

К.Н. Абросимов, А.В. Юдина, Д.С. Фомин
Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Kv2@bk.ru

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ АГРЕГАТА ЧЕРНОЗЕМА МИГРАЦИОННО-МИЦЕЛЛЯРНОГО МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Исследование представляет собой методическую работу по отработке и адаптации метода компьютерной томографии к исследованию внутренней структуры и порового пространства агрегатов чернозема.

Ключевые слова: чернозем; агрегат; микроструктура; поровое пространство; микропоры.

Введение

На сегодняшний день расхождения в терминологии, отсутствие единства в понимании, что является объектом гранулометрического и микроагрегатного анализов почв и, как следствие, разнообразие методологических подходов являются «тормозом» для развития представлений о почве и их последующего практического применения. Актуальность данного исследования определяется развитием теоретических основ физики твердой фазы почв и разработкой классификационных текстурных показателей.

Цель работы: на примере агрегата чернозема миграционно-мицеллярного разработать методику исследования внутренней микроструктуры агрегата фракции 7-10 мм и фракций, близких по размерам; адаптировать методику для томографического исследования агрегатов сложной формы.

Объектом исследования определен агрегат гумусового горизонта AU_{rz} чернозема миграционно-мицеллярного, фракция размером 7-10 мм, отобранный в лесополосе (*Quercus robur*) на территории Курского НИИ агропромышленного производства. Агрегат выбран из нескольких десятков других агрегатов той же фракции исходя из правильности формы (примерно одинаковые габариты по длине, ширине и высоте), что наиболее удобно при томографической съемке.

Методы исследования

Для исследования внутренней структуры агрегата почвы задействован метод рентгеновской компьютерной томографии. Параметры съемки и реконструкции выбирались исходя из многолетнего опыта различных исследований почв и почвоподобных тел, результаты которых опубликованы в ряде российских и зарубежных изданий (Skvortsova et al., 2016, 2018; Горбов и др., 2016;

Юдина и др., 2016; Скворцова, 2018). Агрегат чернозема исследовался в воздушно-сухом состоянии на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172. Съемка осуществлялась при следующих настройках:

Source Voltage (kV)=70 (Энергия съемки);
Image Pixel Size (um)=1.48 (Разрешение съемки);
Exposure (ms)=2200 (Выдержка);
Rotation Step (deg)=0.200 (Шаг поворота образца, гр.);
Frame Averaging=ON (3);
Random Movement=ON (10);
Use 360 Rotation=NO (Съемка с поворотом образца на 180 градусов).

Теневые проекции, полученные в процессе съемки, реконструированы на программном обеспечении Bruker NRecon с настройками:

Smoothing=3 (смешивание, коррекция цифрового шума);
Smoothing kernel=0 (Asymmetrical boxcar) (алгоритм фильтра Smoothing, один из трех вариантов);
Ring Artifact Correction=14 (фильтрация специфических артефактов изображения);
Beam Hardening Correction (%)=28 (коррекция градиента от центра к краю);
CS Static Rotation (deg)=0.00 (вращение);
Minimum for CS to Image Conversion=0.015259;
Maximum for CS to Image Conversion=0.091554 (значения шкалы рентгеновской прозрачности).

Реконструкция томографических срезов, как и их последующая обработка для получения объемных показателей, фактически является компьютерной обработкой цифровых изображений (фотографий) в формате BMP по специализированным математическим алгоритмам. Всего для агрегата получено 2666 томографических срезов.

