

УДК 57.087.3+631.434.12

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОЙ ПОЧВЫ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ (МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)*

© 2015 г. О. А. Софинская¹, Е. О. Стаценко²*Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, Кремлевская, 18**e-mail: ushik2001@mail.ru, e.statsenko@yahoo.com*

Поступила в редакцию 17.05.2013 г.

Проведено сравнение показателей физических свойств серой лесной почвы суглинистого состава в колоночном эксперименте с загрязнением нефтью и последующим промачиванием водой с применением рентгеновской компьютерной томографии. С практической точки зрения, лабораторное загрязнение моделировало ситуацию остаточного загрязнения нефтью воздушно-сухой пахотной почвы. На томографических снимках с помощью контрольных образцов выделены диапазоны градаций серого, соответствующие разным компонентам грунта. Традиционными лабораторными методами и по томограммам зафиксированы подтверждающие друг друга изменения в поровом пространстве в присутствии воды и нефти. Нефть томографически отображалась в тех же тонах, что и песок, а почвенные агрегаты — как более плотное для рентгеновских лучей вещество. Присутствие нефти повысило рентгеновскую прозрачность образцов по сравнению с контрольной почвой. По томографическим снимкам и в ходе седиментации установлены факты кажущегося укрупнения частиц песка и почвы и сопутствующее растрескивание под действием нефти и воды. В присутствии и той, и другой жидкостей наблюдалось уплотнение агрегатов почвы. Совместное действие воды и нефти в течение двух суток привело к взаимному дополнению эффекта образования крупных пор, а через две недели размер видимых пор вернулся на уровень контрольного варианта.

Ключевые слова: поровое пространство, анализ цифровых изображений, серые лесные почвы.

DOI: 10.7868/S0032180X15020112

ВВЕДЕНИЕ

Особенности распределения углеводов нефти в грунтах до конца не изучены и представляют проблему при рекультивации почв [6]. Показано, что взаимодействие твердой фазы, воды и нефти зависит от структуры порового пространства и отражается на подвижности и биодоступности веществ в почве [4]. На биодоступности нефти может отразиться и тот факт, что окисляющие ее микроорганизмы предпочитают определенные размеры структурных элементов почвы [7]. Метод рентгеновской компьютерной томографии позволяет исследовать почвенные образцы без нарушения их структуры. Томографически морфология почвы исследуется с меньшими временными затратами, чем при лабораторном анализе, и оперативно проводится объемная визуализация порового пространства [3]. Отечественные и зарубежные авторы по томограммам отслеживают изменение влажности, внутриагрегатной пористости, распределения пор по размерам, влагопроницаемости в ходе хозяйственной

деятельности или жизнедеятельности почвенной биоты [3, 5, 10, 12]. Размер объектов структуры почв, наблюдаемый современной микротомографией (в среднем несколько микрон), сопоставим с анализируемыми размерами в методах, разрушающих почвенный образец [3, 8, 14]. В целом, компьютерная томография является перспективным дополнением к традиционным методам лабораторного анализа. Тем не менее, остаются проблемы с распознаванием различных компонентов почвы на томографических изображениях — для этого используется широкий спектр статистических методов [17]. Показано, что распознавание компонентов почвы на томограммах различными методами приводит к совершенно разным результатам [11], то есть универсального метода распознавания не существует. Созданы программные продукты, реализующие анализ двух- и трехмерных томографических изображений, в частности, находящийся в свободном доступе пакет программ с открытым кодом ImageJ [18]. Этот пакет успешно применяют при обработке виртуальных срезов почвы [11]. Кроме того, используют программное обеспечение, поставляемое в комплекте с томографами. Последний ва-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-04-31257).

Основные физические свойства исследованных грунтов

Тип грунта	Плотность твердой фазы	Плотность грунта	Пористость	Массовая доля физического песка	Полная влагоемкость	Наименьшая влагоемкость	Гравитационная влага/капиллярно-подвешенная влага, объемные доли в почве
	г/см ³			% от массы			
Песок	2.55	1.71	0.33	100	29	21	0.11/0.22
Серая лесная почва	2.50	1.20	0.52	69	43	38	0.06/0.46

риант обладает большими возможностями, но программы, находящиеся в свободном доступе, менее требовательны к вычислительным ресурсам и допускают обработку изображений на большем числе компьютеров.

