

# ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИЙСКОМ ПОЧВОВЕДЕНИИ



Иванов Андрей Леонидович<sup>1</sup>

Скворцова Елена Борисовна<sup>1</sup>

Корост Дмитрий Вячеславович<sup>2,1</sup>

Герке Кирилл Миронович<sup>3,1</sup>

Абросимов Константин Николаевич<sup>1</sup>

Колокольцев Владимир Владиславович<sup>2,1</sup>

1 – Почвенный институт им. В.В. Докучаева, РАСХН, Москва;

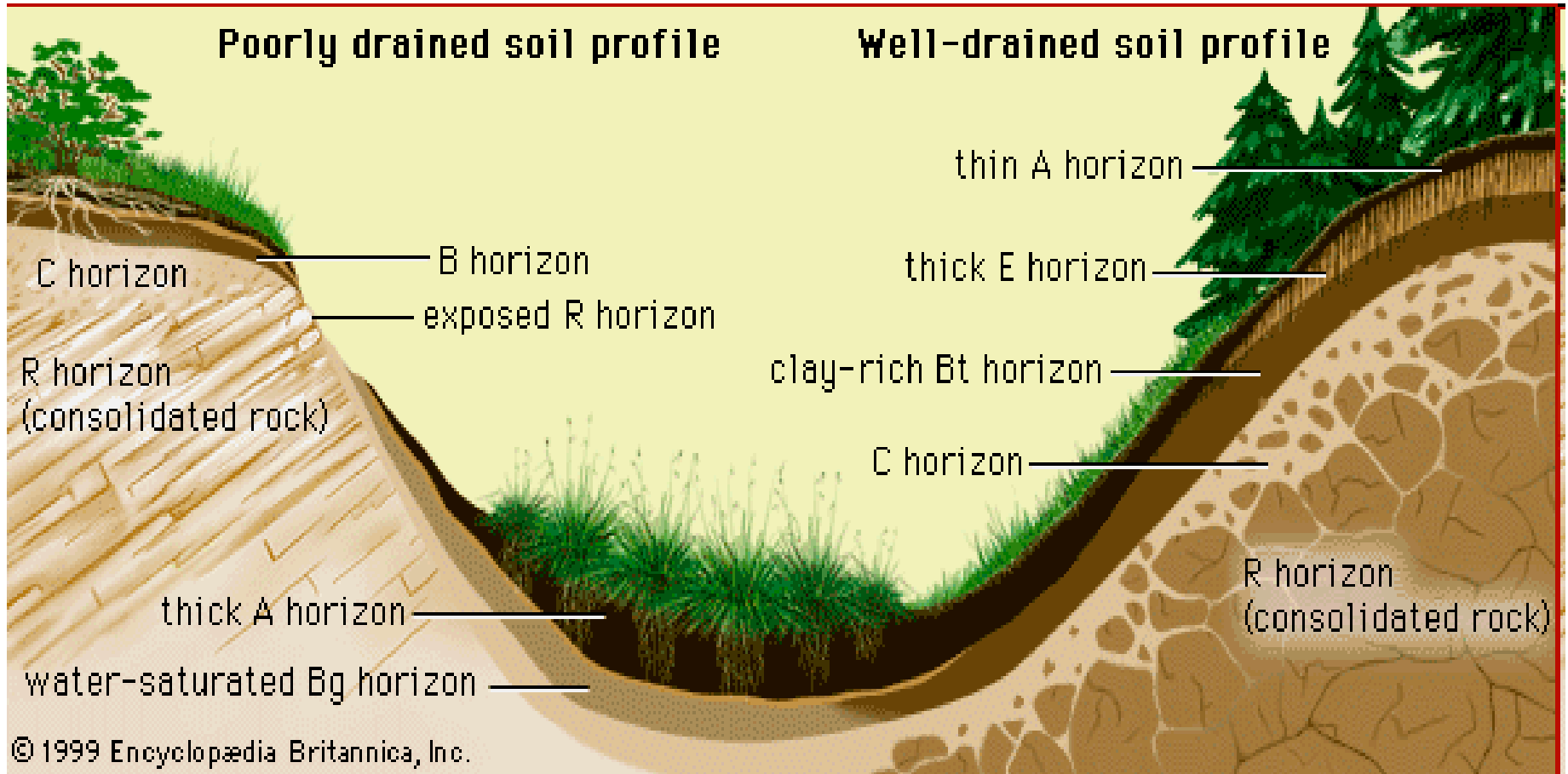
2 – МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;

3 – Институт динамики геосфер РАН, Москва

Казань, 2012 г.

- 1. Специфика почвы  
как томографического объекта**
- 2. Коротко о зарубежных  
микро-КТ почвенных исследованиях.**
- 3. Некоторые результаты, полученные  
авторами доклада**
- 4. Перспективы, задачи, планы...**

## Poorly drained soil profile

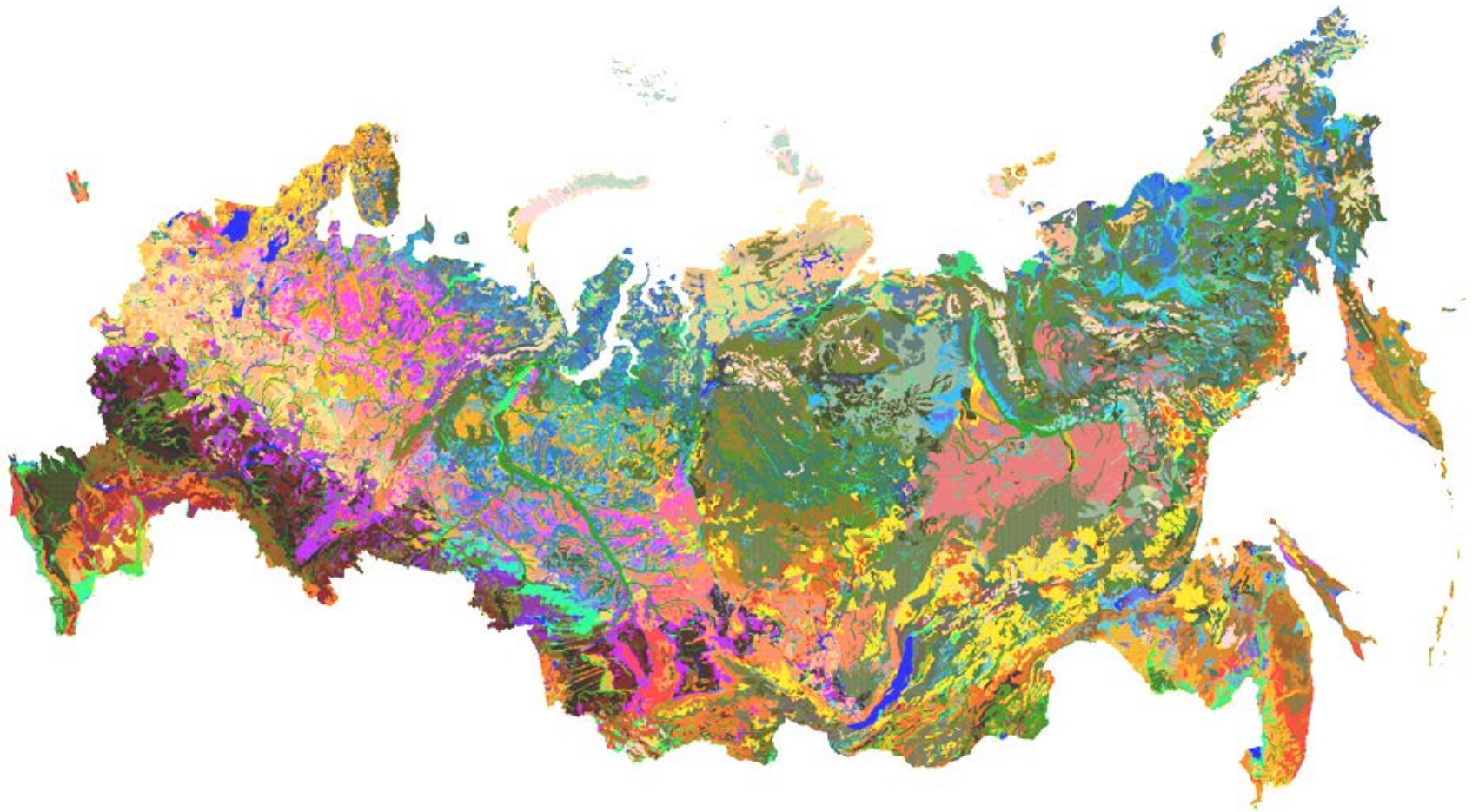


## Well-drained soil profile

**Естественное формирование почвы происходит в результате взаимодействия живых организмов и геологических пород в условиях местного климата и рельефа в течение длительного времени**

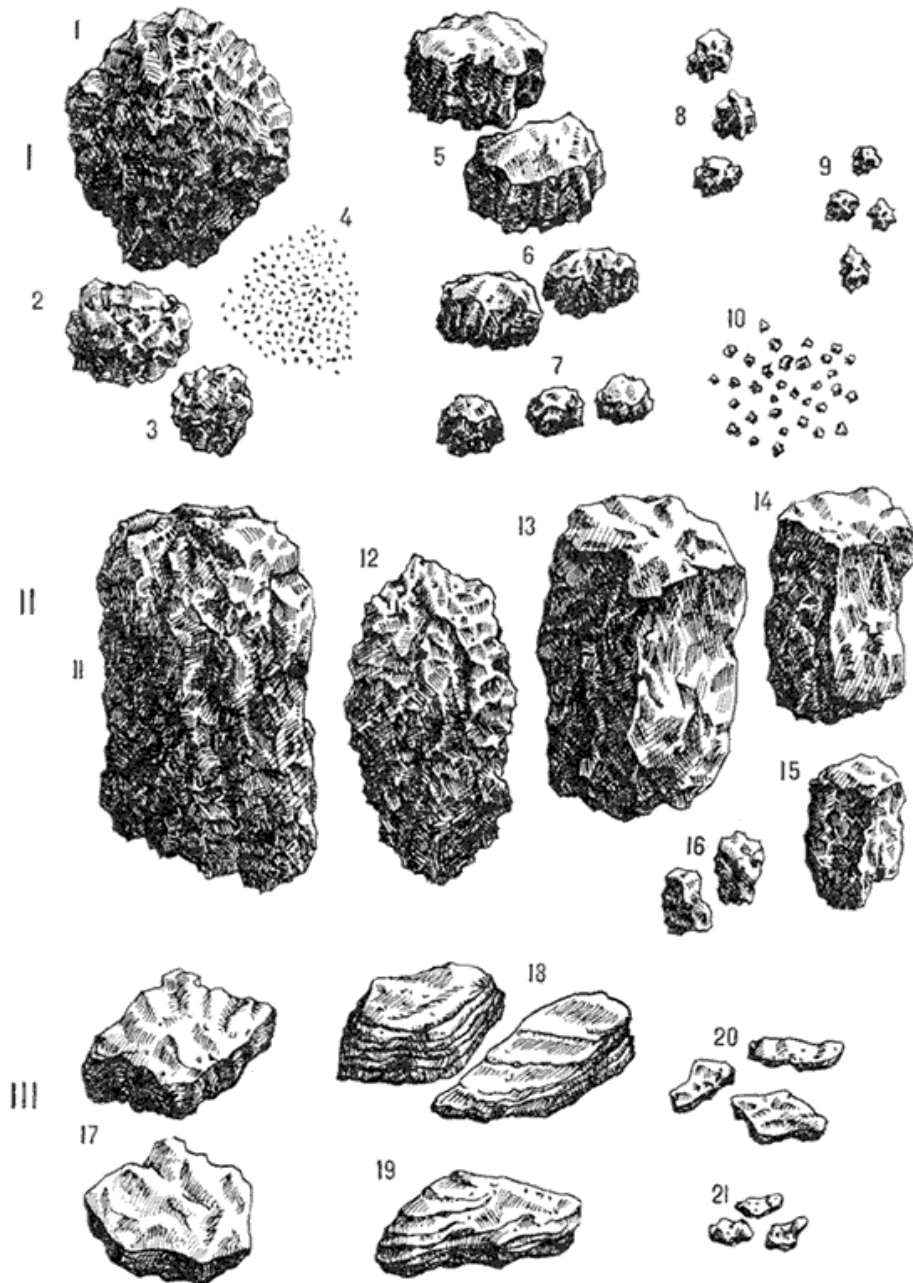
**Организмы, порода, климат, рельеф, время  
вносят свой вклад в пространственную организацию почв и почвенного покрова**

# Почвенная карта России



**М 1:2 500 000**

# Типичные структурные элементы почв (С. А. Захаров, 1924)



## I тип:

1) крупнокомковатая,  
2) среднекомковатая,  
3) мелкокомковатая, 4) пылеватая, 5)  
крупноореховатая,  
6) ореховатая, 7) мелкоореховатая, 8)  
крупнозернистая, 9) зернистая, 10)  
порошистая.

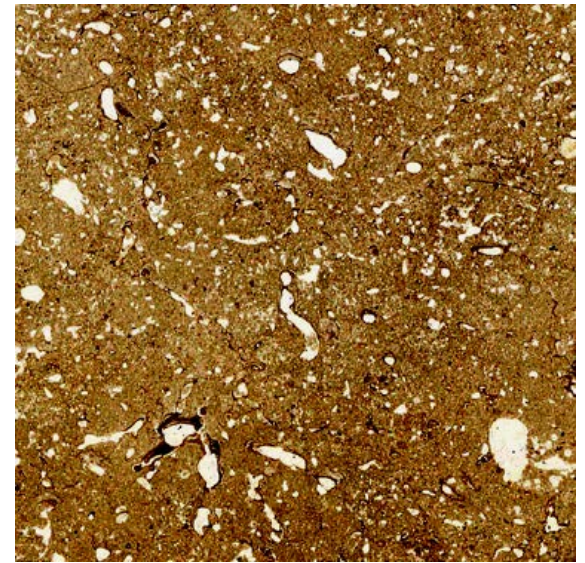
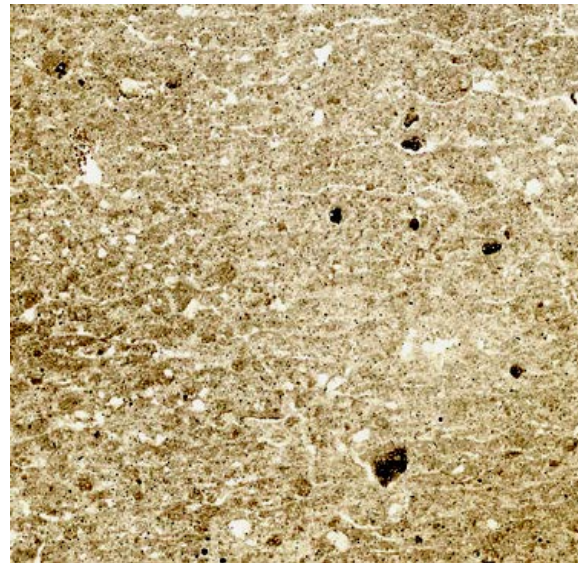
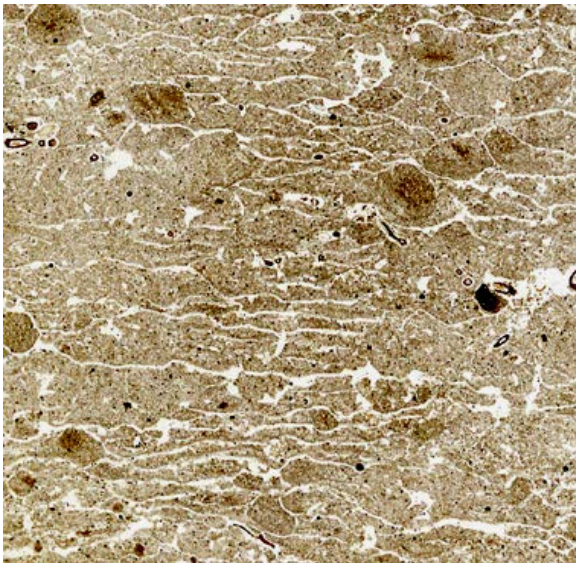
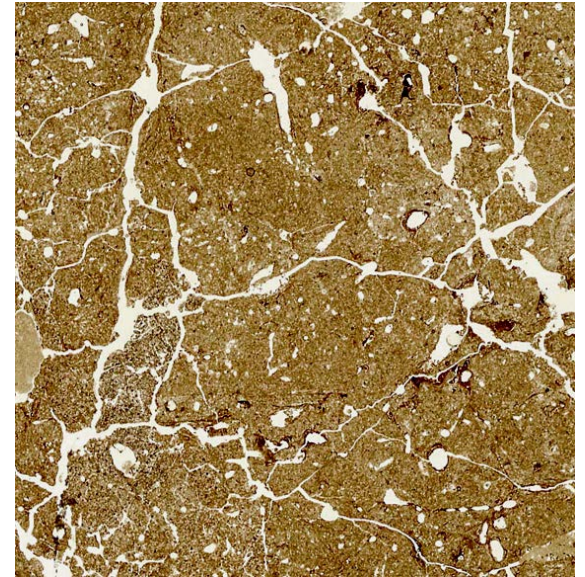
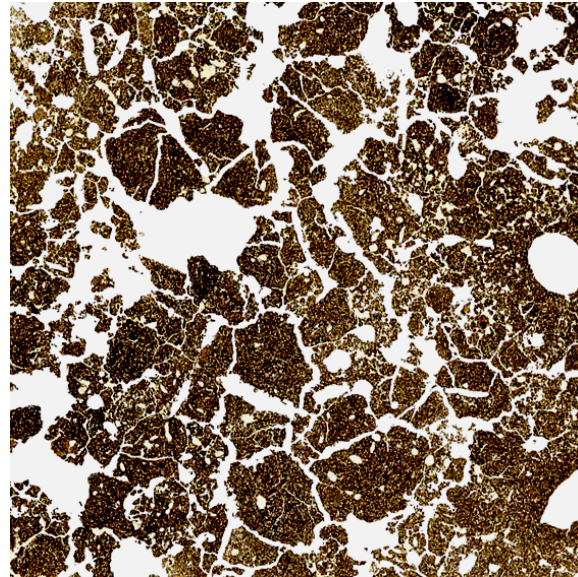
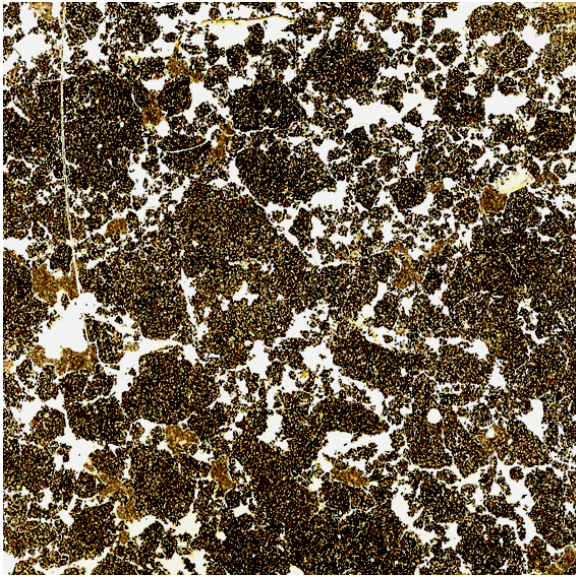
## II тип:

11) столбчатая,  
12) столбовидная,  
13) крупнопризматическая,  
14) призматическая,  
15) мелкопризматическая,  
16) тонкопризматическая.

