканирование мерзлых образцов производили с помощью компьютерного микротомографа Bruker SkyScan 1172. Съемка проводилась при разрешении деталей объектов до 2.5 мкм/пиксел. Обработка и анализ томограмм осуществляли специализированным программным обеспечением для двумерного и трехмерного анализа изображений фирмы Bruker. Реконструкция объемного изображения выполнена с использованием программы Recon, объемная модель построена в программе CTvox. Выбор прибора был обусловлен не только его рентгенографическими параметрами, но и тем, что он в качестве стандартной опции имеет охлаждающий столик с возможностью содержать сканируемый образец при –15 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной задачей любых микроскопических исследований является диагностика получаемых изображений на соответствие составляющих реальных деталей объекта и деталей на изображении. Для компьютерных томографов эта задача решается путем измерения и компьютерной обработки разности ослабления рентгеновского излучения различными по плотности деталями изучаемого объекта. В первых томографических исследованиях мерзлых пород [*Torrance et al., 2008*] было обнаружено, что лед и поры в образцах почти одинаково рассеивают рентгеновское излучение и поэтому плохо различаются на томограммах. Для решения такой проблемы отечественными исследователями было применено насыщение воды тяжелыми изотопами [*Давлетшина и др., 2014; Nadeev et al., 2014*]. Однако для изучения натурных образцов почв и мерзлых грунтов это технически весьма сложно, поэтому авторы статьи пошли по пути улучшения качества изображения исследуемых образцов.

Для двухкомпонентных сред (например, пористого льда) визуальное выделение отдельных элементов строения не представляет методических трудностей. На рис. 1 приведено объемное

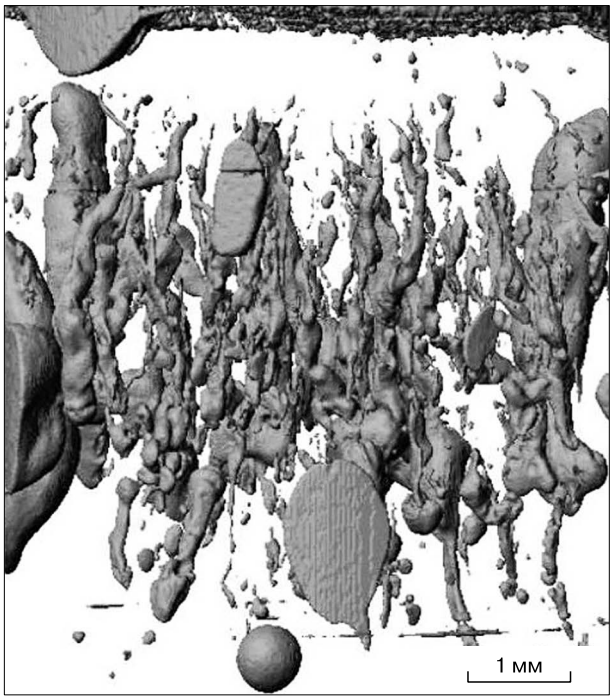

Рис. 1. Распределение пор (серые фигуры) в образце льда.

строение образца пористого льда, полученного одномерным промерзанием газонасыщенной воды. На изображении можно достаточно точно оценить количество включений газа, их объем и форму, что другим методом сделать проблематично. Исходя из этого представляется, что для исследования строения весьма рыхлых криогенных образований, например, снега или фирна, метод рентгеновской микротомографии очень перспективен.

Для мерзлых грунтов понятие пористости обычно определяют как пространство между минеральными частицами скелета, занятое льдом, водой и газами. И если выявление частиц минерального скелета не представляет трудностей, то диагностика компонентов в пространстве пор весьма сложна. Данная проблема изучалась на примере промороженных образцов кварца фракции 0.10–0.25 мм с неполным (W = 15 %) и полным заполнением пор водой.