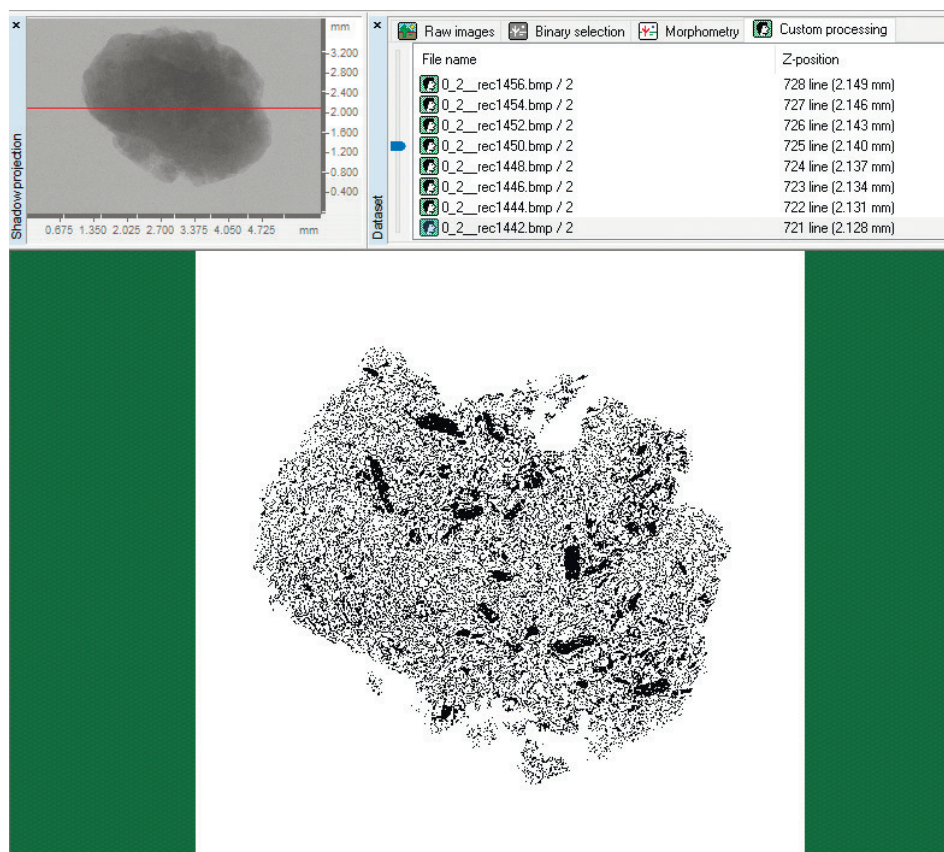


Рис. 1. Поровое пространство в агрегате чернозема на томографическом срезе. Поры черные. Фрагмент программы STAn

Томографический срез, как и цифровая фотография, не имеет толщины, но расстояние есть между двумя соседними срезами и равно разрешению съемки (1.48 мкм). Каждое цифровое изображение состоит из пикселей разных цветов, расположенных в строках и столбцах (фактически, каждая точка имеет свои координаты XY) или же их квадратиков со стороной 1.48 мкм. Толщина стека томографических срезов (ось Z) превращает пиксели в воксели и позволяет из уже готовых срезов построить объемную модель.

Для расчета морфометрических объемных (3d анализ) показателей использовано программ-

ное обеспечение Bruker STAn. Программа позволяет получить ряд объемных (общий объем, объем твердой фазы и порового пространства и др.), количественных (количество пор или объектов твердой фазы), площадных (площади поверхностей). Также возможно получить данные по пористости (общая, открытая и закрытая), связанности порового пространства или выполнить 3d анализ (те же морфометрические объемные показатели для каждого из выявленных структурных элементов).

Расчеты осуществляются только по рентген-контрастным фазам, т.е. по структурам определенного оттенка серого, имеющим четкую границу. К этим структурам применяется бинаризация, по результатам кото-

рой и проводится расчет. В данном исследовании объекта всего два – поры и твердая фаза (все, что отлично от пор – почва, новообразования, растительные остатки и др.)

При работе с агрегатами почвы главная сложность – форма самого агрегата. Получить объемные показатели можно несколькими путями:

1) Сделать расчеты по всему объему агрегата (рис. 1, 2), но при этом потеряются ряд показателей, таких как открытая пористость и связанность порового пространства. Открытая пористость – это поры, выходящие на поверхность