## III тип:

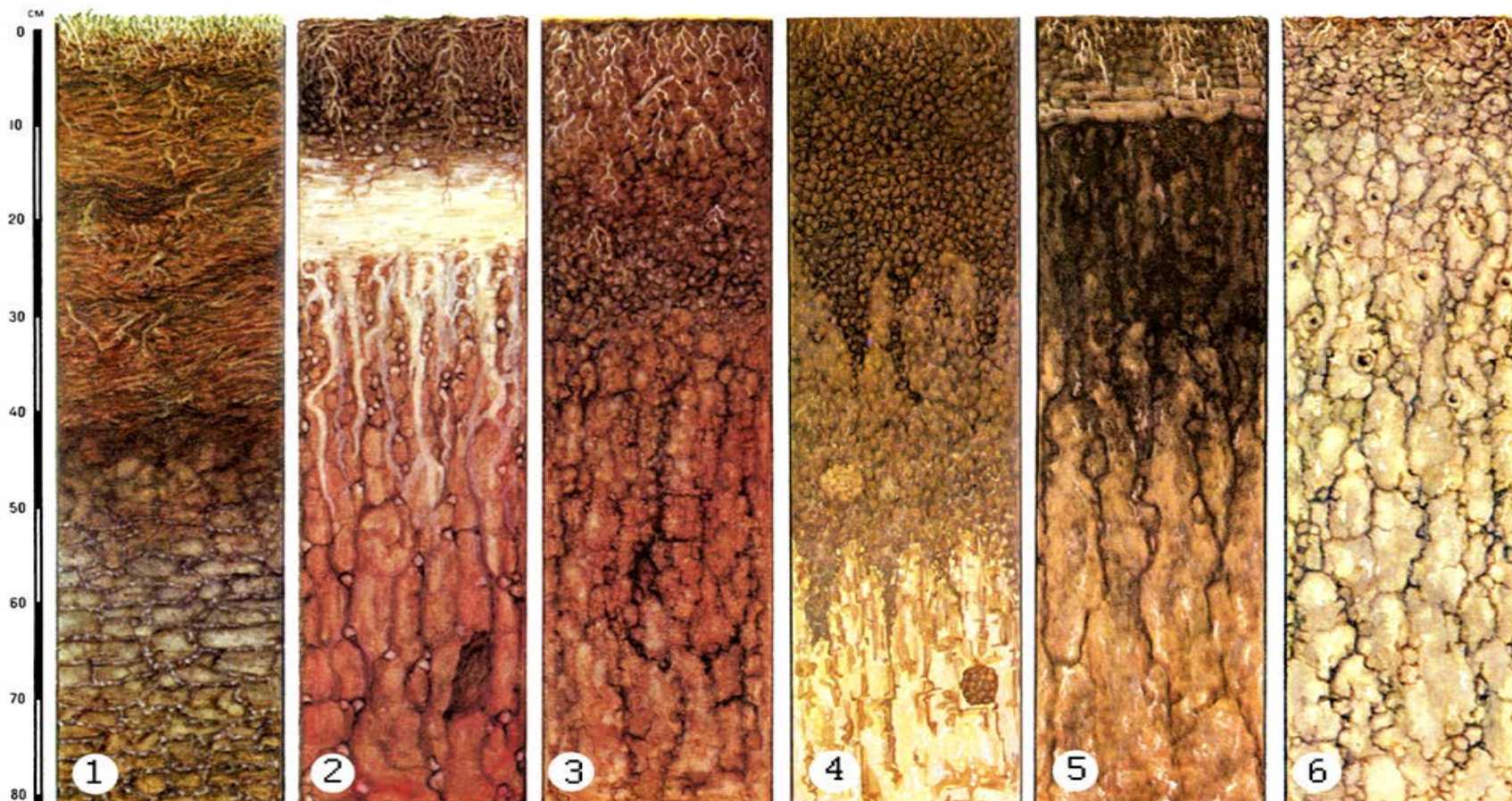
17) сланцевая,  
18) пластинчатая,  
19) листоватая,  
20) грубочешуйчатая,  
21) мелкочешуйчатая

# Примеры микростроения суглинистых почв Русской равнины

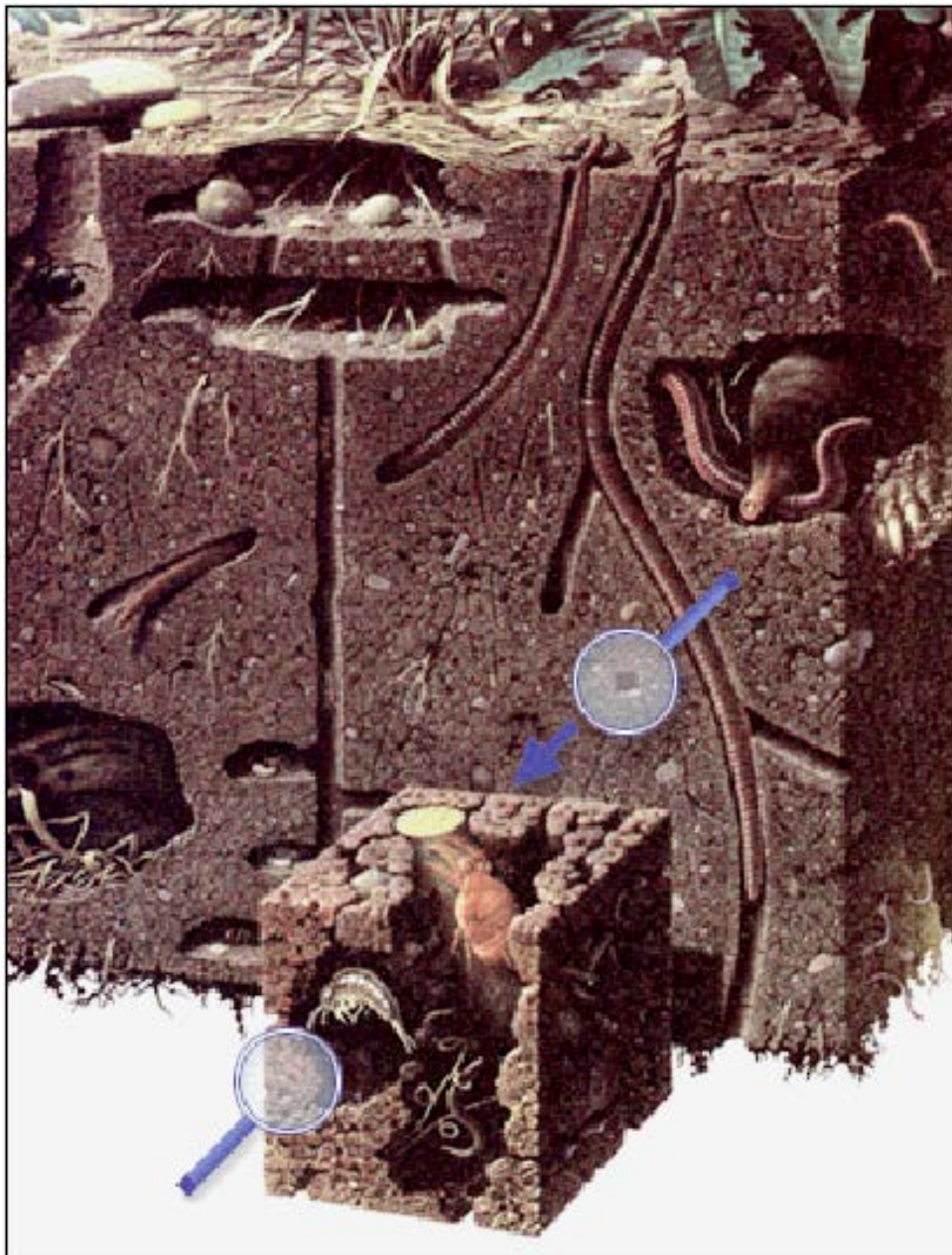


1 см

---



**Схематические изображения профилей почв: 1 – тундровая болотная; 2 – дерново-подзолистая; 3 – серая лесная; 4 – чернозем типичный; 5 – солонец черноземно-луговой; 6 – серозем (Почвы СССР, 1979 г.).**

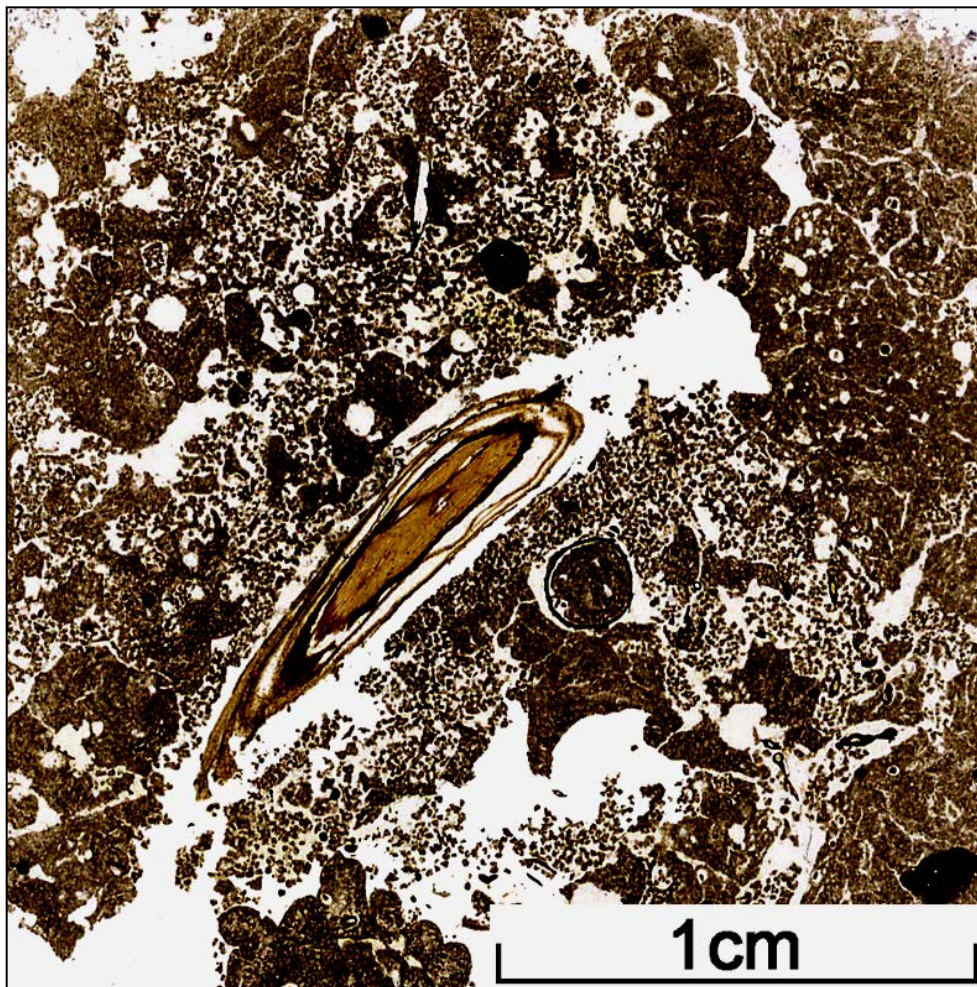


**В почвенной толще  
развиваются корневые  
системы растений,**

**существуют  
бактериальные и грибные  
сообщества,**

**проживают почвенные  
беспозвоночные и мелкие  
позвоночные животные.**





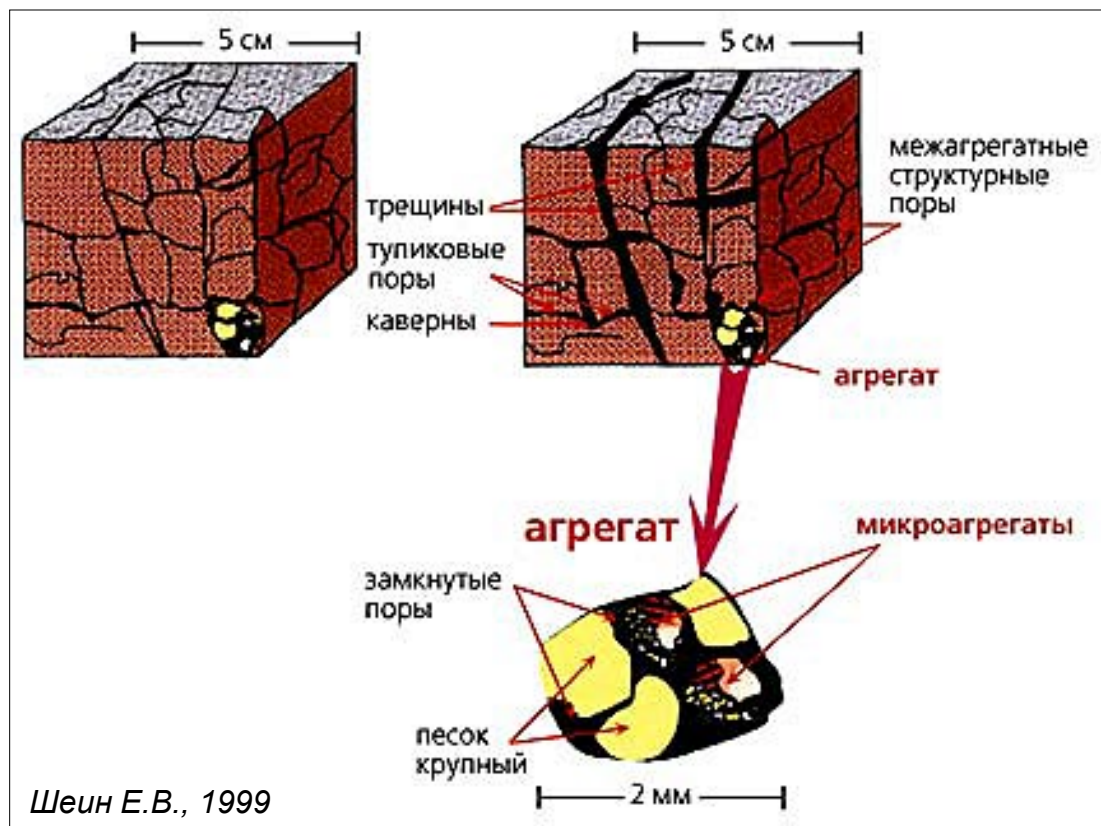
**Население почвы выполняет многочисленные структурные функции:**

**способствует организации и закреплению почвенных агрегатов,**

**создает биогенные каналы и камеры,**

**формирует специфические биогенные структурные отдельности (в виде экскрементов, растительных и животных остатков)**

**Микростроение дерново-подзолистой почвы под сосновым лесом на старой залежи (6-11 см)**

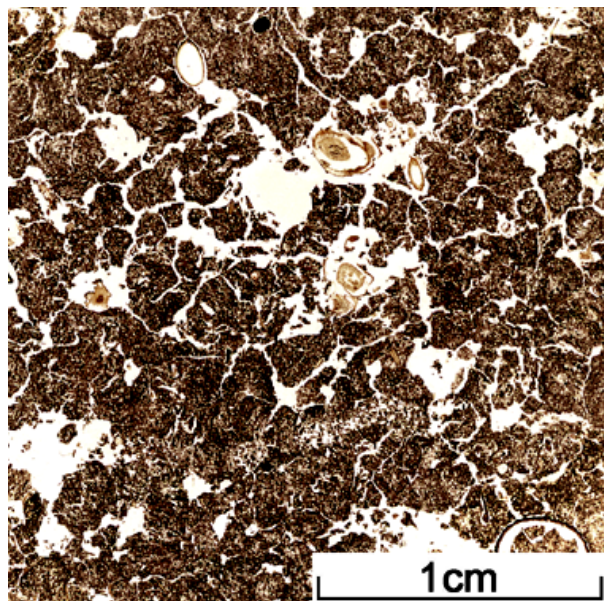


**Будучи пористым полидисперсным телом, почва выполняет гидрологические и газовые функции**

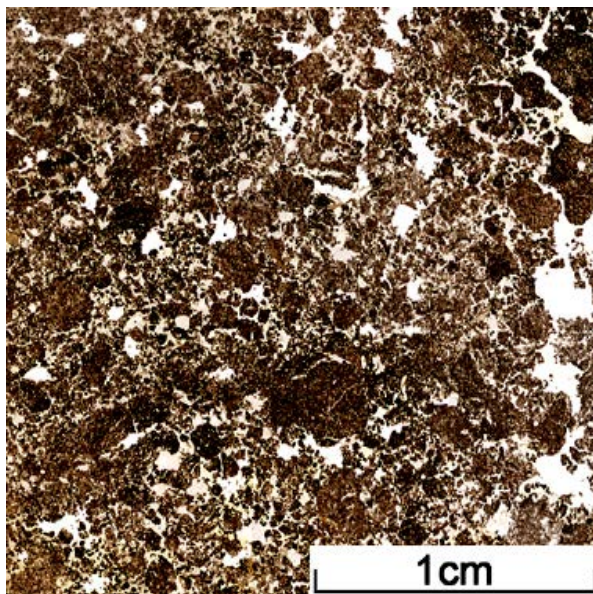
**В этой области томографические исследования находят самое широкое применение.**

**В частности, перспективна визуализация и моделирование проточного и застойного порового пространства почв и грунтов.**

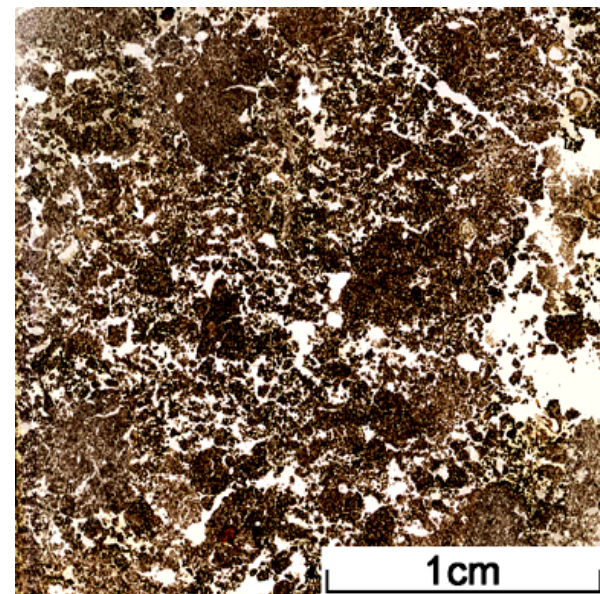
# Изменение агрегатов при распашке целины (чернозем типичный)



**Целина**

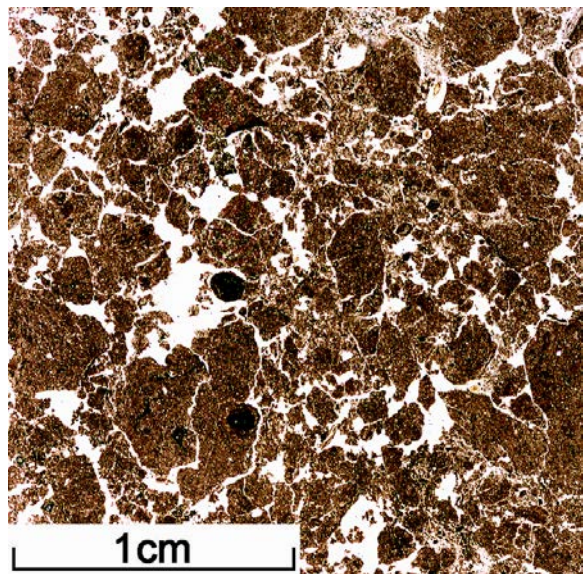


**Пашня 3 года**

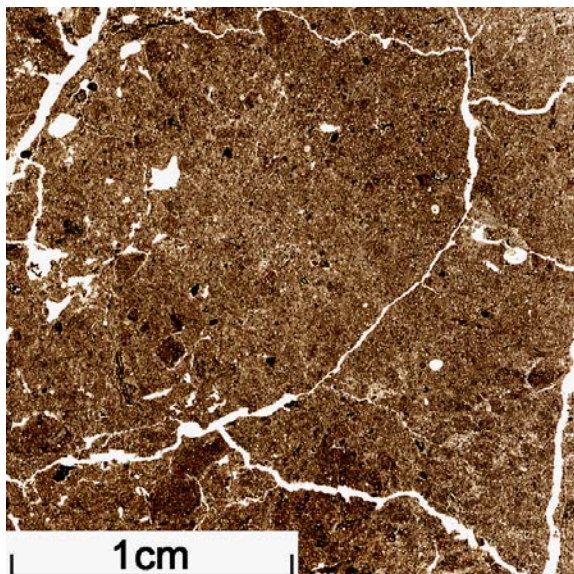


**Пашня 90 лет**

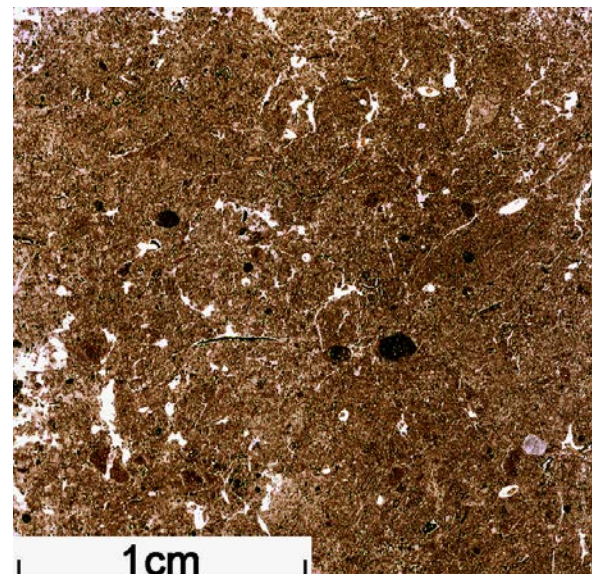
# Примеры структурного состояния пахотных горизонтов суглинистых почв Русской равнины