Как видно на рис. 2, в образцах с неполным влагонасыщением пространство между частицами скелета (3) занято льдом (1) и пустотами (2). Данные компоненты можно также различить по их морфологии – смачивание частиц водой приводит к тому, что лед занимает все контакты между частицами (“манжеты”), а объемы газов имеют округлую форму.

Следует отметить, что анализ строения образцов с неполным заполнением пор в томографе показывает наличие в них игольчатого льда-цемента

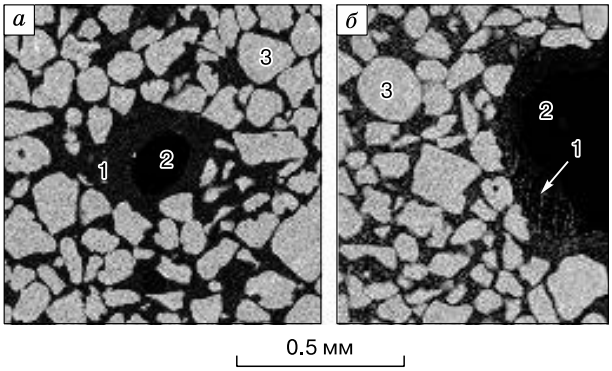

Рис. 2. Микростроение образца кварца с неполным заполнением пор (*а*) и игольчатый ледцемент в образце кварца с неполным заполнением пор (*б*).

1 – лед; 2 – пустоты; 3 – песчаные зерна.

(см. рис. 2, *б*), который обычными методами почти не определяется в силу своей неустойчивости (быстро тает при любом способе раскрытия поверхности). Этот лед образуется за счет аблимации водяного пара, в малольдистых грунтах он может быть превалирующим по сравнению с другими типами льда-цемента [*Жесткова и др., 1980; Рогов, 2009*].

Эффективным оказалось использование микротомографа для изучения криогенных текстур. Так, в образце суглинка легко диагностируются шлиры льда, образующего слоисто-линзовидную текстуру (рис. 3, *а*). При этом возможности томографа позволяют рассмотреть криогенную текстуру в любой плоскости, в том числе в горизонтальной, параллельной фронту промерзания (см. рис. 3, *б*). Изучение криогенной текстуры в таком ракурсе еще не вошло в арсенал мерзлотоведов, но имеет большие перспективы.

Более детальный анализ криогенного строения образцов позволяет подтвердить реальной картиной многие криогенные процессы, ранее определяемые косвенно. Так, в образце каолина с массовой долей 10 % кварца фракции 0.10–0.25 мм

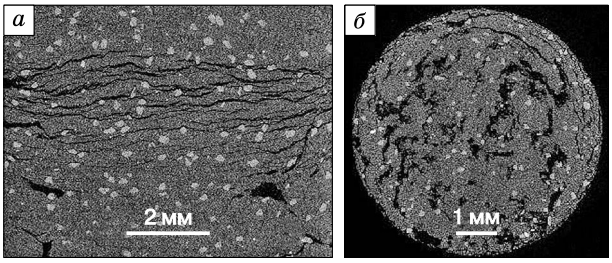

Рис. 3. Криогенные текстуры в образце суглинка.

а – вертикальный срез; *б* – горизонтальный срез; черное – ледяные шлиры.

хорошо иллюстрируются миграция влаги к фронту промерзания, усадка грунта в зоне обезвоживания и образование линз льда под частицами песка, приводящее к передвижению их к поверхности промерзания (рис. 4).

Для изучения динамики строения пород и почв при циклическом промерзании–оттаивании подготовленные, как описано выше, образцы сканировали на микротомографе в мерзлом состоянии после первого промерзания, а также после пяти-, десяти- и двадцатикратных циклов промерзания. В конце эксперимента полученная информация анализировалась с целью выяснения преобразований микростроения в исследуемых образцах.