Целью работы являлось исследование влияния воды и нефти на структуру порового пространства грунта с применением разрушающих образцов методов и томографии в качестве взаимно уточняющих этапов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальную среду готовили из пахотного слоя серой лесной почвы Рыбнослободского р-на Республики Татарстан. На момент забора почва находилась под паром. Содержание органического вещества в ней составило 3% от веса почвы. Для унификации набивки экспериментальных сосудов почву готовили по стандартной для насыпных образцов методике: отбирали корни растений и инородные включения, измельчали, просеивали через сито 1 мм, тщательно перемешивали. Характеристики полученной экспериментальной среды приведены в таблице. Песок (диаметр зерен – не крупнее 0.4 мм, стерилизованный обработкой антибиотиком и прокаливанием) выбрали в качестве модельной среды, поровое пространство которой не усложнено органическим веществом.

После начальной подготовки создавали загрязненные нефтью варианты почвы и песка. В воздушно-сухом состоянии их перемешивали с масляно-нефтяной эмульсией (соотношение нефть : растительное масло – 1 : 1) из расчета 1 г нефти (2 г эмульсии) на 100 г сухого грунта. Масло вносили для более равномерного распределения нефти по поровому пространству. Смеси помещали в герметичные условия при комнатной температуре на 21 день. Периодически проводили механическое перемешивание смесей. Полученную концентрацию нефти проверяли методом сухого сжигания, она оказалась равной 1.2% от веса почвы.

Загрязненные и незагрязненные среды распределяли по экспериментальным сосудам диаметром 6 см слоем около 10 см в воздушно-сухом состоянии (2% влаги от веса серой лесной почвы

и 0% влаги от веса песка). Параметры сосудов задавали по образцу эксперимента с насыпными колонками, где показана стабилизация профиля почвенной влаги через 48 ч после полива [6]. Набивку сосудов производили, постоянно перемешивая грунт. После набивки сосудов с помощью полива создавали влажность, соответствующую наименьшей влагоемкости. Далее в течение опыта влажность поддерживали на постоянном уровне путем полива до установленного веса. Содержание влаги в почве проверяли при отборе проб, после сушки при температуре 105°C. Поверхность почвы прикрывали пленкой во избежание чрезмерного испарения и попадания инородных тел.

Образцы грунта сравнивали с контрольными вариантами: 1) почва, не содержащая нефти, 2) песок стерилизованный, 3) почва, содержащая нефть как фазу значительного объема.

Из традиционных методов анализа образцов использовали:

- взвешивание цилиндра с известным объемом для определения плотности грунта;
- пикнометрический – для определения плотности твердой фазы по изменению объема пробы после удаления воздуха;
- взвешивание сосудов с почвой после 24-часового насыщения почвы водой для определения полной влагоемкости и повтор взвешивания после свободного стекания влаги для определения наименьшей влагоемкости;

– седиментологический – для распределения частиц по размерам при оседании согласно урав-

$$\text{нению Стокса: } V = \frac{2r^2g(\rho_{\text{тв.ф}} - \rho_{\text{ж}})}{9\mu}.$$

Расчет пористости проводили из соотношения плотностей грунта и твердой фазы: $\varepsilon = 1 - \rho_{\text{почвы}}/\rho_{\text{тв.ф}}$. Доли гравитационной и капиллярно подвешенной влаги рассчитывали из сравнения полной влагоемкости и наименьшей влагоемкости [9].