**Комковатое**



**Массивно-трещиноватое**



**Массивное**



## Динамическая нагрузка 150 кП

Трактор МТЗ-82  
масса 4 тонны  
2-кратный проход по колее



## Динамическая нагрузка 205 кП

Трактор К-701  
масса 13 тонн  
4-кратный проход по колее

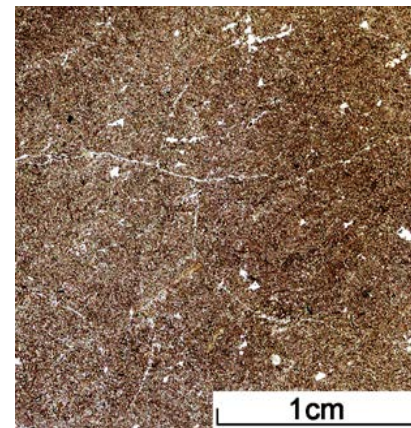
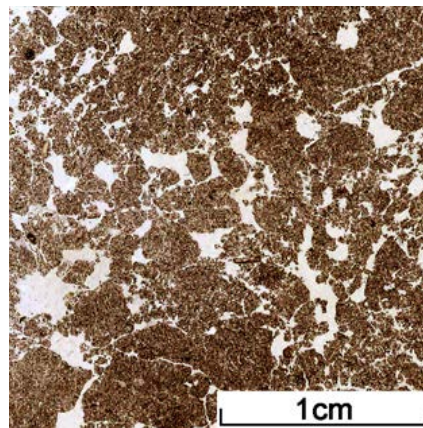
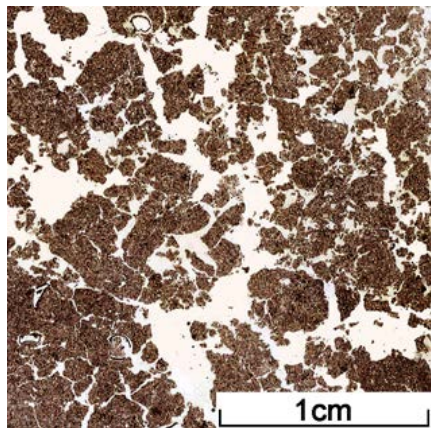
**Май**

**Контроль**

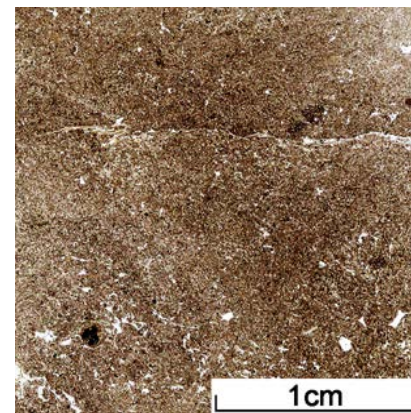
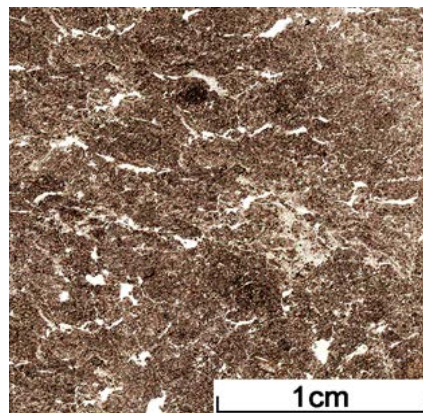
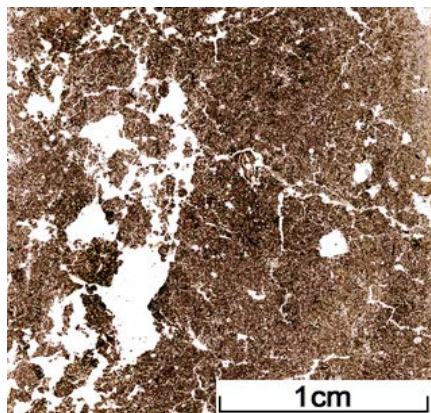
**150 кП**

**205 кП**

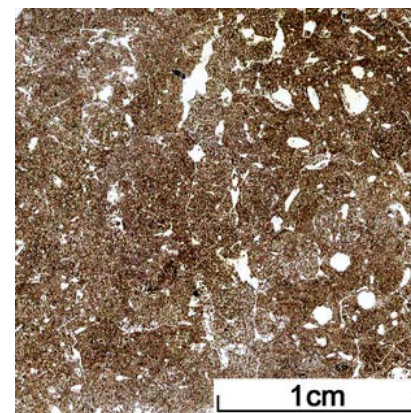
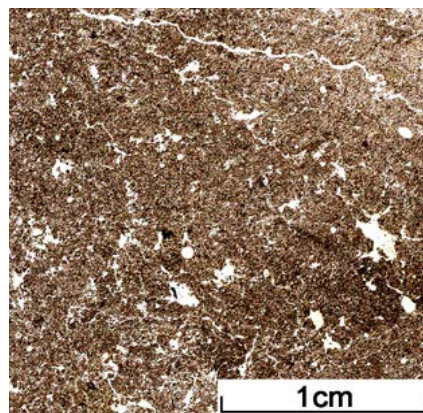
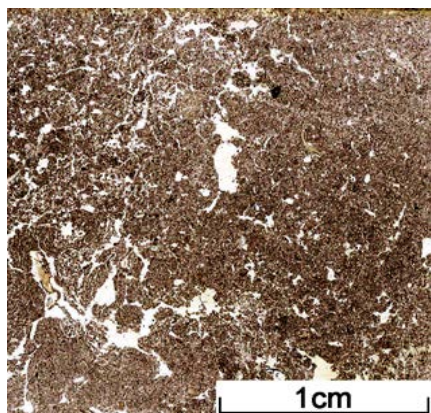
**5-10 см**



**15-20 см**



**25-30 см**



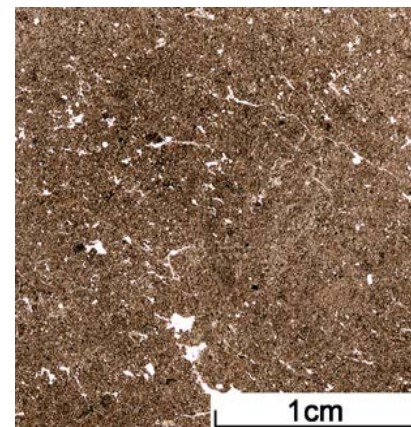
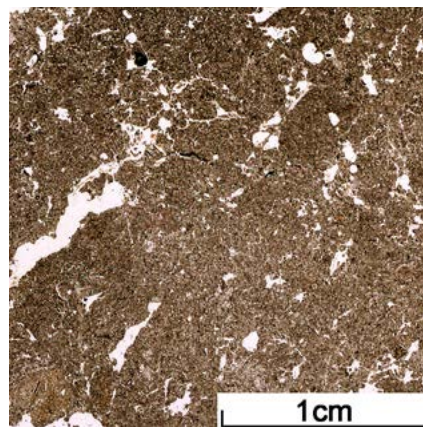
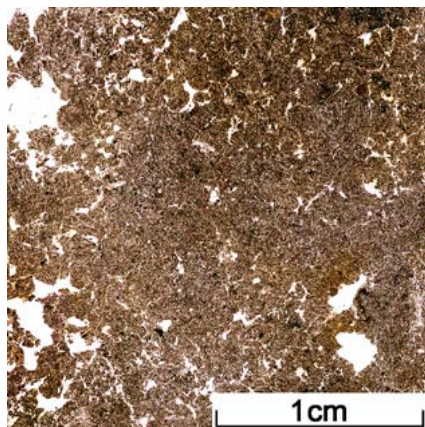
**Август**

**Контроль**

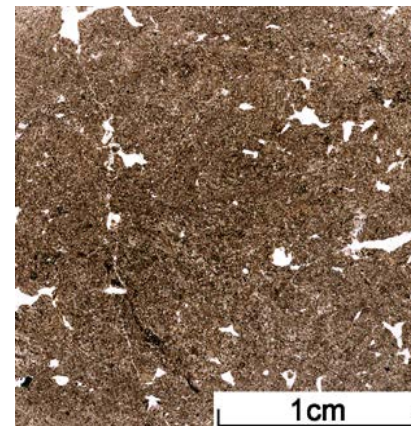
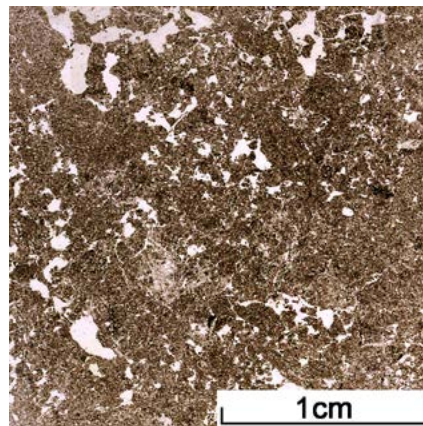
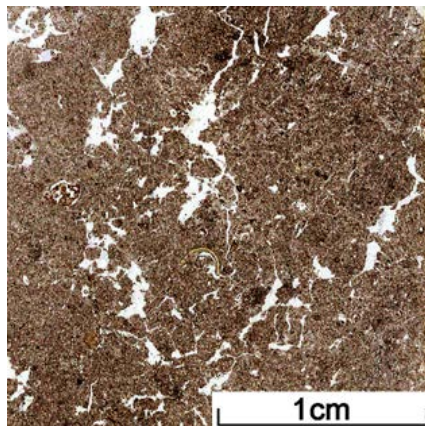
**150 кП**

**205 кП**

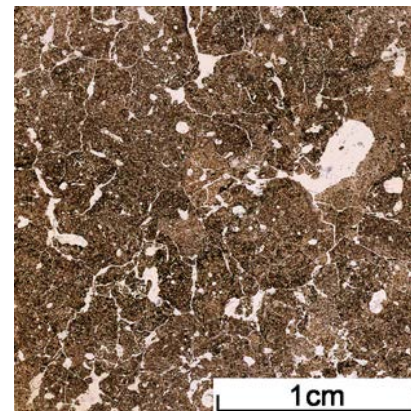
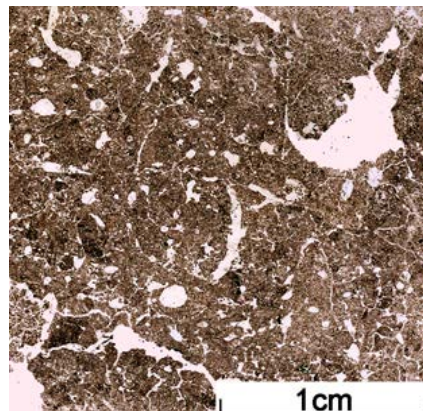
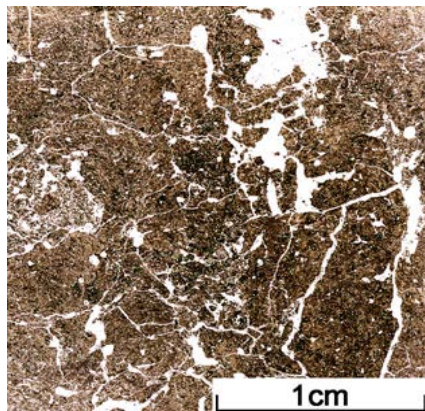
**5-10 см**



**15-20 см**



**25-30 см**

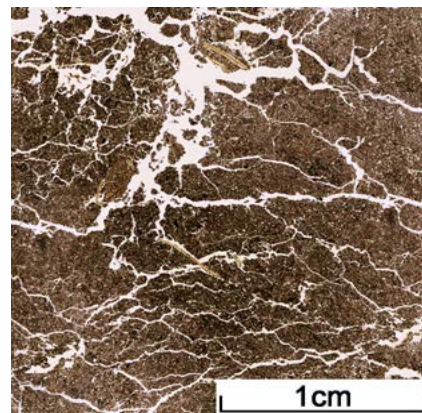
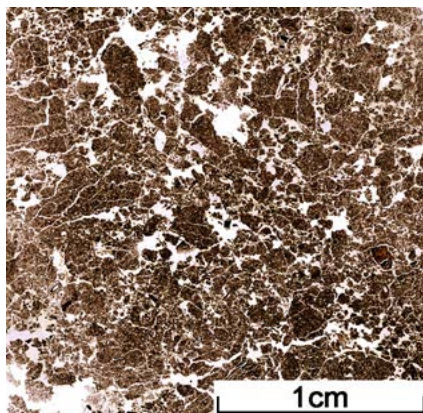


**Январь**

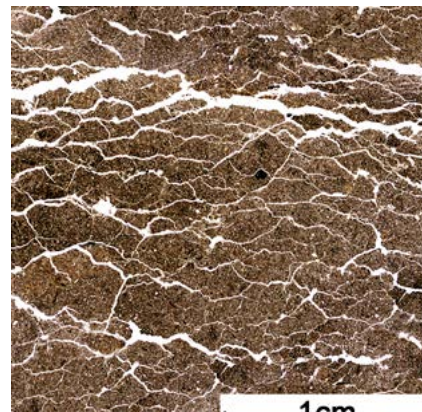
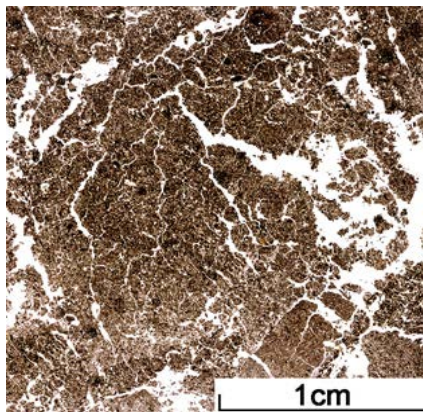
**Контроль**

**205 кП**

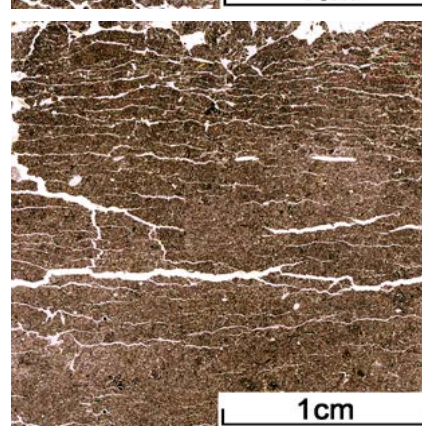
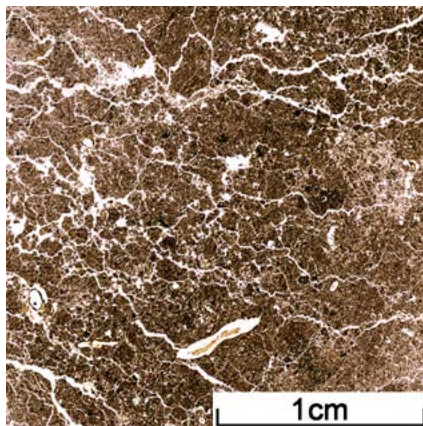
**0-5 см**



**5-10 см**



**10-20 см**



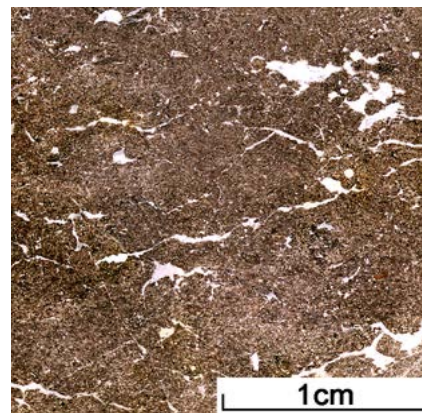
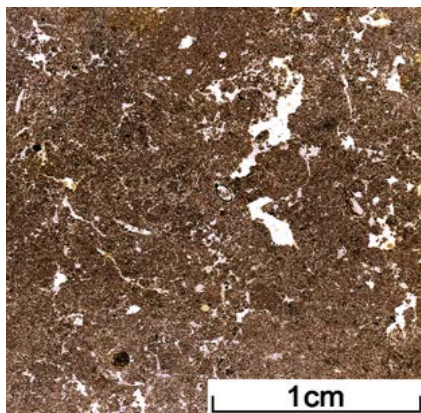


**Апрель**

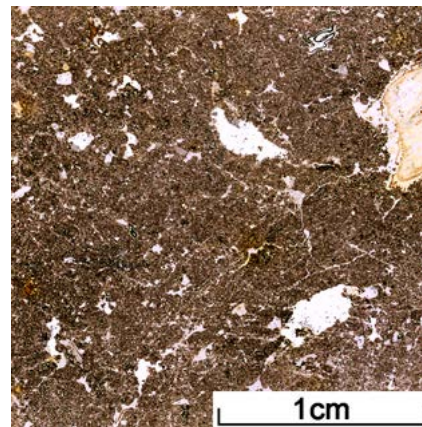
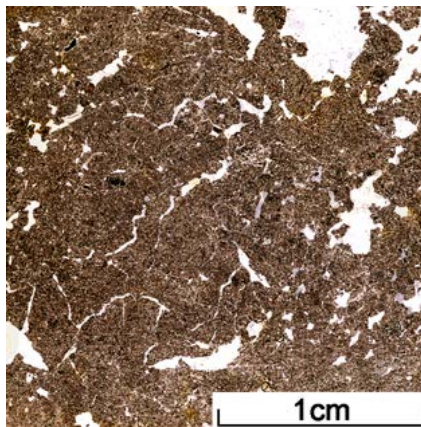
**Контроль**

**205 кП**

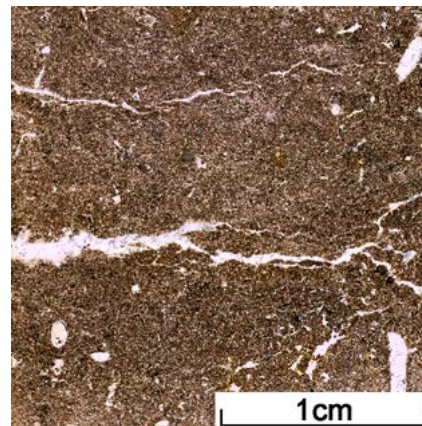
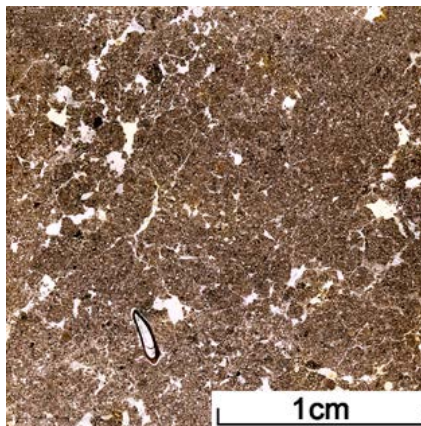
**0-5 см**



**5-10 см**



**10-20 см**



# **Письмо Роскомзема от 29.07.1994 N 3-14-2/1139**

## **О Методике определения размеров ущерба от деградации почв и земель**

(Текст документа по состоянию на июль 2011 года)