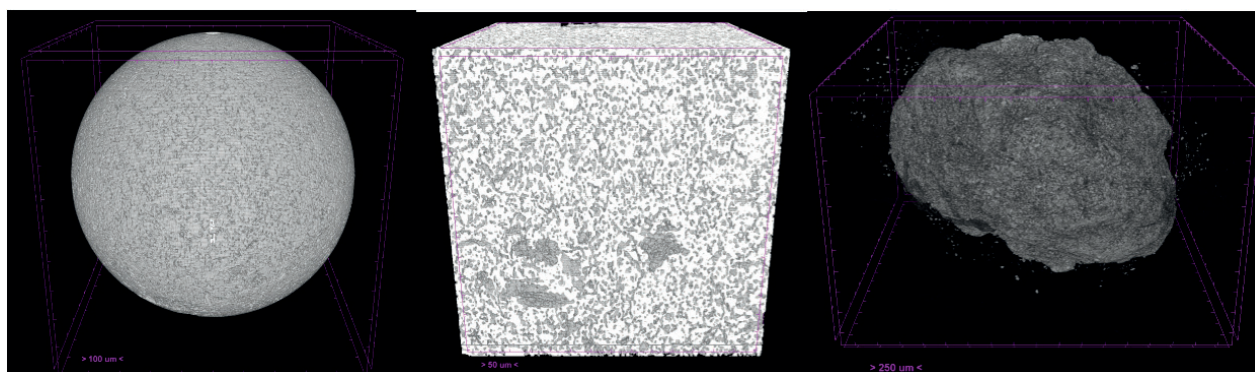


Рис. 2. Форма ROI – сфера и куб (поры серые, выходят на грань области исследования) и агрегат чернозема (справа)

Таблица 1. Объемные морфометрические показатели

3D analysis morphometry	Объемные морфометрические показатели	Объект целиком	Сфера внутри объекта	Куб внутри объекта	Куб внутри объекта под углом 45°	
<i>Number of layers</i>	<i>Количество срезов</i>	шт.	1015	701	501	501
<i>Lower grey threshold</i>	<i>Верхняя граница бинаризации</i>		40	40	40	40
<i>Upper grey threshold</i>	<i>Нижняя граница бинаризации</i>		255	255	255	255
<i>Total VOI volume</i>	<i>Объем VOI/ROI</i>	mm ³	59.98	4.62	3.22	3.22
<i>Object volume</i>	<i>Объем твердой фазы</i>	mm ³	10.24	3.00	2.08	2.12
<i>Percent object volume</i>	<i>% твердой фазы в объеме</i>	%	65	64.92	64.64	65.76
<i>Total VOI surface</i>	<i>Площадь поверхности ROI</i>	mm ²	93.63	14.87	13.07	13.07
<i>Object surface</i>	<i>Площадь поверхности твердой фазы</i>	mm ²	1614.55	530.37	368.83	366.62
<i>Object surface / volume ratio</i>	<i>Твердая фаза: площадь/объем</i>	1/mm	157.65	176.72	177.17	173.11
<i>Structure thickness</i>	<i>Средний размер частицы твердой фазы</i>	mm	0.019	0.017	0.017	0.017
<i>Structure separation</i>	<i>Средний размер поры</i>	mm	-	0.014	0.014	0.013
<i>Number of objects</i>	<i>Кол-во объектов твердой фазы</i>	шт.	76271	13749	9124	6872
<i>Number of objects</i>	<i>Кол-во объектов твердой фазы</i>	1/mm ³	4840.87	2973.93	2832.93	2133.71
<i>Number of closed pores</i>	<i>Кол-во закрытых пор</i>	шт.	105695*	22633	15682	15818
<i>Number of closed pores</i>	<i>Кол-во закрытых пор</i>	1/mm ³	-	4.62	3.22	3.22
<i>Volume of closed pores</i>	<i>Объем закрытых пор</i>	mm ³	-	0.002	0.002	0.002
<i>Surface of closed pores</i>	<i>Площадь поверхности закрытых пор</i>	mm ²	16.29	2.46	1.69	1.74
<i>Closed porosity (percent)</i>	<i>Закрытая пористость</i>	%	-	0.08	0.08	0.08
<i>Volume of open pore space</i>	<i>Объем открытых пор</i>	mm ³	-	1.62	1.14	1.10
<i>Open porosity (percent)</i>	<i>Открытая пористость</i>	%	-	35.03	35.31	34.19
<i>Total volume of pore space</i>	<i>Объем общей пористости</i>	mm ³	5,51	1,62	1,14	1,10
<i>Total porosity (percent)</i>	<i>Общая пористость</i>	%	35	35,08	35,36	34,24