Смесь каолина с песком была выбрана в качестве простой модели грунта с присутствием грубой и глинистой фракций. Анализ микростроения такой модели показал, что с увеличением числа циклов промерзания–протаивания в образце происходит дифференциация частиц, выражающаяся в перемещении частиц на контакты с ледяными шлирами и в кольцевидной сортировке частиц.

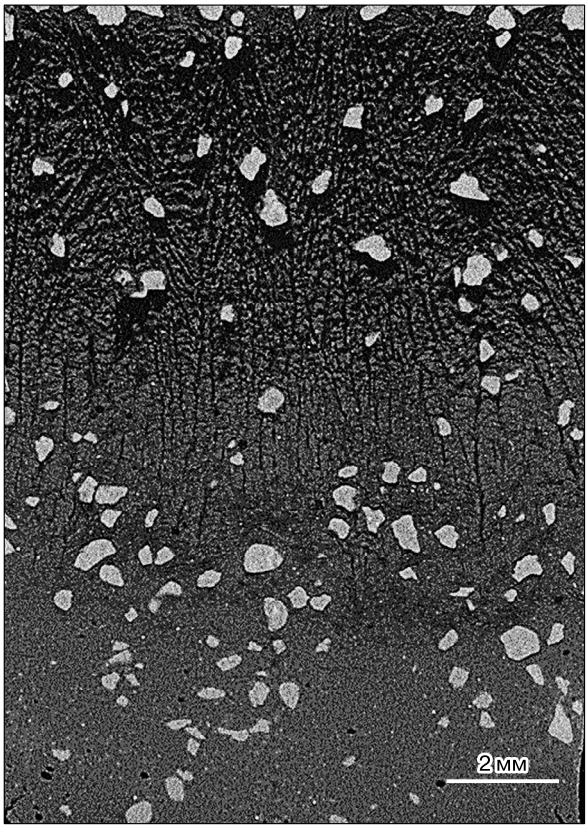

Рис. 4. Вертикальный срез модельной смеси 90 % каолинита и 10 % песка в мерзлом состоянии после однократного промерзания.

Черное – ледяные включения; светлое – частицы кварца; светло-серый фон – каолин.

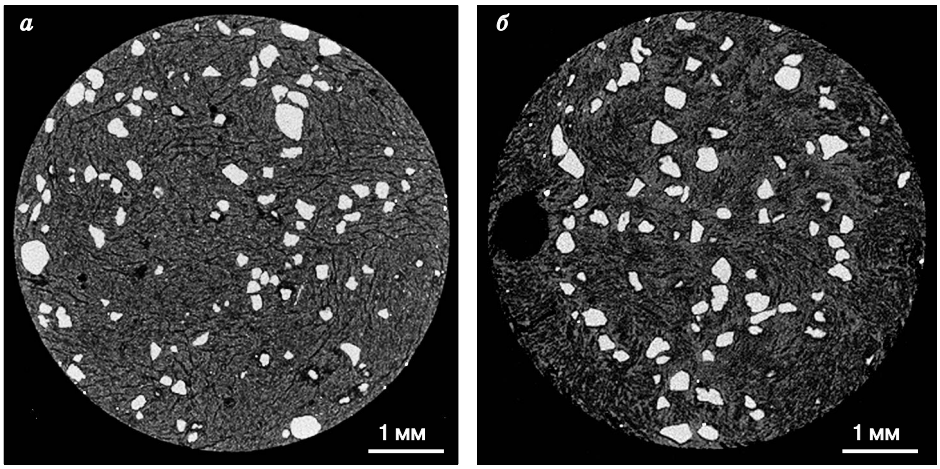

Рис. 5. Распределение песчаных частиц в образце модельной смеси каолинита и песка:

а – после первого промерзания; *б* – после 20 циклов промерзания–оттаивания.

Подобные явления ранее отмечались для мерзлотных почв и покровных образований [*Конищев, Фаустова, 1966; Конищев, Рогов, 1977; Турсина, 1985*] и теперь подтверждены методом компьютерной томографии (рис. 5).