Таблица 1

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВ И ЗЕМЕЛЬ**

#### **Индикаторные показатели:**

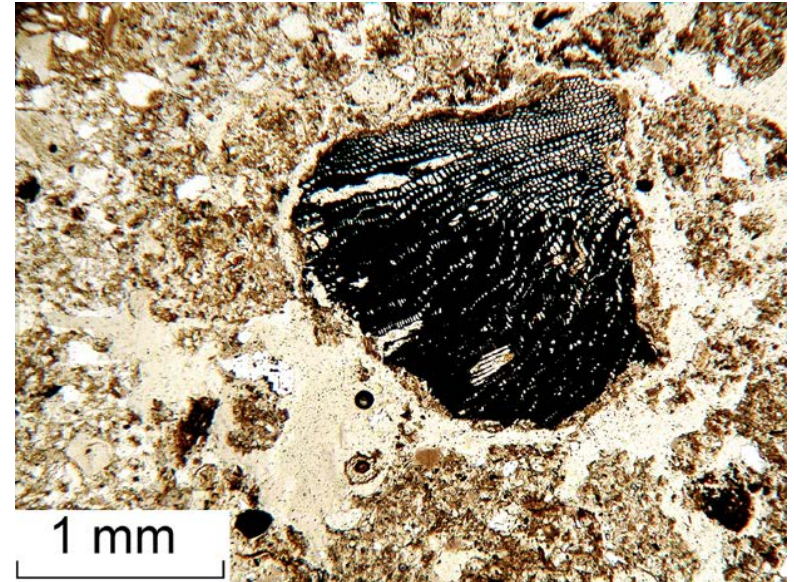
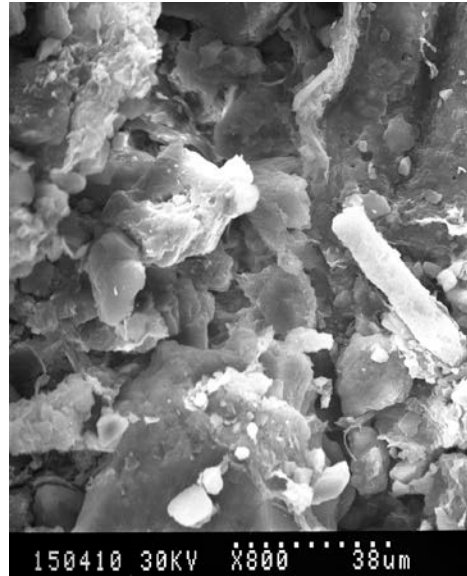
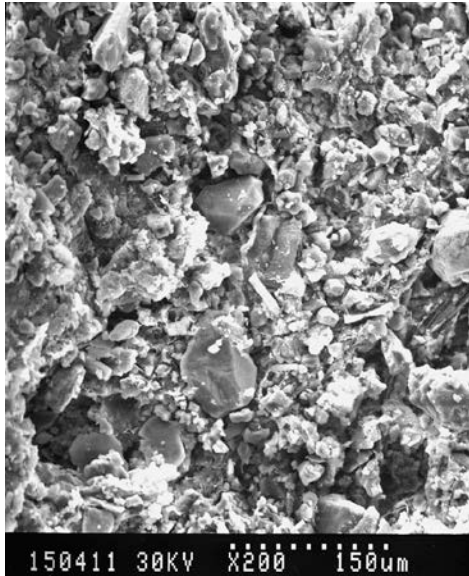
Изменение плотности сложения пахотного слоя почвы, в % от исходного;

Изменение межагрегатной пористости, см<sup>3</sup>/г;

Изменение внутриагрегатной пористости, см<sup>3</sup>/г;

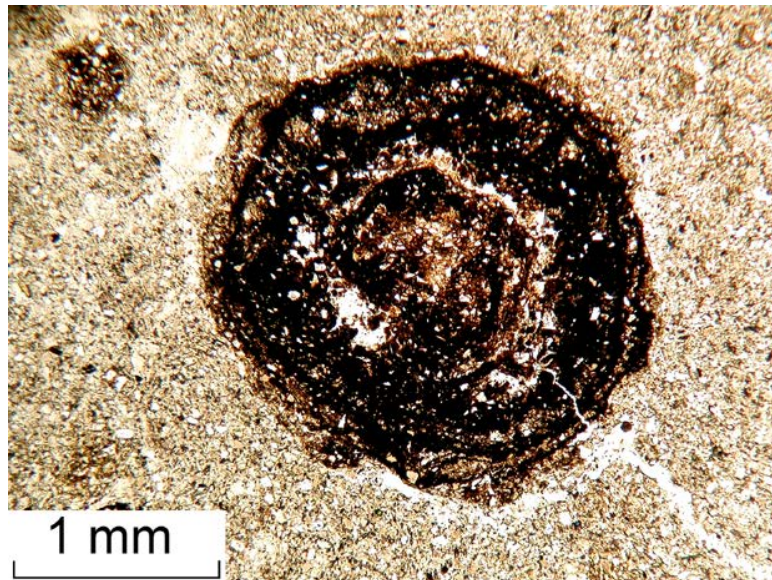
Изменение коэффициента фильтрации, м/сут.

# Детали микростроения дерново-подзолистой почвы

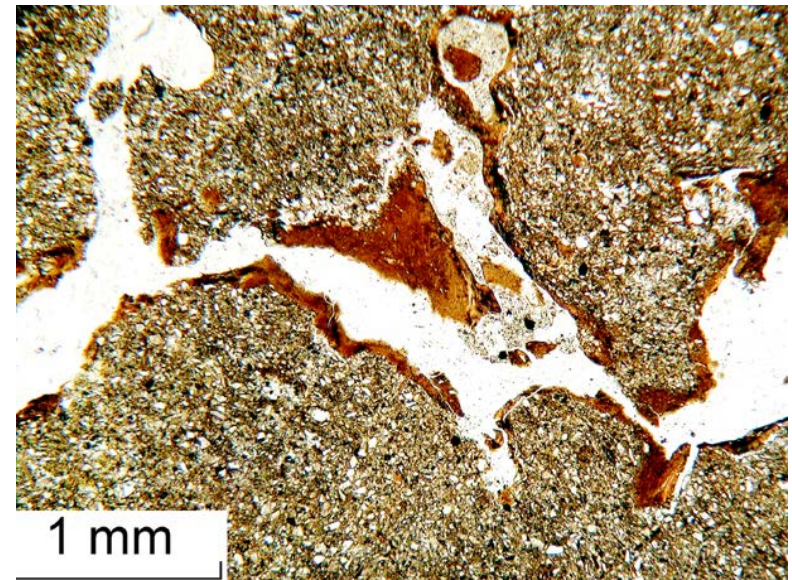


**Минеральные зерна и фитоциты**

**Растительные остатки**



**Fe-новообразования**



**Глинистые обособления**



**Непосредственный контакт с атмосферой обуславливает временную изменчивость температуры и влажности почвенной массы**

**Временная динамика структурного состояния почвы может повлиять на представительность образцов и достоверность полученных результатов**

*Anderson S.H., Gantzer C.J., Boone J.M., Tully R.J.* Rapid nondestructive bulk density and soil-water content determination by computed tomography. // **Soil Science of America Journal**. 1988. 52: 35-40.

*Baveye P.C., Laba M., Otten W., Bouckaert L., Sterpaio P.D., Goswami R.R., Grinev D., Houston A., Hu Y., Liu J., Mooney S., Pajor R., Sleutel S., Tarquis A., Wang W., Wei Q., Sezgin M.* Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data. // **Geoderma**. 2010. 157: 51-63.

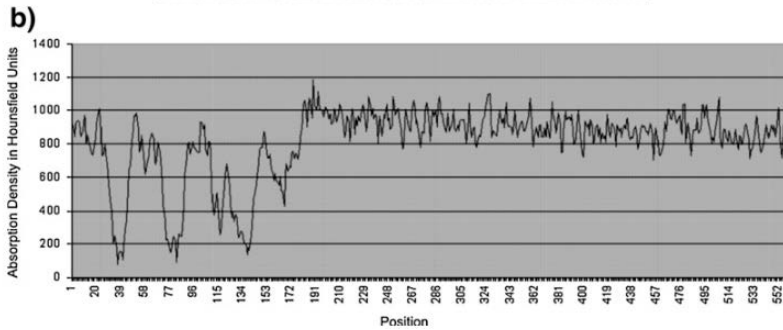
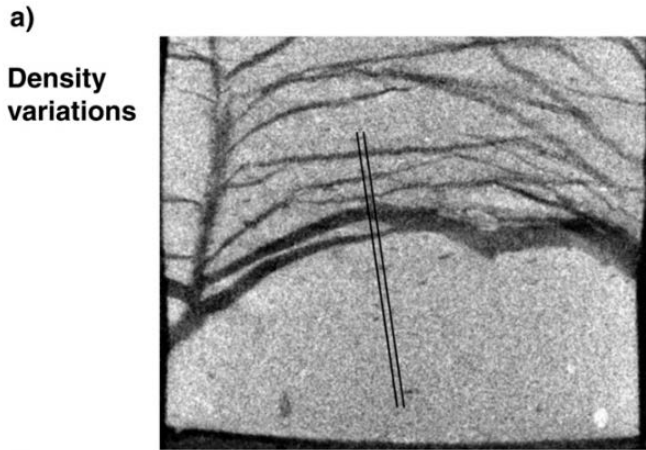
*Capowiez Y., Sammartino S., Michel E.* Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores. // **Geoderma**. 2011. 162: 124-131.

*Cnudde V., Dubruel P., de Winne K., de Witte I., Masschaele B., Jacobs P., Schacht E.* The use of X-ray tomography in the study of water repellents and consolidants. // **Engineering Geology**. 2009. 103: 84-92.

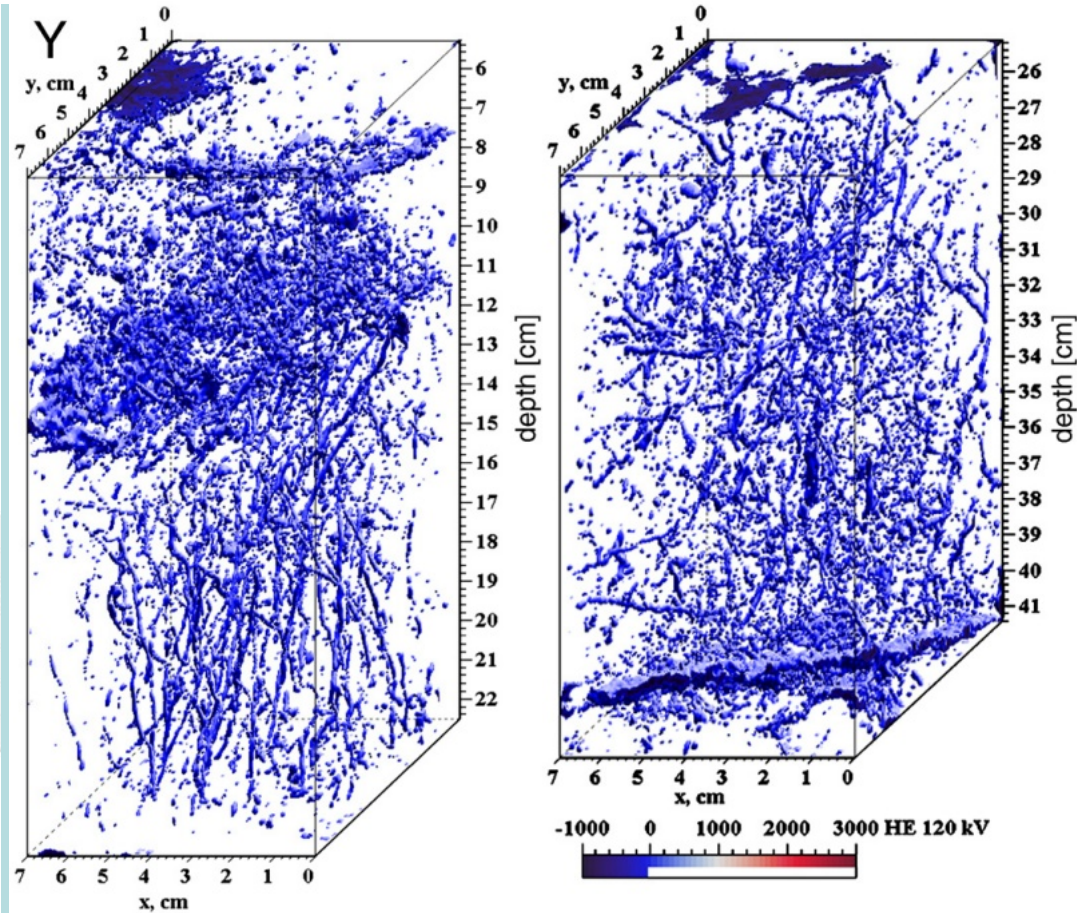
*Crestana S., Cesareo R., Mascarenhas S.* Using a computed-tomography miniscanner in soil science. // **Soil Science**. 1986. 142: 56-61.

(Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России //Почвоведение. 2012. №.7. С. 781-791).

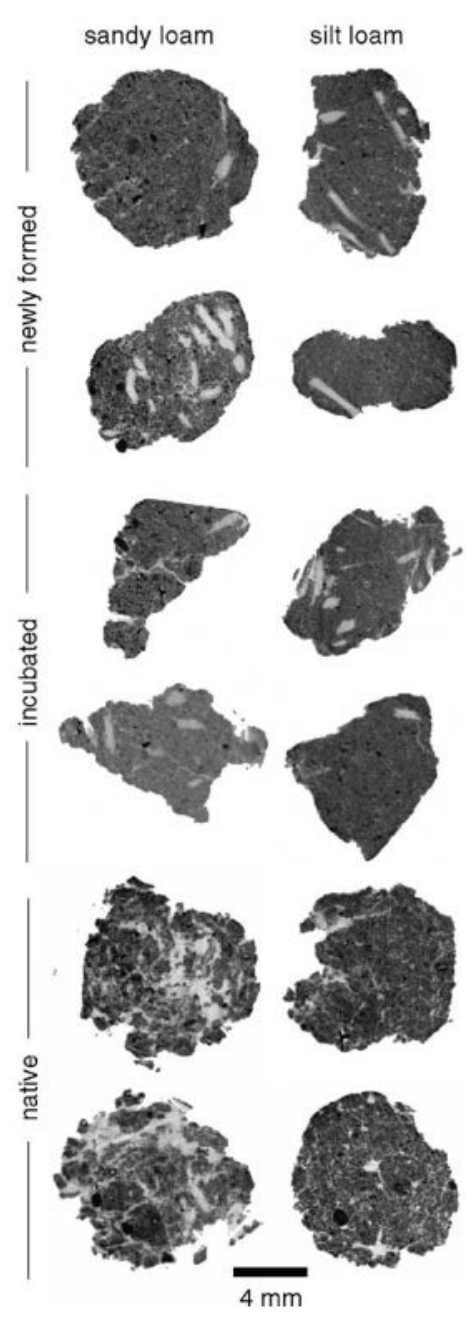
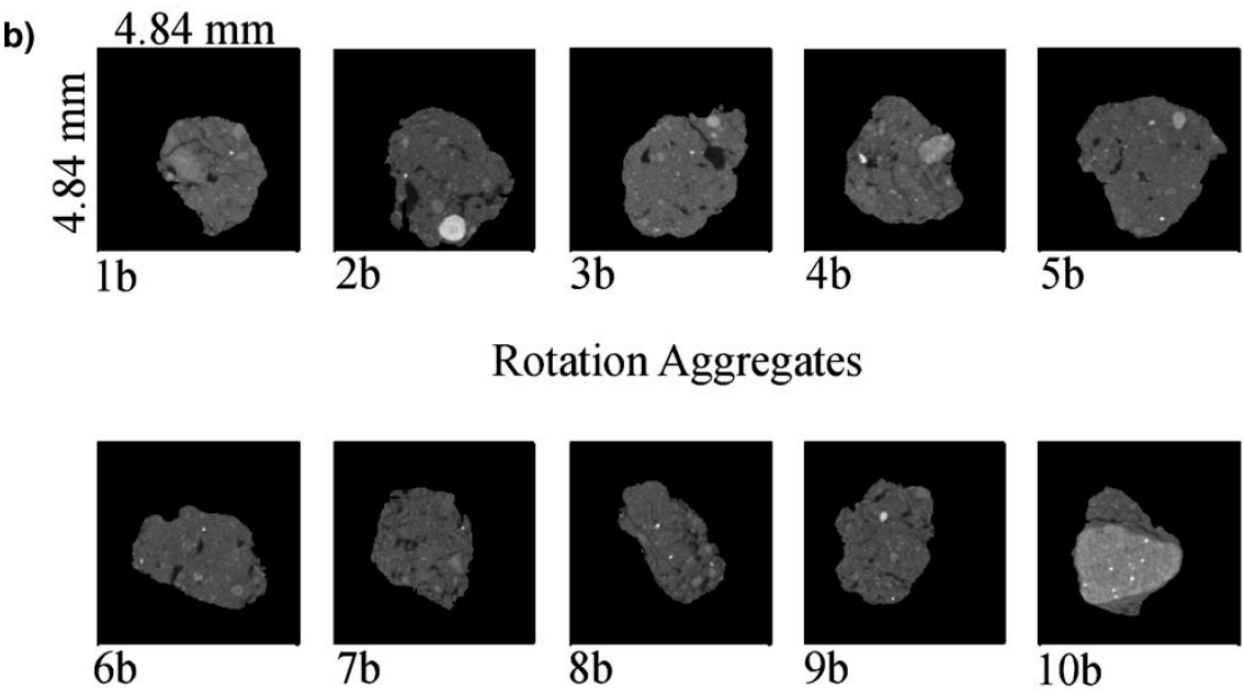
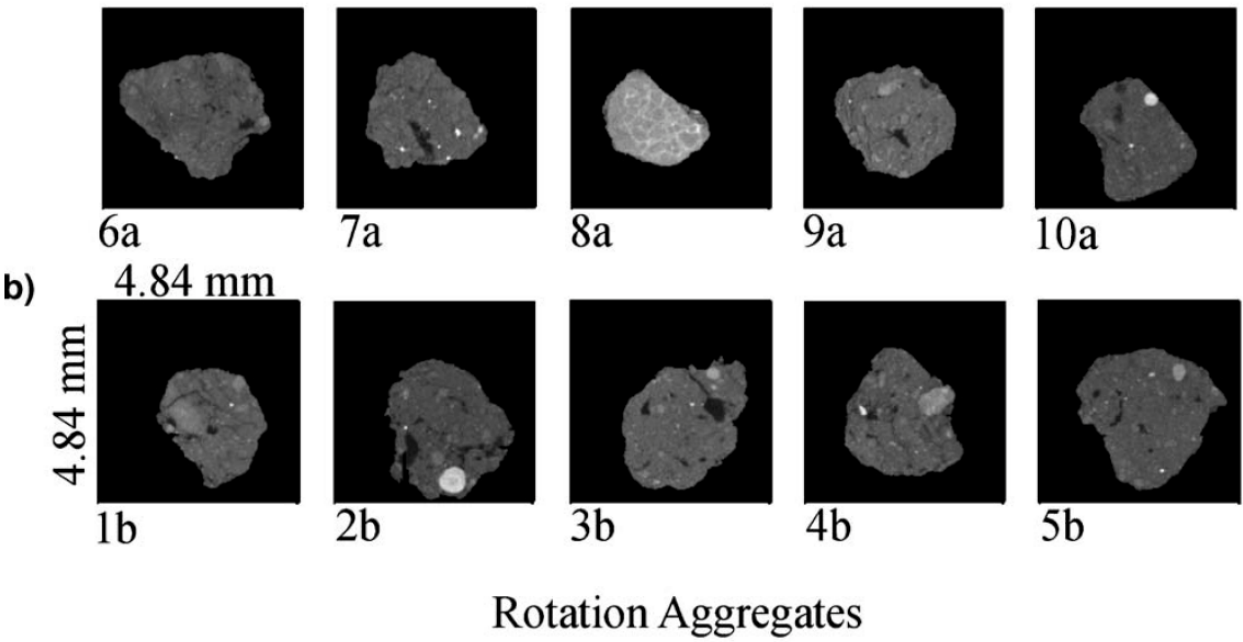
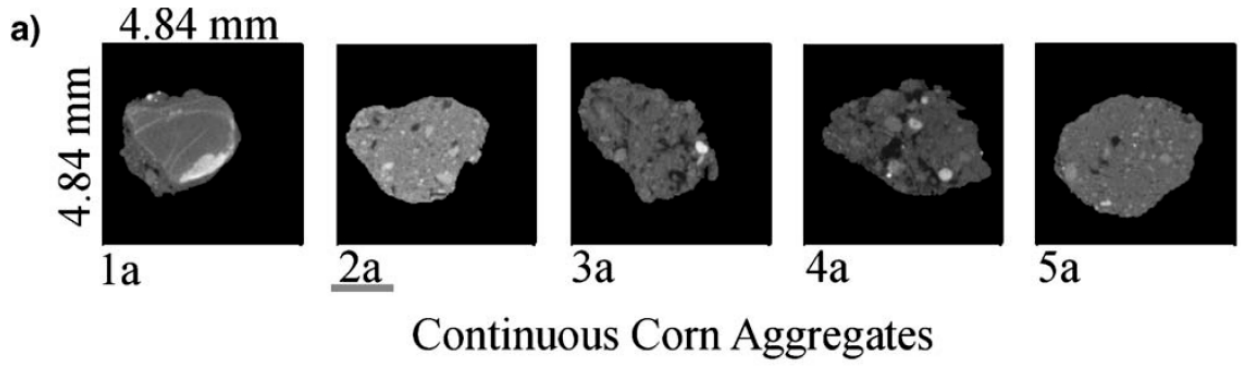
# Результаты, полученные с помощью компьютерной томографии



Образование линз льда в  
грунте [Torrance et al., 2008]