*При данном расчете все поры считаются как закрытые

исследуемого объема. Для расчета по всему объему придется выполнить два расчета: только по твердой фазе и только по порам. Но в последнем случае придется отсечь самую крупную пору, которой будет воздух вокруг агрегата. Выполнить эту фильтрацию допустимо только в 2d режиме (на срезах), но и в этом случае небольшая часть порового пространства будет удалена. Соотношение объем пор / объем твердой фазы так же будет немного нарушено.

2) Расчеты по выбранной области (ROI) исследования внутри структуры (рис. 2) агрегата, не выходя за границы его поверхности. Чаще всего

при этом используется форма шара (сфера) или куба. Главный недостаток этого способа – снижение точности данных, т.к. чем сложнее форма агрегата, тем сложнее внутрь объема вписать сферу или куб. Слишком маленький объем внутренней структуры будет задействован в расчетах. В этом случае возможно посчитать открытую и закрытую пористость, но невозможно общую площадь поверхности агрегата.

В качестве контроля результата был применен еще один вариант: расчет по выбранной области с предварительным поворотом стека данных на 45 градусов. В этом случае программа перестраивает

Таблица 2. Агрегатный состав, % фракции от общего объема

Размерность частиц и микро-агрегатов твердой фазы	Объект целиком	Сфера внутри объекта	Куб внутри объекта	Куб внутри объекта под углом 45°	Усредненный показатель по четырем расчетам
Диапазон размеров, мм	Объемная доля каждой фракции в общем объеме твердой фазы, %				
0.00295 - <0.00885	3.41	4.64	4.59	4.10	4.18
0.00885 - <0.01476	27.15	34.12	34.05	32.88	32.05
0.01476 - <0.02066	35.09	36.78	36.83	37.42	36.53
0.02066 - <0.02656	24.77	19.11	19.12	20.01	20.75
0.02656 - <0.03247	7.38	4.25	4.31	4.45	5.10
0.03247 - <0.03837	1.60	0.82	0.80	0.85	1.01
0.03837 - <0.04427	0.41	0.23	0.24	0.22	0.28
0.04427 - <0.05018	0.08	0.04	0.04	0.05	0.05
0.05018 - <0.05608	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
0.05608 - <0.06198	0.02				
0.06198 - <0.06789	0.01				
0.06789 - <0.07379	0.01				
0.07379 - <0.07969	0.01				
0.07969 - <0.08560	0.01				
0.08560 - <0.09150	0.01				
0.09150 - <0.09740	0.00				
0.09740 - <0.10331	0.00				
0.10331 - <0.10921	0.01				

структуру «кубиков» – вокселей, и в область ROI куба могут попасть элементы, бывшие за границами в изначальном варианте. Также при расчетах необходимо учитывать размеры области ROI.

Некоторые исследователи считают допустимым использование куба со стороной 300 пикселей (301 срез) (Application..., 2014), что на практике оказывается слишком мало для детализированной структуры с элементами разного размера. При расчетах использована область ROI куб (500×500×500), что соответствует грани 1.7 мм, и сфера с диаметром 700 пикселей (2.1 мм).

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты демонстрируют высокую точность примененного метода для расчетов в пределах однородной структуры агрегата чернозема. В таблице 1 представлены данные расчетов объемных показателей. Результаты расчетов по внутренней зоне ROI очень близки друг к другу несмотря на незначительное совмещение этих зона расчета внутри структуры агрегата (не более 30% общих структурных элементов). Разброс данных по пористости составляет ±0.7% от среднего значения. Низкая точность отмечена только в количественном анализе структурных элементов и закрытых пор. Расчеты по всему объему агрегата местами незначительно отличаются от

расчетов по ROI – по параметрам Object surface / Volume ratio, Structure thickness, но в целом расчет по ROI допустимо использовать как упрощенную версию расчета по всему объему. Тем более, этот способ серьезно экономит время, необходимое на расчет всех показателей – 9.5 часов на расчеты по полному объему и 5-10 минут по ROI.