Эксперименты с образцами почв проводились по более широкой программе: наблюдались изменения микростроения в образцах, начиная от немерзлого состояния, затем первого промерзания и так далее, до 20 циклов промерзания–оттаивания. Так, в образце гумусового горизонта чернозема после первого промораживания появились крупные изометричные агрегаты размером от 130 до 250 мкм в поперечнике, которые были разделены трещинами толщиной 20–30 мкм (рис. 6). В массе агрегатов наблюдались поры округлой формы с нечеткими краями диаметром 120–250 мкм, заполненные льдом, вмещающим тонкодисперсный глинистый материал. По мере роста числа циклов промерзания–оттаивания в образце увеличивались густота и ширина трещин в почвенной массе, агрегаты приобретали плитчатую форму с четкими краями. После 20 циклов промерзания–оттаивания в образце сформировались более крупные поры (до 500 мкм) с чистым, без глинистых частиц льдом.

В образце из горизонта ВТ дерново-подзолистой почвы первое промораживание также сильно изменило характер структуры (рис. 7). Изначально равномерно дисперсная масса переструктуризировалась в агрегатную – в ней присутствовали округлые и овальные агрегаты размерами 150–200 мкм в поперечнике, часть агрегатов имела плитчатый вид. Агрегаты разделялись тонкими 20–30 мкм ветвистыми прослойками льда. По ходу эксперимента плитчатые агрегаты становились плотнее, их края становились более четкими. Количество плитчатых агрегатов увеличивалось по краям образца (видимо, сработал краевой эффект промерзания образца цилиндрической формы). Появлявшиеся крупные поры имели нечеткие контуры и содержали внутри тонкодисперсный материал. В образце после 20 циклов промерзания–оттаивания мощность ледяных прослоек уве-

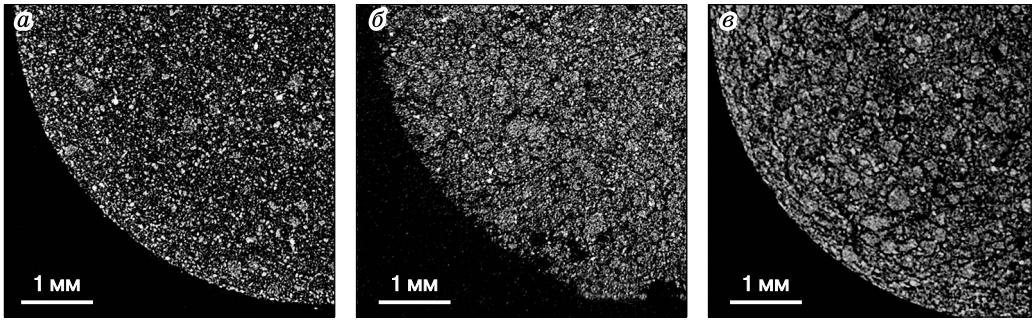

Рис. 6. Микростроение образцов гумусового горизонта чернозема:

а – до промерзания; *б* – после первого промерзания; *в* – после 20 циклов промерзания.

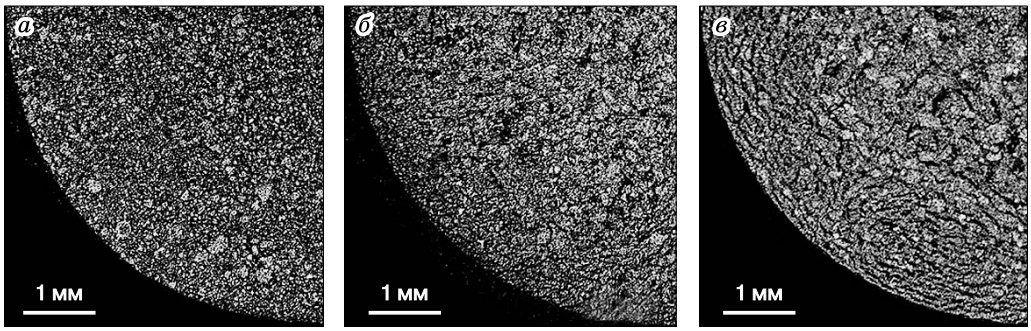

Рис. 7. Микростроение образца дерново-подзолистой почвы, текстурный горизонт ВТ:

а – до промерзания; *б* – после первого промерзания; *в* – после 20 циклов промерзания–оттаивания.

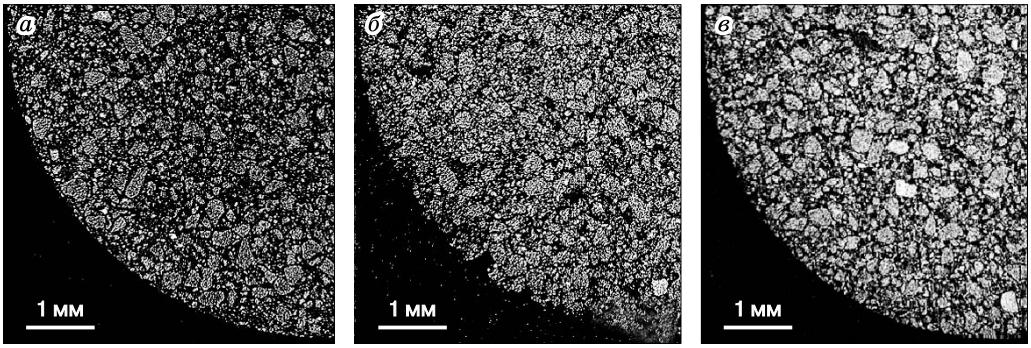

Рис. 8. Микростроение образца солонца:

а – до промерзания; *б* – после первого промерзания; *в* – после 20 циклов промерзания.

личилась, особенно в центральной части; поры приобрели более четкие контуры, и было заметно вымораживание частиц песка внутрь пор.

В образце солонцовой почвы в ходе однократного замораживания и циклов промерзания–оттаивания значительные морфологические изменения не выявлены (рис. 8). Общий рисунок микростроения немерзлого состояния сохранялся, трещины, заполненные льдом, образовались в очень малом количестве в основном в массе мелкодисперсного материала, который находился в пространстве между микроагрегатами размером 200–250 мкм. Можно предположить, что в условиях сильного засоления миграция влаги и льдообразование ослаблены, как и влияние их на перестройку микростроения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт применения компьютерной микротомографии в изучении мерзлых грунтов и почв показал, что это весьма эффективный метод исследования микростроения объектов в разных состояниях, в том числе влажных и мерзлых объектов. Такими объектами могут быть снег, фирн, мерзлые почвы и дисперсные отложения. Главным достоинством томографического метода является возможность исследования образца без механического вмешательства и, следовательно, без нарушения структуры и свойств изучаемых объектов. Кроме того, он дает возможность непосредственного наблюдения различных криогенных процессов во времени. С помощью данного метода можно различить лед, воздух и твердую матрицу и отследить, как меняется их конфигурация в ходе различных процессов, в том числе при образовании льда и ледяных шлиров в промерзающей почве и грунтах, при взаимодействии льда со структурными элементами твердой матрицы.

Вместе с этим опыт использования компьютерного микротомографа Bruker SkyScan 1172 показал, что для изучения мерзлых пород и почв необходим томограф с возможностью исследования образцов большего размера и с высокой разрешающей способностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 14-17-00131).

Литература

Губин С.В. Динамика структурообразования в тундровых криогенных неглеевых почвах (Тундровые криоземы) // Почвоведение, 1993, № 10, с. 62–70.