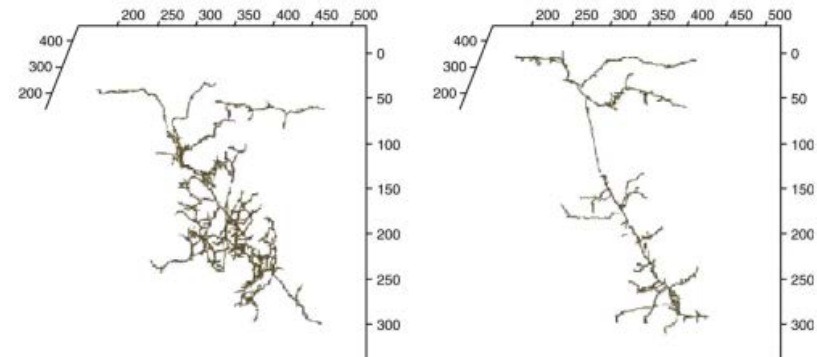
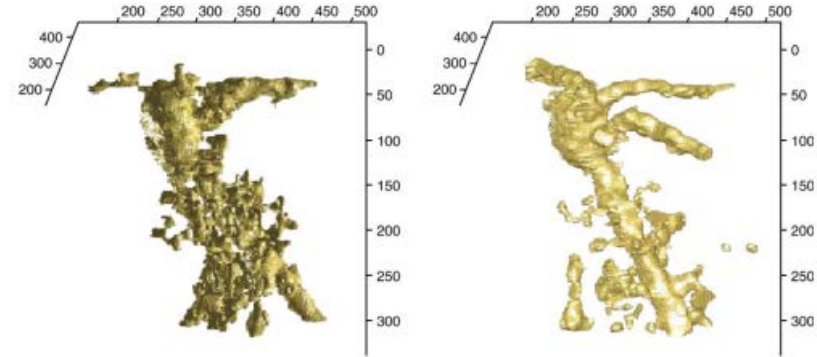
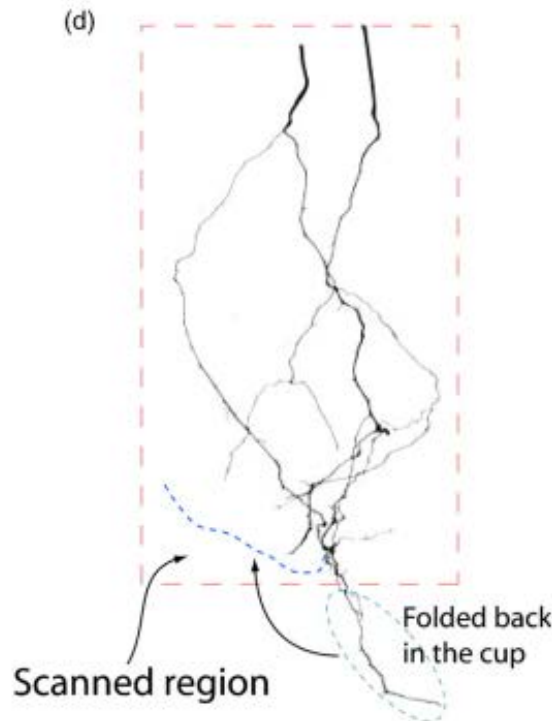
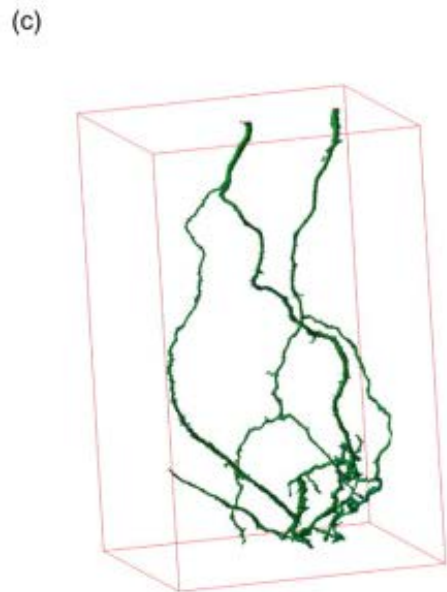
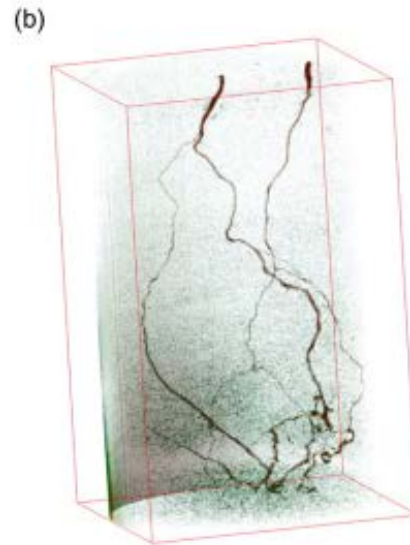
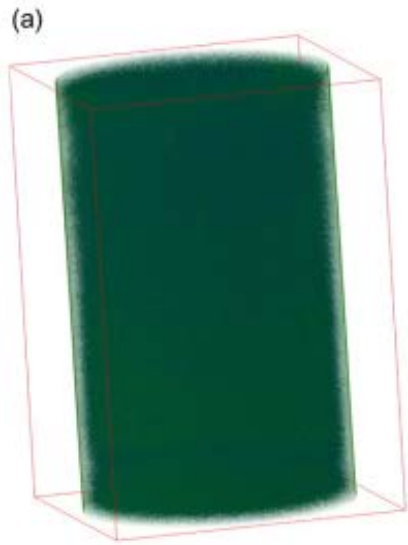
Структура макропор в почве рисовых полей  
[Sander et al., 2008]



[Gibson et al., 2006]

[De Gryze et al., 2006]

# Выделение корней растений в трехмерном пространстве



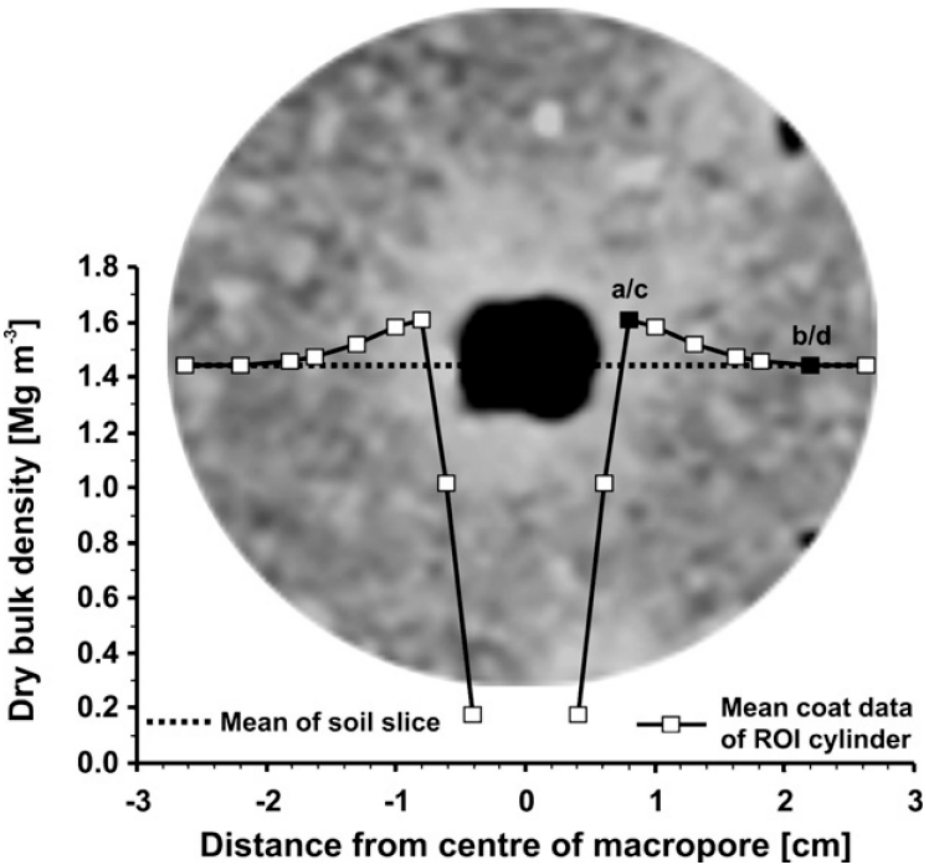
[Kaestner et al., 2006]

[Lontoc-Roy et al., 2006]

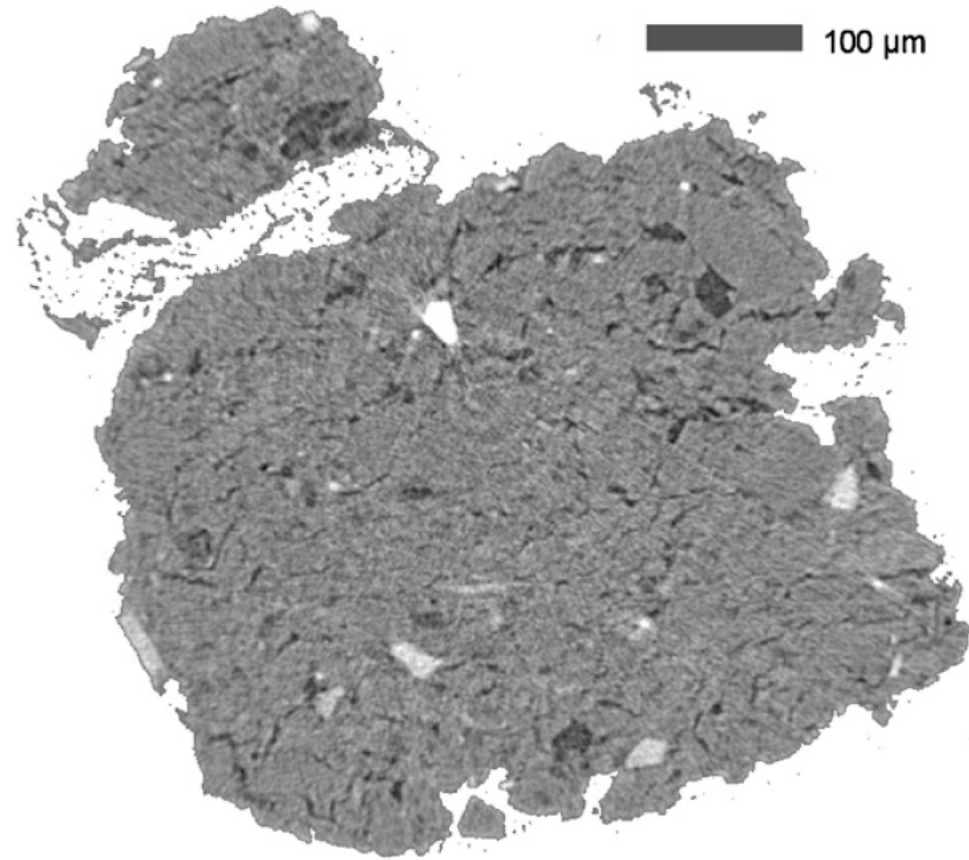


# Изучение структурных отдельностей

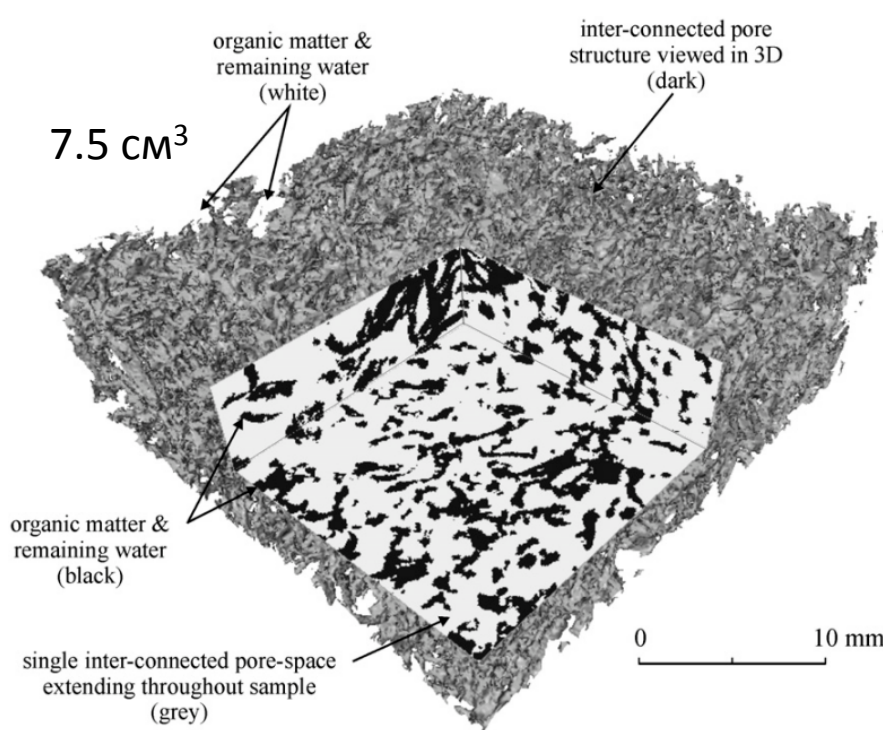
Burrow of *Lumbricus terrestris* in uncompacted soil



Изменение плотности почвы вокруг хода червя [Schrader et al., 2007]

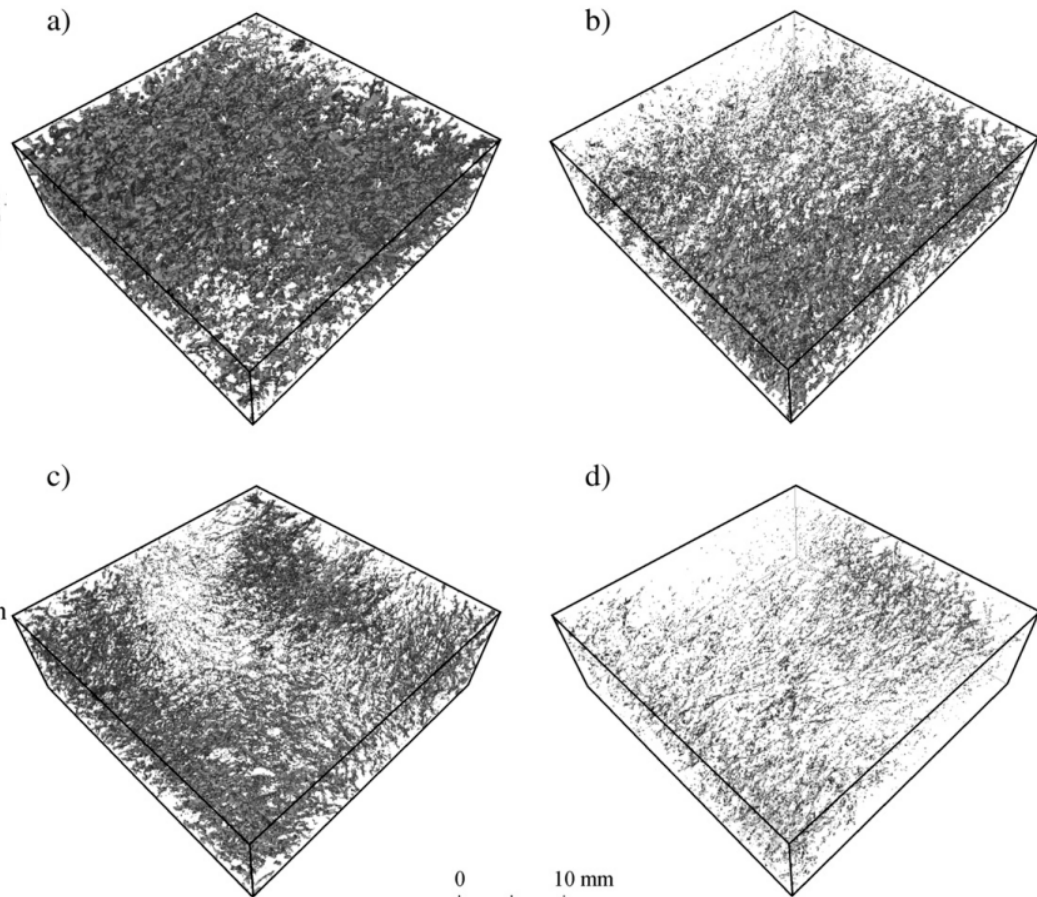


Съемка агрегатов с высоким разрешением [Sleutel et al., 2008]



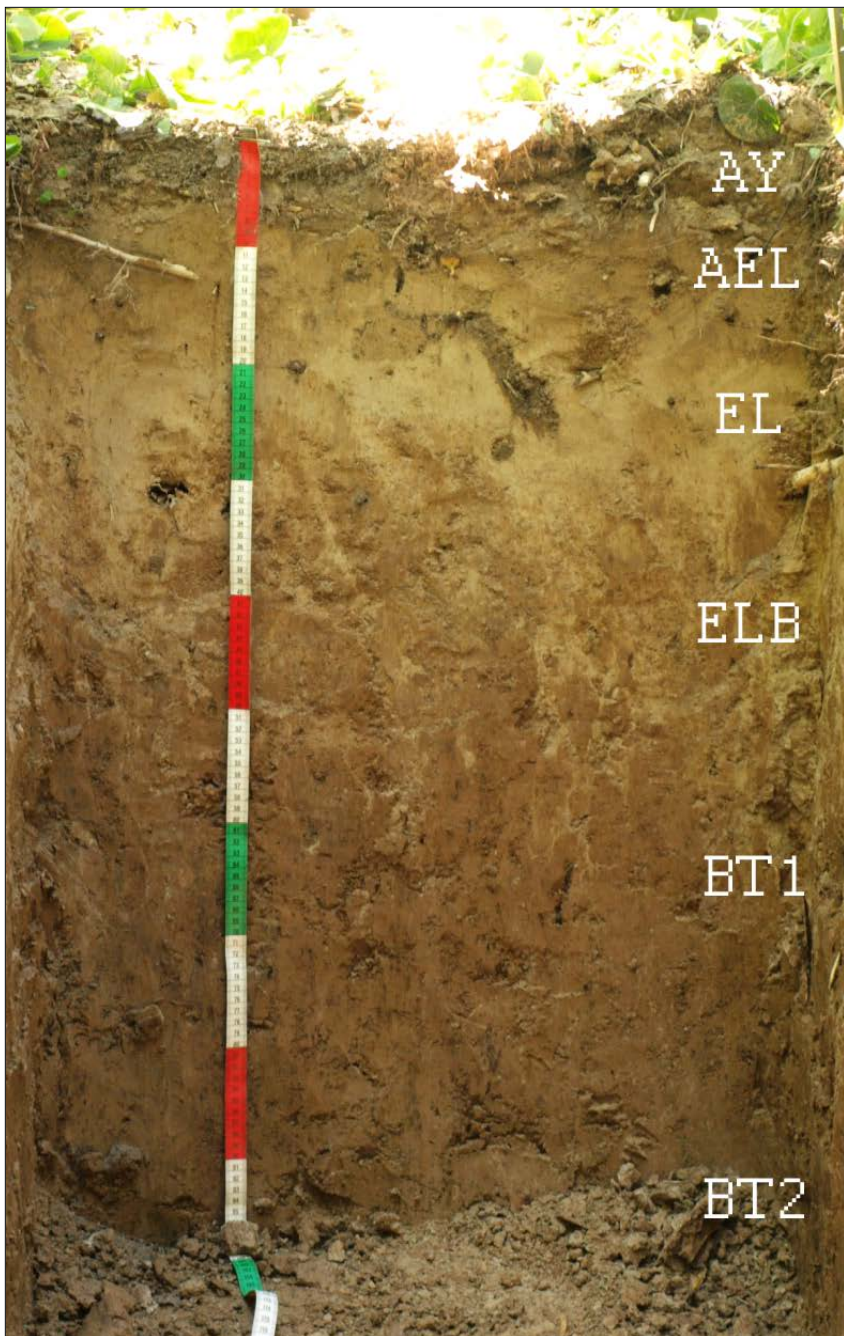
[Quinton et al., 2009]

Увеличение числа работ с изучением зависимости гидрологических и структурных свойств почв!