Помимо традиционных объемных показателей в бинаризованных изображениях можно рассчитать более подробно параметры Structure thickness (табл. 2) и Structure separation (табл. 3). Фактически это даст ответ на вопрос: какая фракция агрегатов или зерен в изучаемом агрегате чернозема преобладает (какого она размера и сколько процентов от общего объема твердой фазы занято именно этими частицами).

Обычно в агрегатах доминируют частицы размером 8–20 мкм. Выбранное разрешение съемки позволяет их уверенно детектировать. В расчетах по ROI отличия минимальны, но при расчете по полному объему обнаружили более крупные частицы размером до 0.1 мм, несколько изменившие общую картину. При расчетах по фрагменту структуры такие частицы обычно или не попадают в ROI или попадают и вносят очень сильные искажения в расчеты.

По аналогии с агрегатным составом можно так же рассчитать размерность пор. Программой STan это делается по тем же алгоритмам, но для

Таблица 3. Размеры пор и их доля в поровом пространстве агрегата

Размерность пор	Объект целиком	Сфера внутри объекта	Куб внутри объекта	Куб внутри объекта под углом 45°	Усредненный показатель по четырем расчетам
Диапазон размеров, мм	Объемная доля каждой фракции в общем объеме твердой фазы, %				
0.00295 - <0.00885	23.08	28.54	28.00	29.19	27.20
0.00885 - <0.01476	36.37	48.34	47.72	48.74	45.29
0.01476 - <0.02066	7.61	8.92	9.06	8.42	8.50
0.02066 - <0.02656	5.42	5.64	5.86	5.21	5.53
0.02656 - <0.03247	3.88	3.84	4.02	3.69	3.86
0.03247 - <0.03837	2.36	2.05	2.21	2.13	2.19
0.03837 - <0.04427	1.94	1.26	1.43	1.42	1.51
0.04427 - <0.05018	1.44	0.56	0.61	0.62	0.81
0.05018 - <0.05608	1.18	0.19	0.33	0.22	0.48
0.05608 - <0.06198	1.16	0.18	0.27	0.12	0.43
0.06198 - <0.06789	1.22	0.09	0.19	0.07	0.39
0.06789 - <0.07379	1.13	0.08	0.17	0.04	0.35
0.07379 - <0.07969	1.21	0.06	0.08	0.02	0.34
0.07969 - <0.08560	1.23	0.05	0.05	0.08	0.35
0.08560 - <0.09150	1.43	0.03		0.04	0.50
0.09150 - <0.09740	1.52	0.02			0.77
0.09740 - <0.10331	1.67	0.04			0.86
0.10331 - <0.10921	1.77	0.02			0.89
0.10921 - <0.11511	1.98	0.03			1.01
0.11511 – (наиболее крупная пора)	2.14	0.06			1.10

другого объекта. Агрегатный состав – это белые воксели в бинаризованном изображении, а поры – черные воксели (рис. 1). При совпадении разрешения программа автоматически выставит те же градации по размерам, что и для агрегатного состава, что даст возможность выявить преобладающие размеры пор. Следует отметить что вариантов порового пространства довольно много, и далеко не во всех вариантах этот анализ будет достоверно работать. Например, в везикулярных порах в корковом горизонте пустынных почв расчеты получаются одними из самых точных, но в текстурных горизонтах или горизонтах, где поры представлены на 90% порами-каналами (сетью корней реликтовой или современной) этот метод выдаст неоднозначный результат. В агрегате чернозема поровое пространство в основном представлено тонкими внутриагрегатными порами или пороупаковками, что хорошо видно на фрагменте объемной модели (рис. 2).

По расчетам ROI также выделяется высокое совпадение результатов. Расчет по всему объему в данном случае не прямой, а через приближенный объем порового пространства агрегата

(условно принято, как 35% внутреннего объема).

В агрегатах чернозема иногда встречаются поры, значительно крупнее самых больших частиц твердой фазы. Фактически, один агрегат может оказаться сростком из нескольких более мелких, разделенных порами. Такие поры нашлись и в исследуемом агрегате, что заметно повлияло на расчеты (табл. 3).