Gubin, S.V., 1993. The dynamics of structure formation of the tundra cryogenic non-gley soils (tundra cryozems). Pochvovedeniye, 10, 62–70. (in Russian)

Губин С.В., Лупачев А.В. Подходы к выделению и изучению погребенных почв в мерзлых толщах отложений ледового комплекса // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 79–84.

Gubin, S.V., Lupachev, A.V., 2012. Approaches to determination and investigation of soils buried in ice complex deposits. Earth's Cryosphere, XVI (2), 79–84. (in Russian)

Давлетшина Д.А., Чувилин Е.М., Якимчук И.В., Надеев А.Н. Применение рентгеновской микротомографии для исследования микроморфологии мерзлых пород // Тр. III Всерос. конф. "Практическая микротомография". Санкт-Петербург, 2014, с. 45–49.

Davletshina, D.A., Chuvilin, E.M., Yakimchuk, I.V., Nadeev, A.N., 2014. Application of x-ray micro tomography to the study of the micro morphology of frozen soils, in: Proceedings of the III All-Russia conference Practical Micro Tomography, St. Petersburg, pp. 45–49. (in Russian)

Жангуров Е.В., Лебедева (Верба) М.П., Забоева И.В. Микростроение генетических горизонтов автоморфных таежных почв Тимана // Почвоведение, 2011, № 3, с. 288–299.

Zhangurov, E.V., Lebedeva (Verba), M.P., Zaboeva, I.V., 2011. The micro structure of the genetic horizons of the automorphous taiga soils of Timan. Pochvovedeniye, 3, 288–299. (in Russian)

Жесткова Т.Н. Криогенное строение мерзлых пород / Т.Н. Жесткова, М.И. Заболотская, В.В. Рогов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, 135 с.

Zhestkova, T.N., Zabolotskaya, M.I., Rogov, V.V., 1980. The Cryogenic Structure of Permafrost Soils. Moscow, Moscow University Publishing House, 135 pp. (in Russian)

Качинский Н.А. Замерзание, размерзание и влажность почвы в зимний сезон в лесу и на полевых участках / Н.А. Качинский. М., Изд. Ассоциации н.-и. институтов при ф.-м. фак. 1 МГУ, 1927, 168 с.

Kachinsky, N.A., 1927. Freezing, De-freezing and Moisture Content in Soil in the Winter Season in the Forest and in the Field Areas. Association of Research Institutes of physics and mathematics department, Moscow State University, Moscow, 168 pp. (in Russian)

Конищев В.Н., Рогов В.В. Микроморфология криогенных почв и грунтов // Почвоведение, 1977, № 2, с. 119–125.

Konishchev, V.N., Rogov, V.V., 1977. Micro morphology of frozen soils and grounds. Pochvovedeniye, No. 2, 119–125. (in Russian)

Конищев В.Н., Фаустова М.А. Микростроение покровных лессовидных образований Большеземельской тундры // Геология кайнозоя Севера европейской части СССР. М., Изд-во Моск. ун-та, 1966, с. 167–177.

Konishchev, V.N., Faustova, M.A., 1966. The micro structure of loess-like formations of Bolshezemelskaya tundra, in: The geology of the Cainozoic era in the European part of USSR. Moscow State University Publishing House, Moscow, pp. 167–177. (in Russian)

Коннова О.С. Некоторые результаты исследования строения мерзлых пород // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых пород. М., АН СССР, 1957, вып. 3, с. 195–226.

Konnova, O.S., 1957. Certain results of studying the structure of frozen soils, in: Materials for laboratory studies of frozen soils. AS of USSR, Moscow, Issue 3, pp. 195–226. (in Russian)

Кошелева И.Т. Микроморфология тундровых почвогрунтов как возможный индикатор их генезиса // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1958, № 3, с. 35–41.