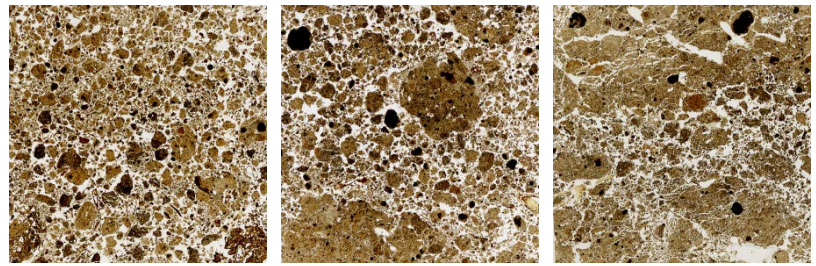


a) от -2 до -10 см, b) от -10 до -18 см, c) от -18 до -30 см, d) от -30 до -40 см

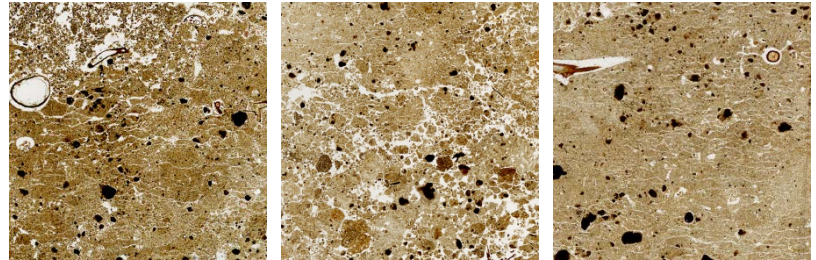
## Исследование структуры и гидрологических свойств торфов



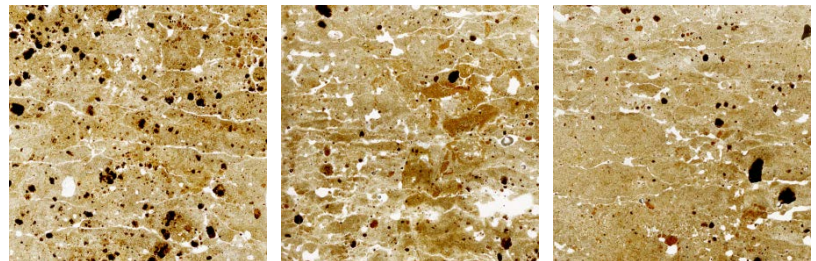
**AY**  
**0-4 cm**



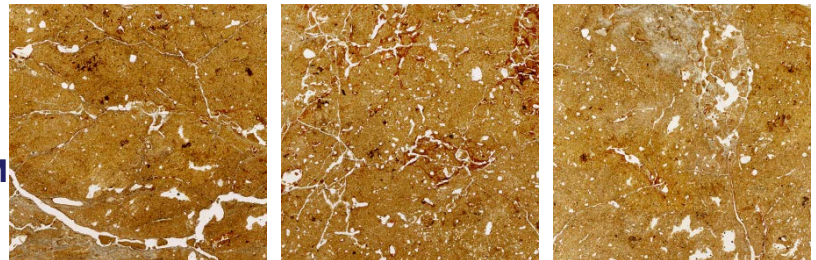
**AEL**  
**6-11 cm**



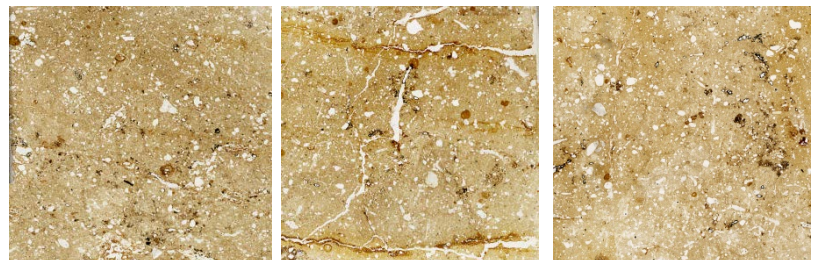
**EL**  
**17-22 cm**



**BT**  
**55-60 cm**



**C**  
**150 cm**



**Дерново-подзолистая почва**

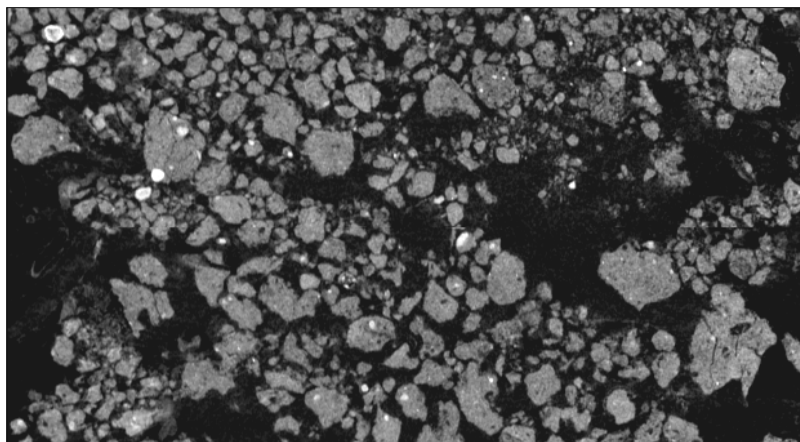
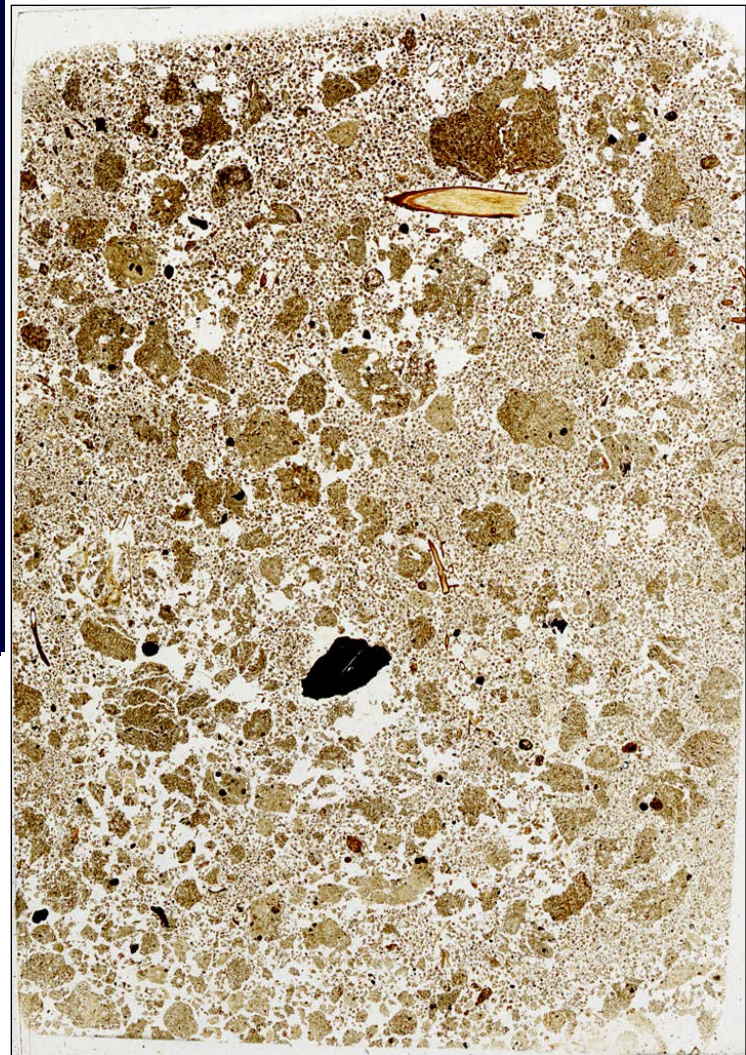
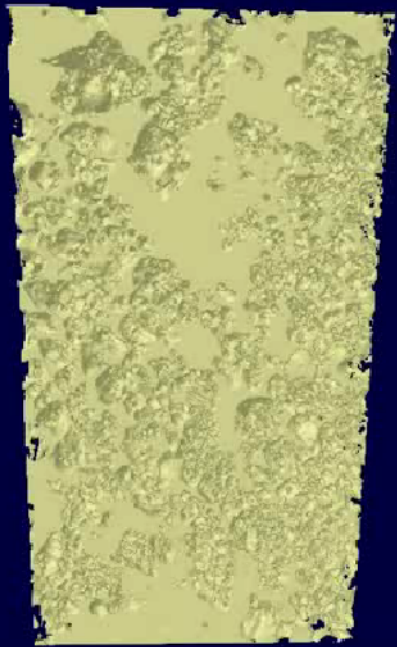
**Высушенные микромонолиты почвы (4x5x1,5 см) сканировали с помощью микротомографа SkyScan 1172 с энергией пучка 100 кэВ и разрешением 15,8 мкм.**

**Полученные стеки срезов почвы обрабатывали в свободно распространяемых программах ImageJ и ПО фирмы SkyScan.**

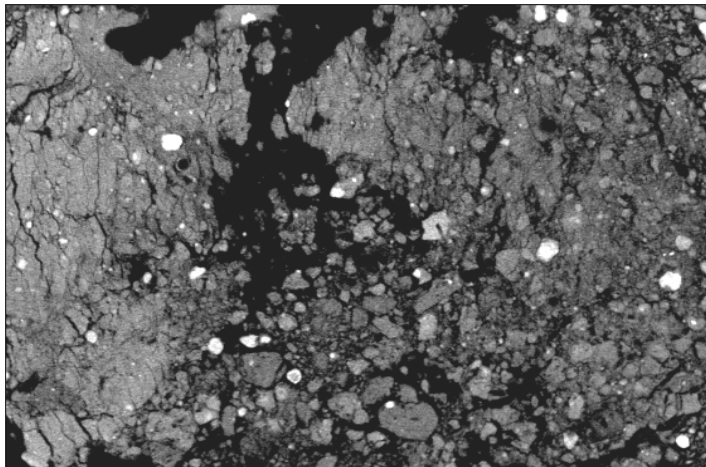
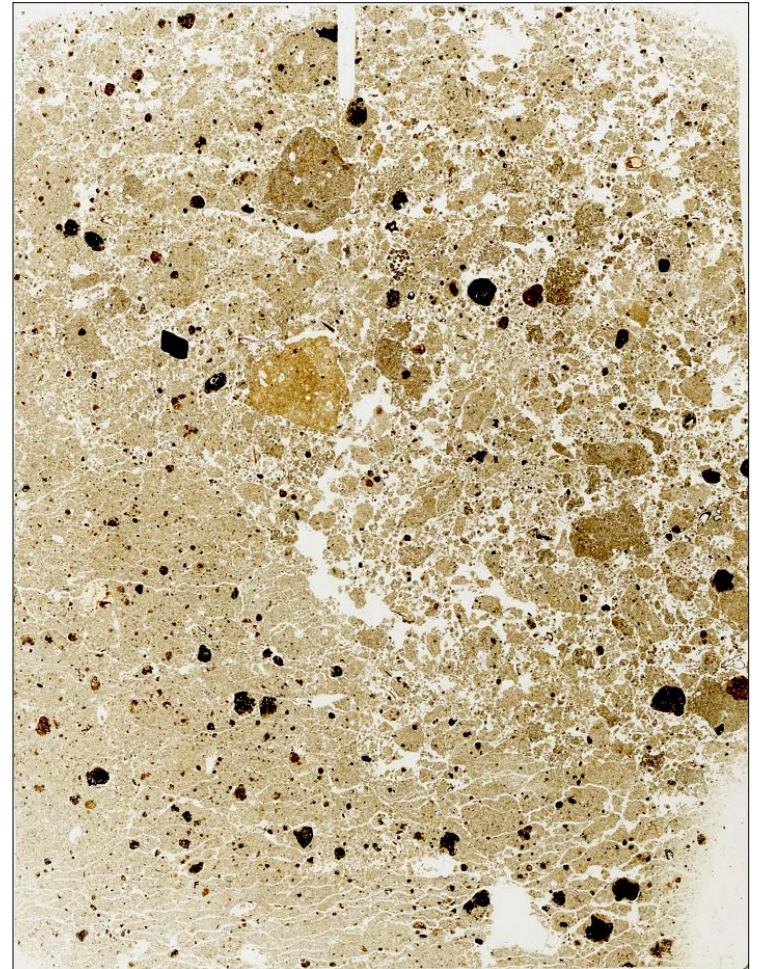
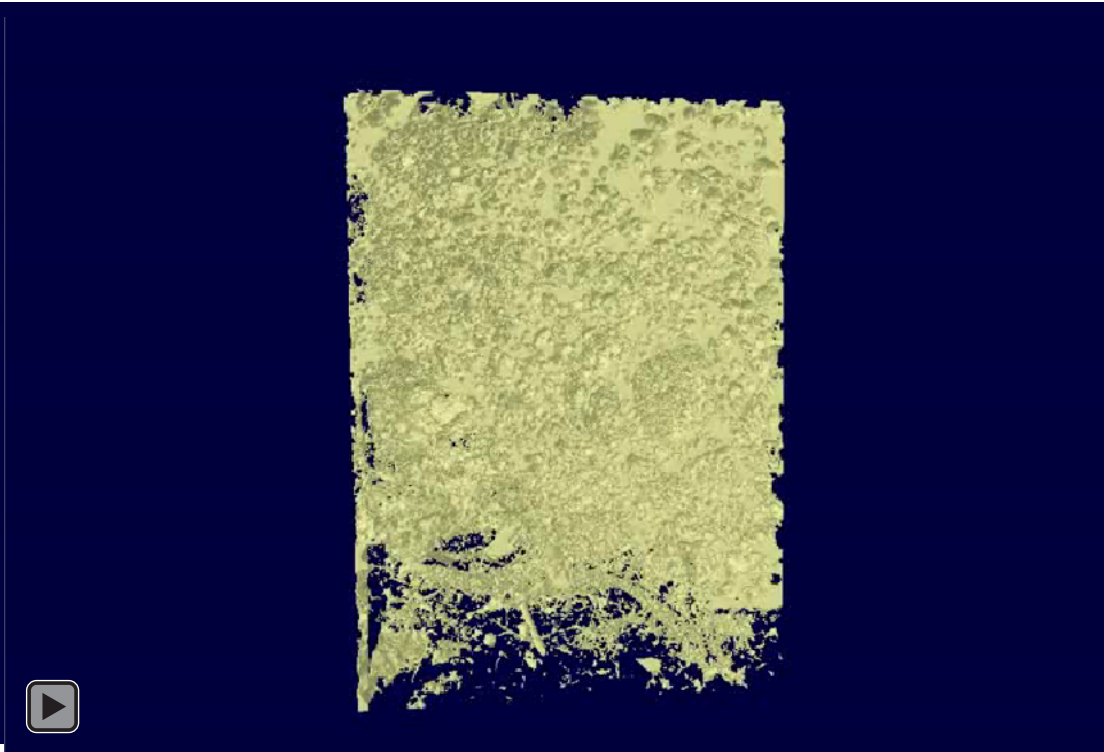
**Для трехмерной визуализации порового пространства все изображения в стеке разделяли на две фазы – твердое вещество и поровое пространство.**

**Разделение производили подборкой одиночного порогового значения по гистограмме интенсивностей пикселей (как среднее значение между пиками, соответствующими двум указанным фазам).**

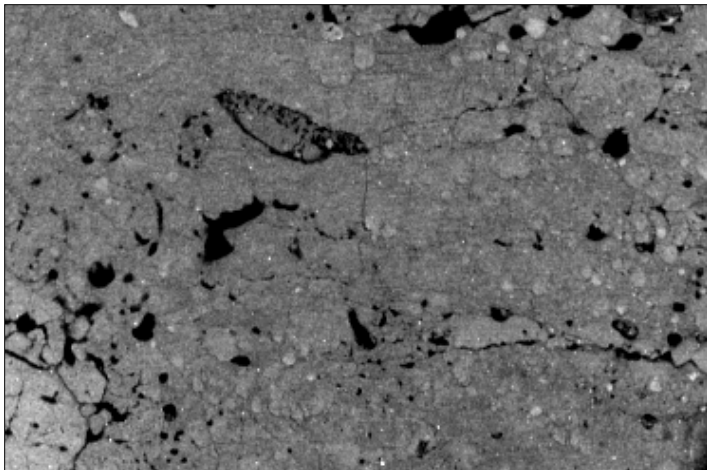
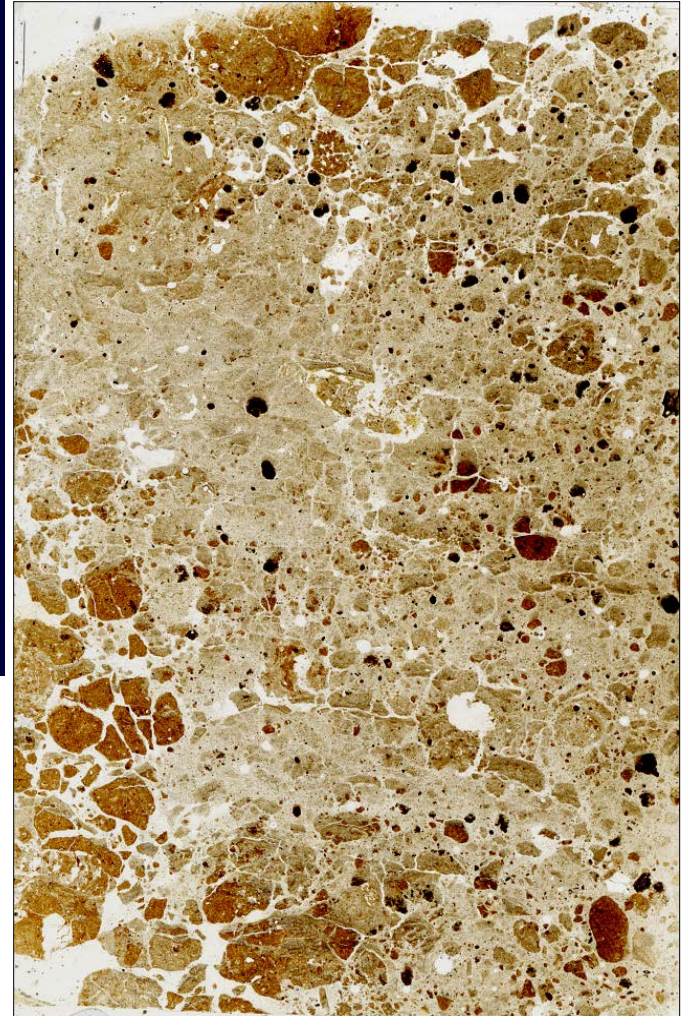
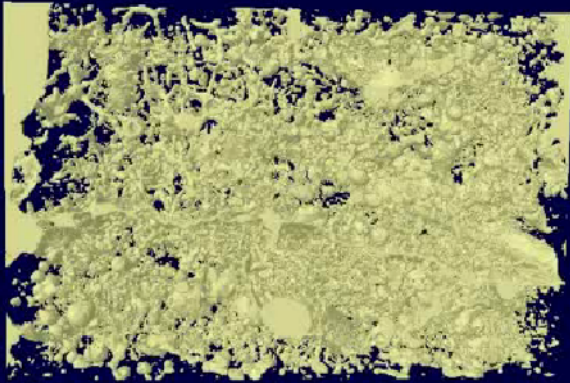
# Горизонт АУ 0-4 см