Выводы

1. Расчеты по ROI вне зависимости от формы (сфера или куб) наиболее точно передают представление о микроструктуре объекта исследования и сразу выявляют отличия на структурном уровне 10-30 мкм. Объекты крупнее 100 мкм вносят помехи и искажения в расчеты по ROI.

2. Ввиду своей продолжительности расчеты по всей структуре агрегата необходимы только в исключительных случаях при решении специфических задач.

3. Возможность обнаружения различий в микроструктуре с низкой погрешностью измерений открывает простор для выявления микроструктурных изменений в почве с различной степенью

обработки, уплотнения, химического загрязнения и др.

4. Размеры зоны ROI (500-700 точек) позволяют таким же способом исследовать агрегаты из более мелких фракций – до 1 мм, в т.ч. и при более высоком разрешении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-04-00949, 18-34-00825 с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Функции и свойства почв и почвенного покрова» Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Список литературы

1. Горбов С.Н., Безуглова О.С., Абросимов К.Н., Скворцова Е.Б., Тагиведиев С.С., Морозов И.В. Физические свойства почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2016. №8. С. 964–974.

2. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Герке К.М., Корост Д.В., Дембовецкий А.В., Иванов А.Л. Микротомографический метод изучения и оценки почвенной структуры // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири / Изучение и мониторинг процессов в почвах и водных объектах. М.: ФГБНУ ВНИИ агрохимии. 2018. Т. 2. С. 84–89.

3. Юдина А.В., Фомин Д.С., Абросимов К.Н., Романенко К.А. Микроструктура гумусового горизонта чернозема типичного в ряду пашня-лесополоса-пар // Морфология почв от макро- до субмикроразрешения / Матер. Всеросс. конф. с меж-

дунар. участием. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. С. 364–367.

4. Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration, Progress in Soil Science / W.G. Teixeira et al. (eds.). Switzerland: Springer International Publishing, 2014. 269 p.

5. Skvortsova E.B., Shein E.V., Abrosimov K.N., Romanenko K.A., Yudina A.V., Klyueva V.V., Khaidapova D.D., Rogov V.V. / The impact of multiple freeze-thaw cycles on the microstructure of aggregates from a soddy-podzolic soil: A microtomographic analysis. // Eurasian Soil Science. 2018. V. 51, №2. P. 190–198.

6. Skvortsova E.B., Rozhkov V.A., Abrosimov K.N., Romanenko K.A., Khokhlov S.F., Khaidapova D.D., Klueva V.V., Yudina A.V. Microtomographic analysis of pore space in a virgin soddy-podzolic soil // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49, №11. P. 1250–1258.

K.N. Abrosimov, A.V. Yudina, D.S. Fomin. **Study of aggregate microstructure of migration-micellar chernozem by the method of non-destructive testing.**

The study is a methodical work on testing and adapting of the computed tomography method to the study of the internal structure and pore space of chernozem aggregates.

Keywords: chernozem; aggregate; microstructure; pore space; micropores.

Информация об авторах

Абросимов Константин Николаевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 119017, г. Москва, Пыжевский пер. 7, стр. 2, E-mail: abrosimov_kn@esoil.ru.

Юдина Анна Викторовна, научный сотрудник, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 119017, г. Москва, Пыжевский пер. 7, стр. 2, E-mail: anna.v.yudina@gmail.com.

Фомин Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 119017, г. Москва, Пыжевский пер. 7, стр. 2, E-mail: dsfomin92@gmail.com.

Information about the authors

Konstantin N. Abrosimov, Senior Researcher, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7, str. 2, Pijevskiy per., Moscow, Russia, 119017, E-mail: abrosimov_kn@esoil.ru

Anna V. Yudina, Researcher, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7, str. 2, Pijevskiy per., Moscow, Russia, 119017, E-mail: anna.v.yudina@gmail.com.

Dmitriy S. Fomin, Junior Researcher, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7, str. 2, Pijevskiy per., Moscow, Russia, 119017, E-mail: dsfomin92@gmail.com.