Kosheleva, I.T., 1958. Micro morphology of soils as a possible indicator of their origin. Proceedings of the Academy of Sciences, USSR , geography series 3, pp. 35–41. (in Russian)

Мазуров Г.П., Тихонова Е.С. Преобразование состава и свойств грунтов при многократном замораживании // Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. геол. и геогр., 1964, № 18, вып. 3, с. 35–44.

Mazurov, G.P., Tikhonova, E.S., 1964. Transformation of the composition and of the properties of ground at multiple freezing: Vestnik Leningradskogo Universiteta, geology and geography series, No. 18 (3), 35–44. (in Russian)

Микростроение мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, 183 с.

Ershov, E.D. (Ed.), 1988. Micro structure of frozen soils, Moscow University Publishing House, Moscow, 183 pp. (in Russian)

Парфенова Е.И. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении / Е.И. Парфенова, Е.А. Ярилова. М., Наука, 1977, 198 с.

Parfenova, E.I., Yarilova, E.A., 1977. A Manual for Micro Morphological Studies of Soil. Nauka, Moscow, 198 pp. (in Russian)

Пастухов А.В. Микроморфологическое строение мерзлотных и длительно сезоннопромерзающих суглинистых почв Европейского северо-востока // Изв. Коми НЦ УРО РАН, 2012, № 4 (12), с. 30–37.

Pastukhov, A.V., 2012. The micro morphological structure of permafrost and seasonally frozen loamy soils of European northeast. Proceedings of Komi NZ URO RAN, No. 4 (12), 30–37. (in Russian)

Рогов В.В. Основы криогенеза / В.В. Рогов. Новосибирск, Академ. изд-во "Гео", 2009, 203 с.

Rogov, V.V., 2009. The Foundations of Cryogenesis. Geo Academic Publishing House, Novosibirsk, 203 pp. (in Russian)

Соколов Л.А., Шоба С.А. Влияние промерзания и оттаивания на свойства почв в зонах рекреационных нагрузок // Науч. докл. Высш. шк. Биол. науки, 1982, № 7, с. 104–110.

Sokolov, L.A., Shoba, S.A., 1982. The impact of freezing and thawing on soil properties in the zones of recreational load. Nauch. Dokl. Vys. Shkoly, biological sciences, 7, 104–110. (in Russian)

Турсина Т.В. Микроморфологическая диагностика криогенных признаков в почвах // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Проблемы почвенного криогенеза". Сыктывкар, Изд-во Коми НЦ УРО РАН, 1985, с. 32–33.

Tursina, T.V., 1985. Micromorphological diagnostics of permafrost features in soils, in: Presentation abstracts of the IV Soviet Union Conference "Problems of soil cryogenesis". NZ URO RAN Publishing House, Syktyvkar, pp. 32–33. (in Russian)

Шумский П.А. Основы структурного ледоведения / П.А. Шумский. М., Изд-во АН СССР, 1955, 491 с.

Shumsky, P.A., 1955. The Foundations of Structural Ice Studies. Publishing House of the Academy of Sciences of USSR, Moscow, 491 pp. (in Russian)

Nadeev, A.N., Chuvilin, E.M., Popova, O.V. Method for examining samples of frozen rocks // U. S. Patent Application Publ., 2014, Publ. Date: Nov. 6, No. US 2014/0328449 A1.

Taina, I.A., Heck, R.J., Elliot, T.R. Application of X-ray computed tomography to soil science: a literature review // Can. J. Soil Sci., 2008, vol. 88, p. 1–19.

Torrance, J.K., Elliot, T., Martin, R. X-ray computed tomography of frozen soil // Cold Regions Sci. and Technol., 2008, vol. 53 (1), p. 75–82.

Shi Jie Chen, Shu Ping Zhao, Wei Ma, Qian Tao Zhu, Li Li Xing. Status and prospects of frozen soil studies using CT technology // Sci. Cold and Arid Regions, 2014, vol. I, iss. 2, p. 107–115.

Поступила в редакцию
17 марта 2016 г.