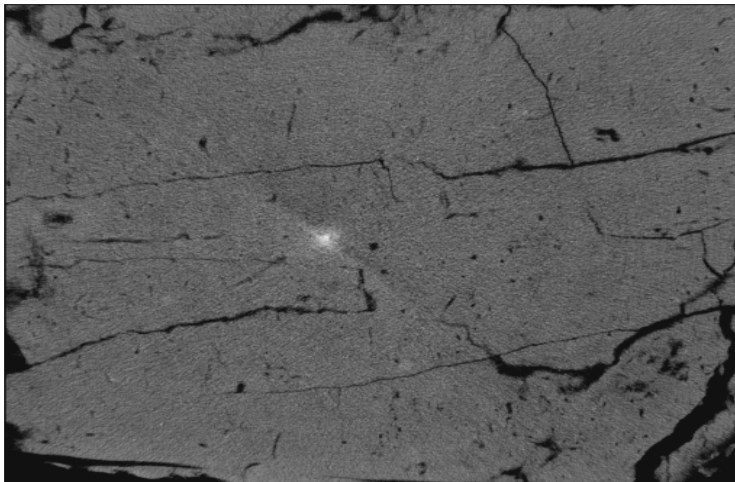
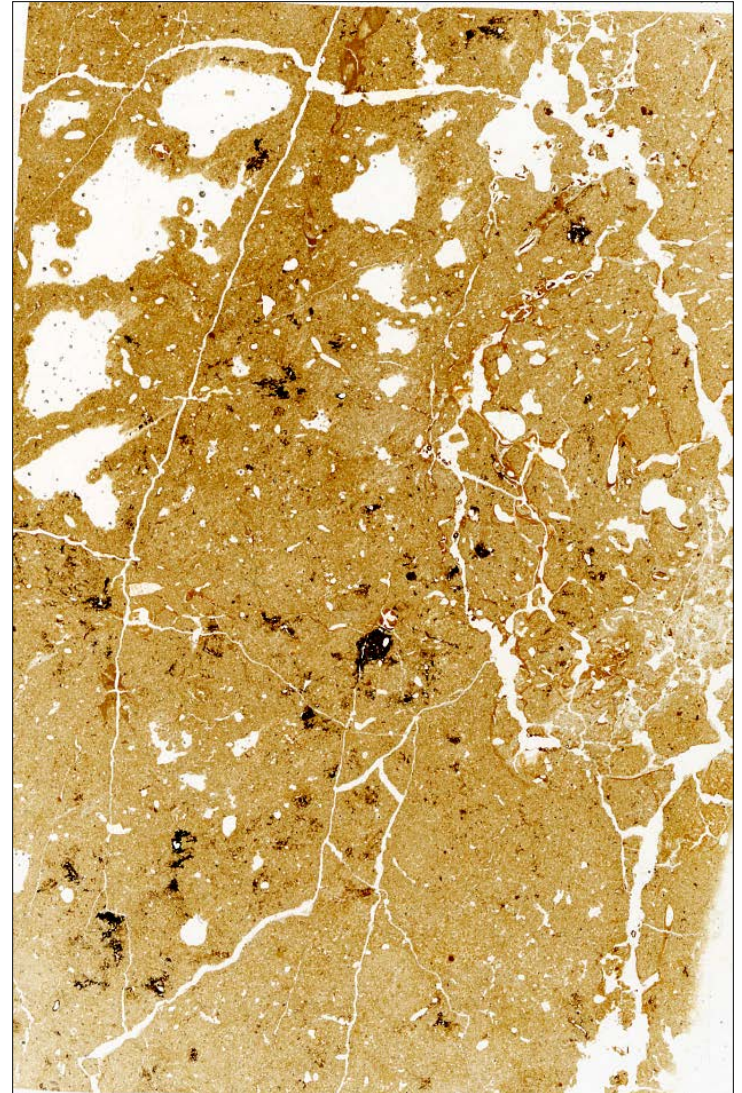
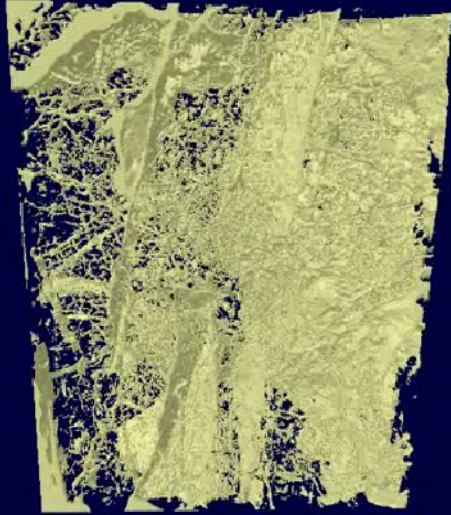
# Горизонт АЕЛ 6-11 см



# Горизонт EL 17-22 см

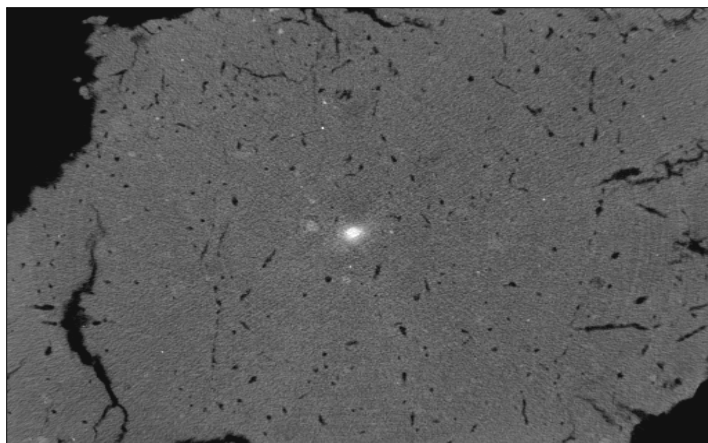
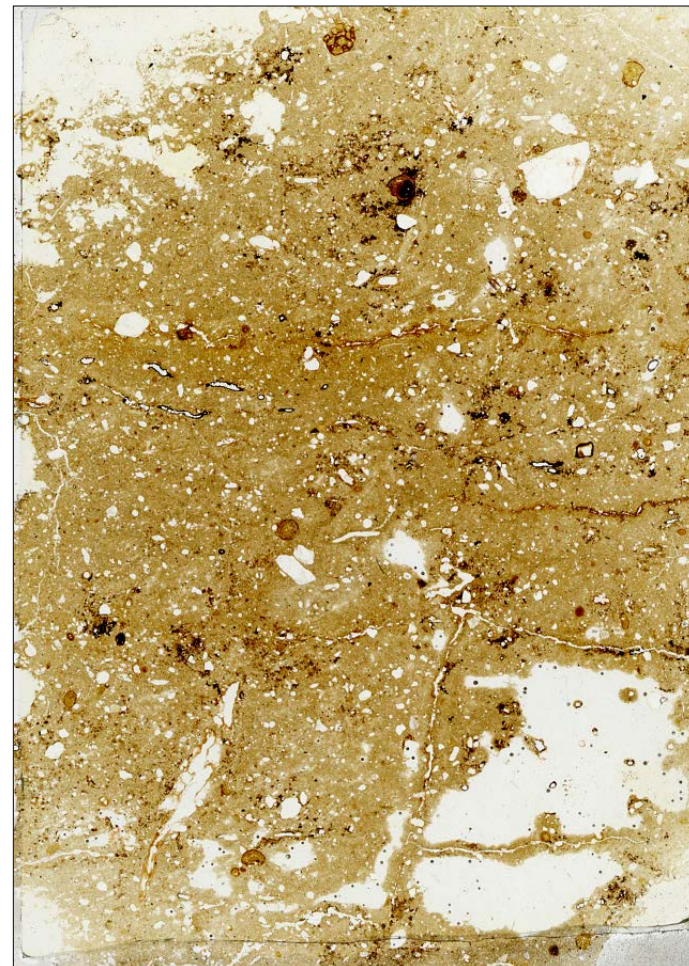


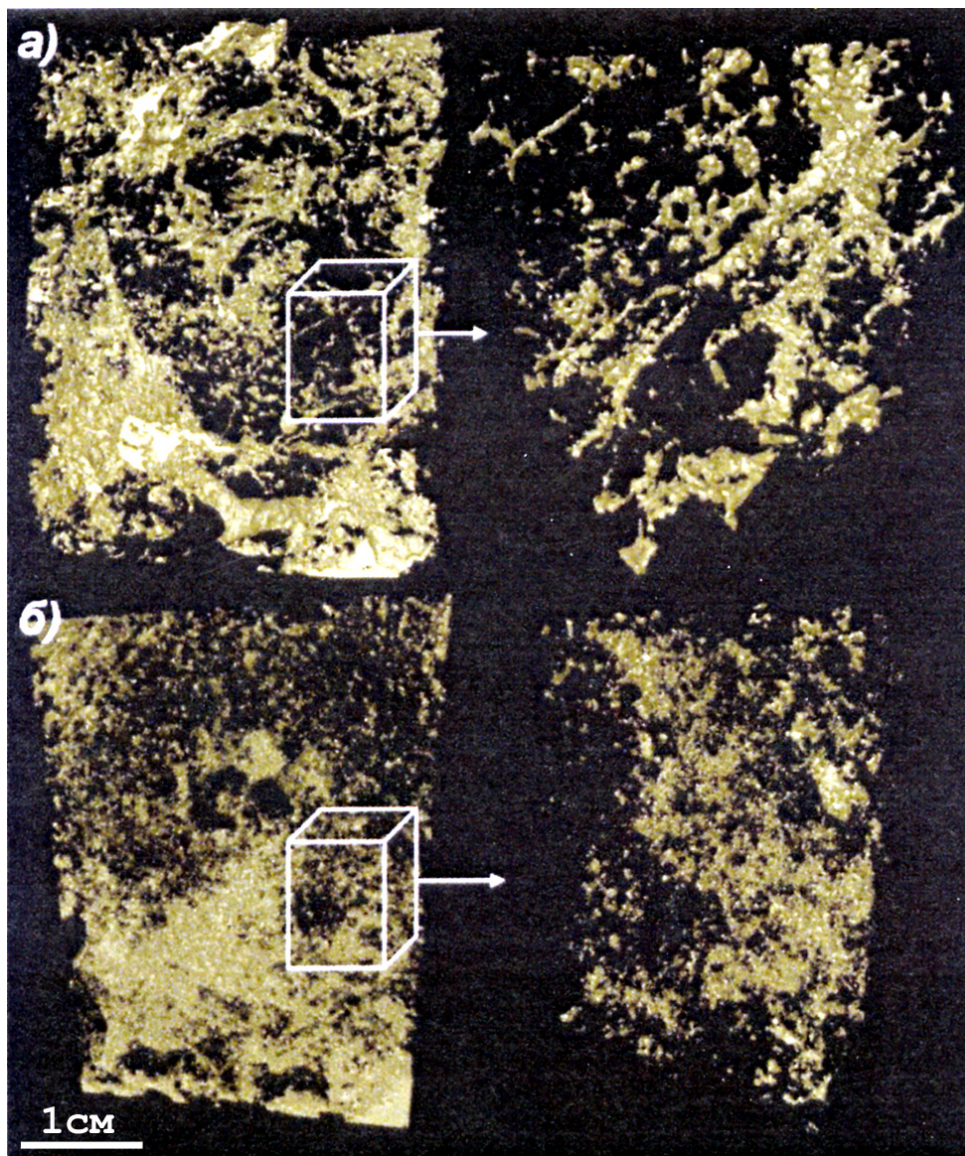
# Горизонт ВТ 55-60 см





# Горизонт С 150 см





**Строение порового пространства  
в гумусовых горизонтах:**

**а) - серой лесной почвы**

**б) - дерново-подзолистой почвы**

**(Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России //Почвоведение. 2012. №.7. С. 781-791).**

# Татарбунарский район Одесской области



Чернозем южный, 4-й год орошения  
водами лимана Сасык (первая очередь  
Дунай-Днестровской оросительной  
системы)

Состав поливных вод  
содово-хлоридно-натриевый,  
минерализация 1,6-3,0 г/л,  
соотношение натрия к кальцию 4-6,  
рН = 8,4-9,2 (Гоголев и др. 1986).

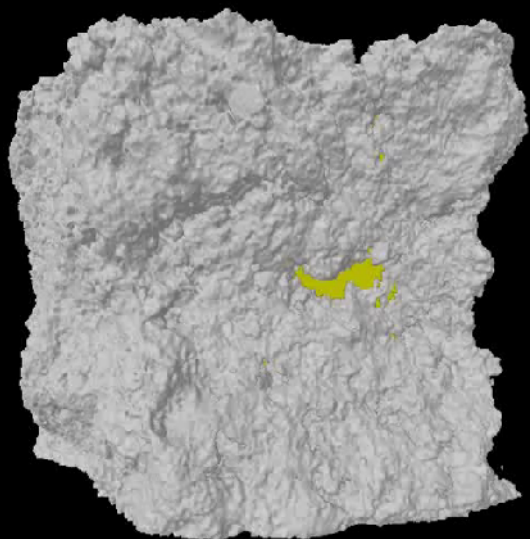
Проведено 10 поливов с применением  
дождевальнoй установки «Днепр»  
при поливной норме 300 м<sup>3</sup>/га.

Пахотный горизонт  
под посевом пшеницы

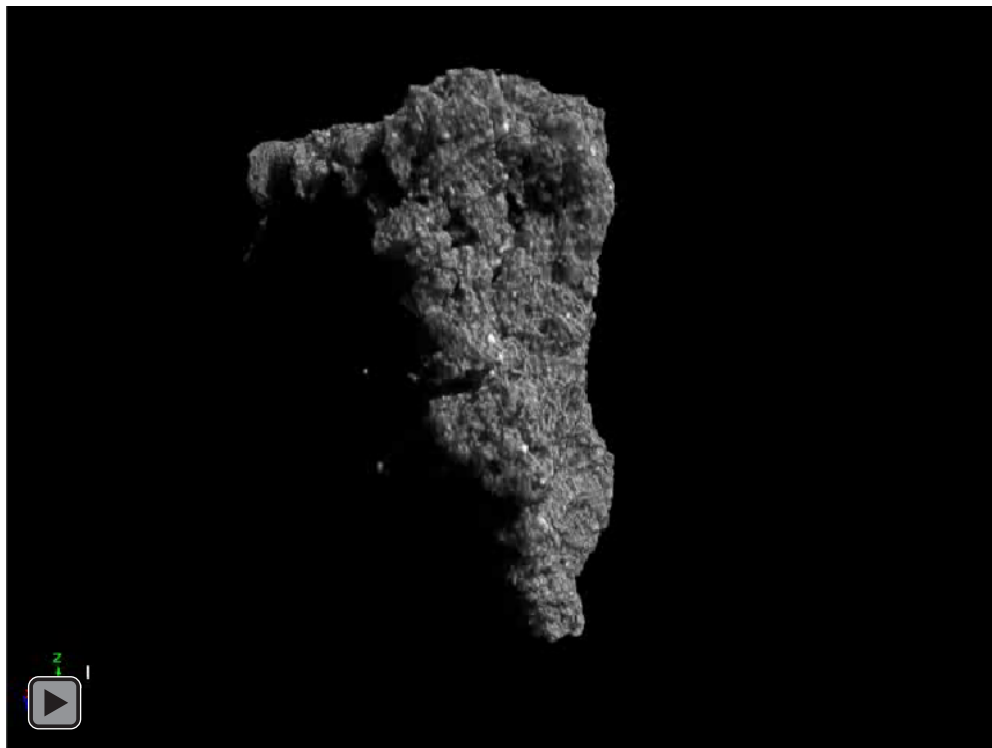
1 см

# Южный чернозем, орошаемый водами лимана Сасык Одесская область

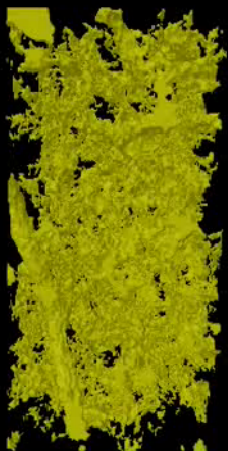
## *Математические модели и реконструкция*



Почва, поровое пространство  
и металлосодержащие частицы



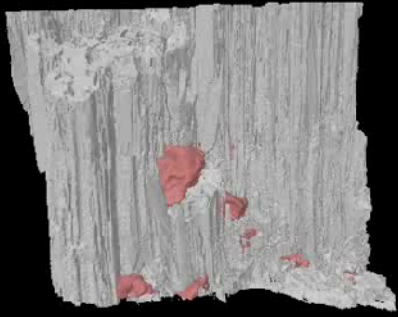
Размеры образца 4x2,5 мм.



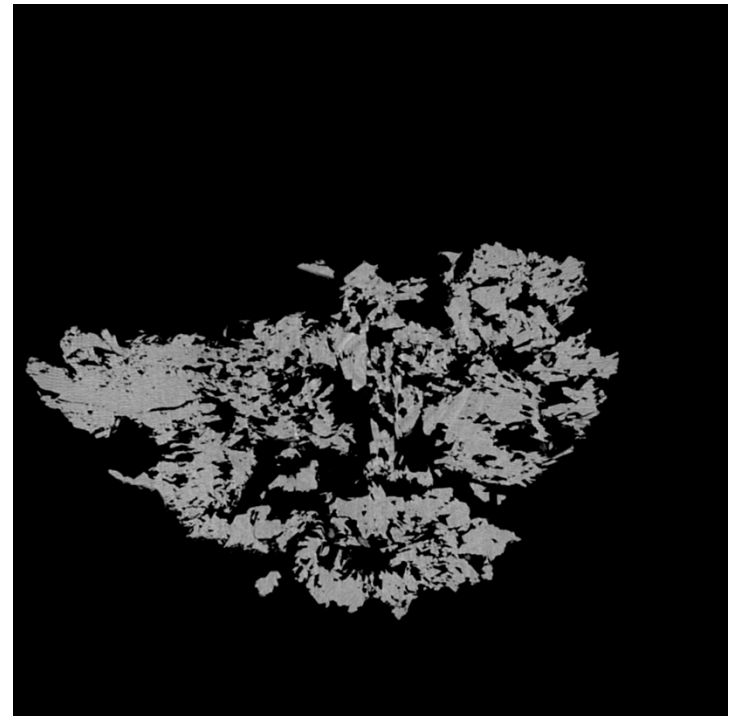
Поровое пространство  
Диаметр исследованной области 1 мм

# Кристалл гипса

- Разрешение снимка (Camera Pixel Size)( $\mu\text{m}$ )= 9.01
- Режим съемки: Filter Al 0.5 mm, 100кВ, 100мА.



Срез реконструкции

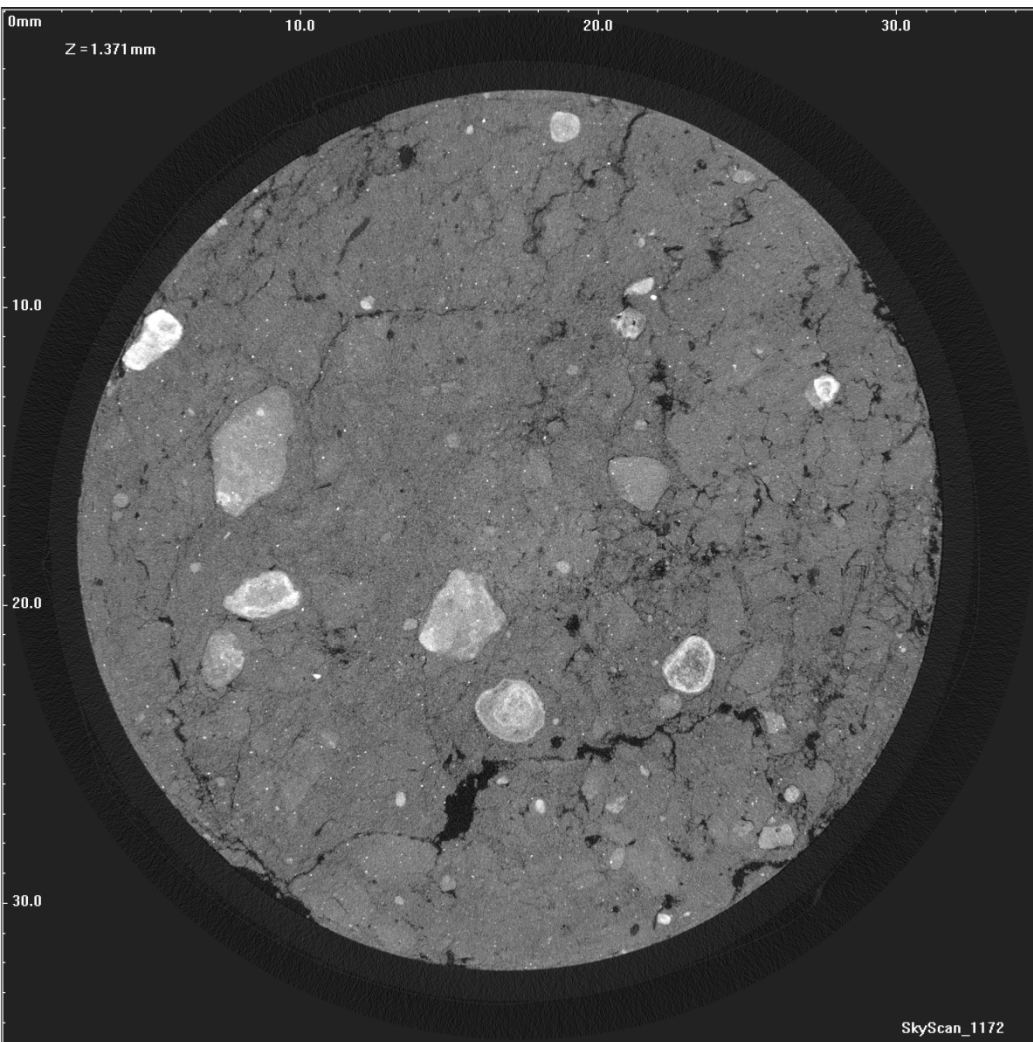


# Агродерново-подзолистая почва

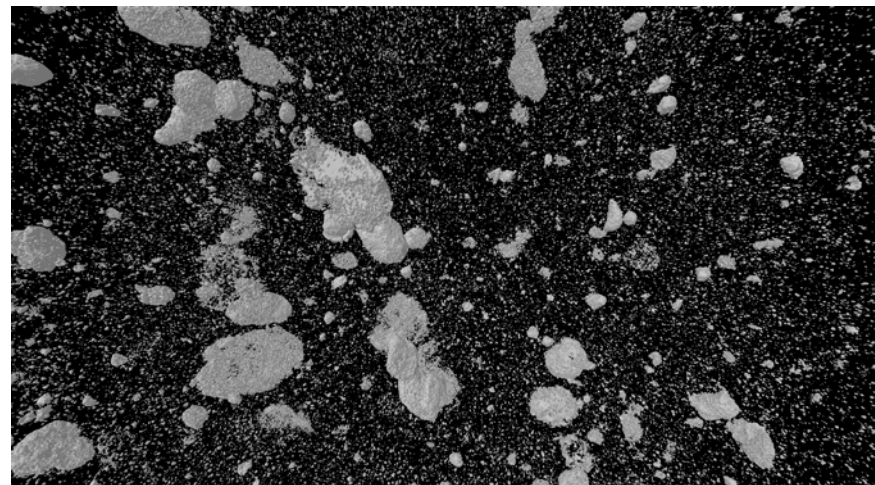
Горизонт Апах при полевой влажности.

Зеленоградский филиал Почвенного института, с. Ельдигино, МО, 2012 г.

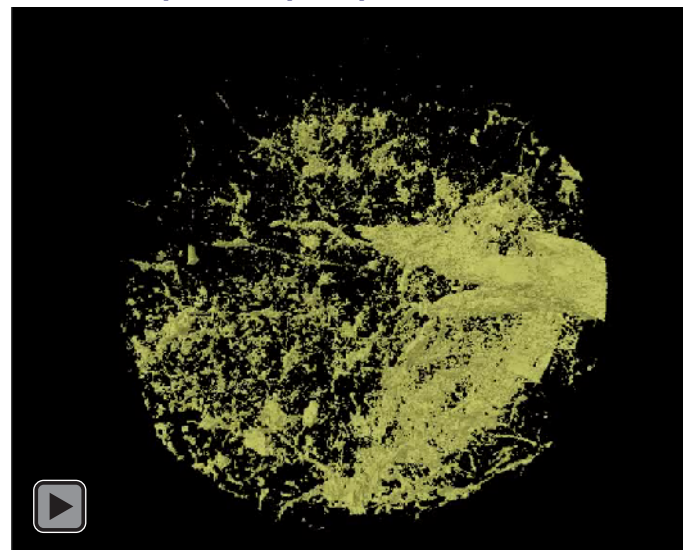
Реконструкция (один срез)



Оршштейны. Фрагмент 3D модели



Поровое пространство



# Некоторые теоретические и прикладные задачи:

## Генетико-классификационные

формирование базы морфометрических данных о строении почв России;  
разработка классификации и диагностики структурного состояния почв;  
математическое описание и моделирование почвенной структуры;  
составление атласа почвенных структур для целинных и пахотных земель;

## Функциональные

анализ и моделирование физических процессов в почвах (процессов оструктурирования, набухания-усадки, промерзания-оттаивания);  
анализ биологических процессов в почвах (процессов распространения корней, зоогенного агрегирования, жизнедеятельности почвенной мезофауны);  
определение гидрофизических свойств почв в микро- и макромасштабах;  
определение связи между строением почвы и процессами влаго- и массопереноса, анализ предпочтительных проводящих путей и их влияния на транспортные свойства почвогрунтов;

## Сельскохозяйственные

экспресс диагностика и мониторинг структурного состояния почвы и ее гидрофизических свойств для целей землепользования;  
диагностики физической деградации почв;  
моделирование стока удобрений и пестицидов, перемещения почвенных растворов;

## Образовательные

визуализация морфологического строения почвы с демонстрационными целями (в том числе для целей образования);

# **Приоритетное направление исследований:**

**анализ, моделирование и мониторинг  
строения и функциональных свойств почв  
в зависимости от их генетических особенностей**

**Исследования будут проводиться с учетом различных  
уровней структурной организации почвы:**

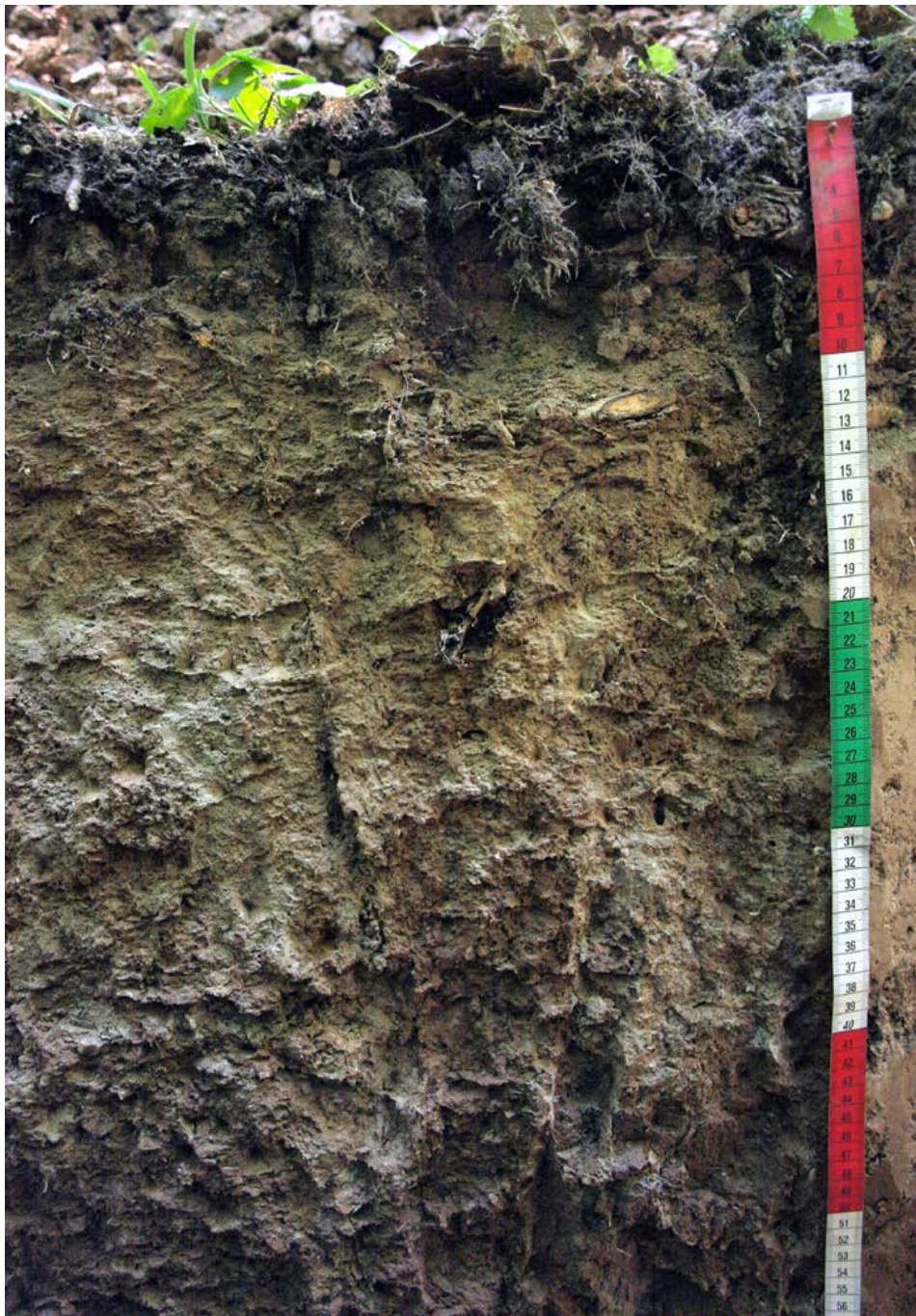
- 1.Уровень почвенного покрова.**
- 2. Профильный уровень.**
- 3. Горизонтный уровень.**
- 4. Агрегатный уровень.**
- 5. Уровень элементарных почвенных частиц и микроагрегатов.**





## **1.Уровень почвенного покрова**

**Исследование пространственной изменчивости томографических показателей в связи с вертикальной и горизонтальной неоднородностью почвы**



## 2. Профильный уровень.

Развитие представлений о **профиле порового пространства почвы** как генетически обусловленной вертикальной очередности различных форм порового пространства, отражающих структурное состояние горизонтов и морфонов почвы



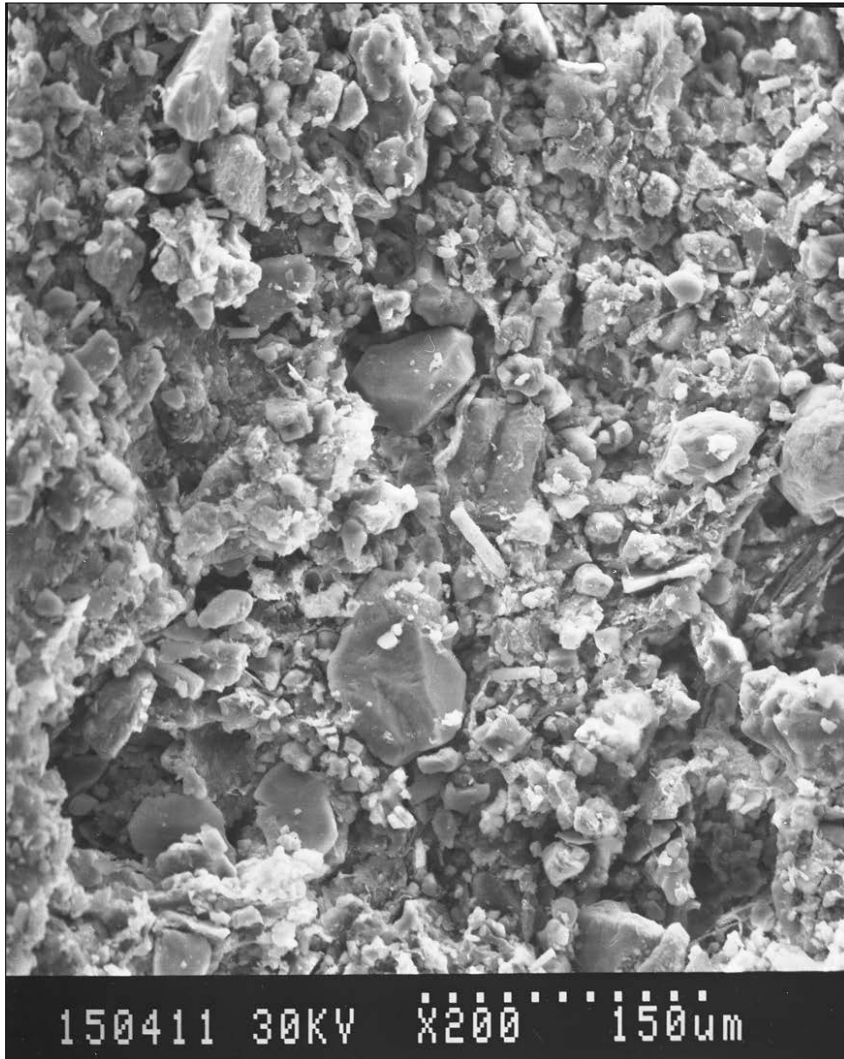
### 3. Горизонтный уровень.

Исследование морфологических и физических свойств почвенной массы в генетических почвенных горизонтах, а также в пограничных зонах почвенного профиля: при резкой смене гранулометрического состава, на контакте подстилки и минеральной части почвы, в переходных горизонтах AEL, BEL, корковых горизонтах и др.



#### 4. Агрегатный уровень.

Исследование структурных отдельностей, в том числе внутриагрегатного порового пространства, для диагностики почвенной структуры; для моделирования агрегатообразования; для анализа процессов набухания-усадки почвенной массы и др.



## **5. Уровень элементарных почвенных частиц и микроагрегатов.**

**Исследование агрегатообразования и локального перемещения почвенных растворов в песчаной, супесчаной, суглинистой и глинистой среде.**

**Для изучения различных уровней структурной организации почвы важно проводить томографический анализ почвы при разных масштабах:**

- 1) - в образцах размером в несколько сантиметров с разрешениями до 1 мкм на микротомографах;**
- 2) - в образцах размером до метра с разрешениями до сотен мкм на медицинских и геологических томографах.**

**Совмещение данных о структуре пористых тел при различных масштабах возможно с помощью методов статистической физики.**

**К числу ближайших задач томографических исследований в Почвенном институте относятся:**

- визуализация строения типичных образцов пород и почв;**
- определение диагностических показателей строения пор и агрегатов в 2D и 3D изображениях;**
- моделирование гидрофизических свойств почвы по микротомографическим данным.**



**Спасибо за внимание!**

**Елена Борисовна Скворцова**

[eskvora@mail.ru](mailto:eskvora@mail.ru)

**Почвенный институт им. В.В. Докучаева  
Россельхозакадемии**



# ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИЙСКОМ ПОЧВОВЕДЕНИИ



Иванов Андрей Леонидович<sup>1</sup>

Скворцова Елена Борисовна<sup>1</sup>

Корост Дмитрий Вячеславович<sup>2,1</sup>

Герке Кирилл Миронович<sup>3,1</sup>

Абросимов Константин Николаевич<sup>1</sup>

Колокольцев Владимир Владиславович<sup>2,1</sup>

1 – Почвенный институт им. В.В. Докучаева, РАСХН, Москва;

2 – МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;

3 – Институт динамики геосфер РАН, Москва

Казань, 2012 г.



# Sequential and gravitational algorithms for soil and other porous media modeling

Roman V. Vasilyev (1), Marina V. Karsanina (2), Kirill M. Gerke (2), Dmitry V. Korost (3)

1) Vladimir State University, Department of Applied Mathematics and Physics

2) Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Science, Laboratory of Geomechanics and Fluidodynamics

(3) Moscow State University, Geology Department

## Background:

In some cases, usually in field experiments or laboratory measurements, conventional sampling technique do not work due to, for example, too loose sample or its nonstandard shape, damaged samples or limited information available (only 2d cuts or thin-sections or grain-size distribution). In recent decade pore-scale modeling is becoming a promising method for sample properties determination, however, it requires 3d data on sample pore structure, which is not always available. For this reason different 3d structure reconstruction techniques are of particular importance.

## Methods:

Sequential methods for porous media modeling were successfully used to reconstruct sandstones and foams. However these techniques are known to results in packs with unrealistic connection (kissing) numbers compared to experimental data. For this reason we implement different methods, that is Lubachevsky-Stillinger and original gravitational techniques. The latter was developed for soil aggregates and colloid dispersions modeling.

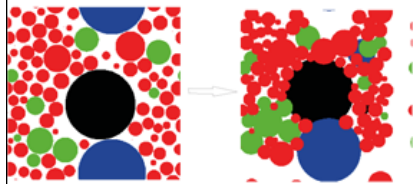
## Implementation features:

Using first method it is possible to control following sphere parameters:

- Grain-size (radius) distribution
- Material density distribution

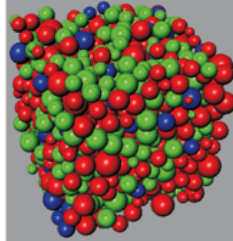
The main under-control parameter of the entire model is packing fraction. Without using post-packing procedure it can be up to 0.67..0.68 for 3D models with equal spheres radii. Average kissing number is also monitored during reconstruction. Post-packing (squeezing) can be applied to the model structure, that is coordinates of the sphere centers are multiplied by some coefficient:

$$x_i = \mu x_i, i \in \{1, 2, 3\}, \mu \in [0, 1]$$



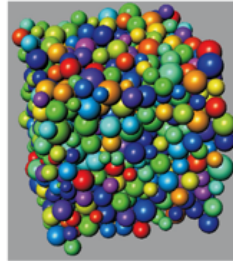
Here coefficient is equal to 0.85

## Sample models:



Distributions	R = 1.0	R = 0.5	R = 0.3
Density = 1.0	0.1	0.15	0.1
Density = 2.0	0.1	0.05	0.1
Density = 4.0	0.15	0.15	0.15

KN(0.3d) = 10.376  
 KN(0.1d) = 6.974  
 KN(0.01d) = 4.178  
 KN(0.001d) = 3.286  
 KN(0.0001d) = 3.002  
 Packing fraction = 0.645



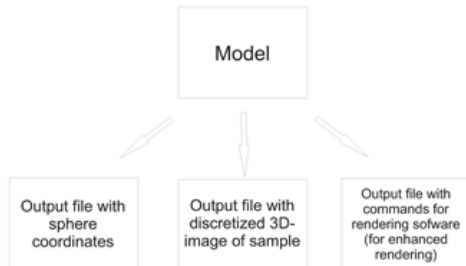
Radius distribution:  
 Normal with  
 M = 0.5 and sigma = 0.2

Density distribution:  
 Uniform in [1.0, 5.0]

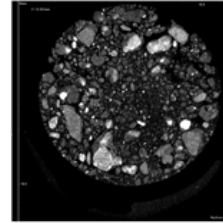
KN(0.3d) = 10.376  
 KN(0.1d) = 6.974  
 KN(0.01d) = 4.178  
 KN(0.001d) = 3.286  
 KN(0.0001d) = 3.002  
 Packing fraction = 0.645

Average kissing number is computed five times with different accuracy depending on sphere diameter. "KN(0.01d) = 4.0" means that there are at most four neighbors near spheres with distance less than 0.01 of their diameters.

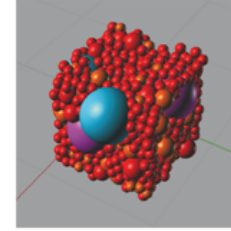
## Modelling outputs:



## Soil modeling experiment:



Original soil image obtained using micro tomography



Resulting model

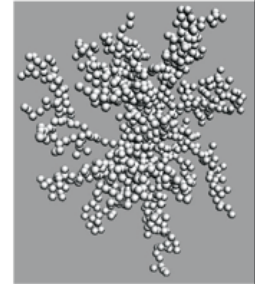
Distributions	R = 0.8	R = 0.7	R = 0.6	R = 0.5	R = 0.3	R = 0.25	R = 0.15
Density = 1.0	0	0	0	0	0.01032	0.02289	0.85526
Density = 2.0	0	0	0	0.00093	0.00883	0.02289	0.97331
Density = 10.0	0.00066	0.00072	0.00106	0	0	0	0
Density = 15.0	0.00072	0.0006	0	0	0	0	0

KN(0.3d) = 11.644  
 KN(0.1d) = 8.342  
 KN(0.01d) = 6.028  
 KN(0.001d) = 5.16  
 KN(0.0001d) = 4.77  
 Post-packing coefficient: 0.85  
 Packing fraction = 0.818

## Gravitational algorithm basics:

In gravitational algorithm we use sequential approach to construct structures. Modelling is carried out in a virtual box with size of 1.0\*1.0\*1.0 divided into cells. Cells are used only to speed-up computations. They have equal sizes assigned depending on maximum sphere diameter. Algorithm consists of the following steps:

1. The first sphere created and placed exactly at point (0.5; 0.5; 0.5). It is immobile due to gravitational interactions (e.g., nucleus)
  2. Other sphere are created at a random-selected point with distance D=0.5 from the central nuclei (0.5; 0.5; 0.5).
  3. New sphere is moving to the mass center of the whole structure. Velocity and direction are computed using classical gravitation law. Time step is various and depends on existing neighbor spheres. If there are no neighbors, offset is assigned with size of cell, otherwise we let time step = 1.0 and move sphere to the mass center before in collisions with other particles.
  4. If the sphere had stopped moving, go to step 5, otherwise repeat step 3.
  5. If the sphere count constraint is reached we finish modelling, otherwise go to step 2.
- With some particular settings this algorithm represents classical diffuse limited aggregation (DLA) cluster



Resulting DLA cluster

## Main results and conclusions:

1. New gravitational algorithm for porous media modelling has been developed and implemented into C code.
2. More realistic models of soil and other porous media can be constructed with wide variety of under-control parameters such as average kissing number.

## Outlook:

1. Organic matter and clay fraction implementation
2. Verification against X-ray microtomography scans and laboratory measurements on soil samples
3. Pore-scale modeling of soil hydraulic properties

## Main references:

1. M.Skoge, A.Donev, F.H.Stillinger, S.Torquato, 2006. Packing hyperspheres in high-dimensional Euclidean spaces. Phys.Rev. E74, 041127.
2. S.Bakke, P.-E.Øren, 2002. Process Based Reconstruction of Sandstones and Prediction of Transport Properties. Transport in Porous Media, 46, 311-343.
3. L.Berthier et al, 2011. Suppressed Compressibility at Large Scale in Jammed Packings of Size-Disperse Spheres. Phys.Rev.Letters 106, 120601.
4. S.Bakke, P.-E.Øren, 1997. 3-D pore-scale modelling of sandstones and flow simulations in the pore networks. SPE 35479, 136-149.
5. B.Biswal et al. Stochastic multiscale model for carbonate rocks, 2007. Phys.Rev. E75, 061303.