Во избежание пристеночных эффектов для томографического исследования использовали центральную часть содержимого экспериментальных сосудов, отстоящую от стенок не менее чем на 2 см. Из нее отбирали керны, не допуская сдвига слоев, с помощью погружаемых в почву

пластиковых цилиндров с заостренным краем диаметром 11 мм и высотой 52 мм. Чтобы не происходило передвижения влаги, цилиндры запаивали, а съемку проводили в течение ближайших суток. Компьютерную томографию образцов почвы проводили на томографе General Electric Phoenix V|tome|X S240. Ускоряющее напряжение составляло 80–110 кВт, сила тока – 150–190 мА. Получали по 1200 проекций образца. При анализе проекций можно было оперировать элементами с диаметром порядка 50 мкм.

Проекции образцов подвергали компьютерной обработке с помощью пакета ImageJ [18] и внутреннего программного обеспечения в комплекте томографа. Распознавание твердой фазы и пор проводили по контрольным изображениям (песок 00, почва 00 – без нефти и почва 01 – с нефтью, образующей почти сплошную фазу) путем анализа гистограмм градаций серого и визуальной оценки. Таким образом, были найдены пороговые тона, разделяющие изображения пор, твердых частиц и мелкодисперсного вещества. Исходя из полученных результатов, анализировали снимки образцов, содержащих нефть и воду.

Вариантам опыта присвоили обозначения:

песок 00 – песок, не содержащий влаги и нефти (контрольный вариант);

песок 02 – абсолютно-сухой песок с нефтью в количестве 1% от веса (2% масляно-нефтяной эмульсии), распределявшейся 3 недели;

почва 00 – воздушно-сухая почва, не содержащая нефти (контрольный вариант);

почва 01 – воздушно-сухая почва с нефтью, добавленной за несколько часов до съемки в количестве 1/4 объема почвы (контрольный вариант);

почва 02 – воздушно-сухая почва с нефтью в количестве 1% от веса (2% масляно-нефтяной эмульсии), распределявшейся 3 недели;

почва 10 – почва, увлажненная до наименьшей влагоемкости за двое суток до съемки и не содержащая нефти;

почва 20 – почва, в которой влажность наименьшей влагоемкости поддерживали две недели, не содержащая нефти;

почва 12 – почва, увлажненная до наименьшей влагоемкости за двое суток до съемки, загрязненная нефтью, как в варианте почва 02;

почва 22 – почва, в которой наименьшая влагоемкость поддерживалась две недели, загрязненная нефтью, как в варианте почва 02.

Эти обозначения используются на всех приведенных в данной работе графиках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С практической точки зрения, лабораторное загрязнение моделировало ситуацию остаточного загрязнения нефтью сухой пахотной почвы.

Анализ снимков контрольных песка и почвы (образцы песок 00 и почва 00) проводили параллельно по гистограммам градаций серого и визуальной оценке выделяемых фрагментов. Диапазоны градаций серого для агрегатов, нефти и пор получились следующими (рис. 1):

0–63 – левый хвост усредненных гистограмм образцов почва 00 и песок 00, визуально соответствует порам в песке, крупным (видимым) порам в почве;

63–80 – промежуточный диапазон, визуально может принадлежать как отдельным частицам, так и порам;

80–137 – максимумы усредненных гистограмм образцов песок 00 и почва 00 и первый максимум образца почва 01 (с нефтью), визуально соответствует зернам песка, тонким фракциям почвы и нефти, когда она образует фазу в 1/4 объема образца;

137–170 – второй максимум усредненной гистограммы образца почва 00, визуально указывает на рассеянное вещество, тяготеющее к агрегатам, возможно, внутриагрегатные поры, единичные зерна песка;

170–255 – правый хвост гистограммы образца почва 00, второй максимум гистограммы образца почва 01 (этот способ сегментации принят авторами работы [2]), визуально выделяет почвенные агрегаты, единичные зерна песка.

Поперечный размер пор, объем которых был получен в 3D-модели, рассчитывали как диаметр цилиндра. Расчет диаметров частиц при седиментологическом анализе и по 2D-снимкам проводили из наиболее простых предположений о сферических частицах. Перевод доли твердой фазы на площади 2D-проекции в объемные доли вели по формуле:

$$\varepsilon = \omega^{3/2} / ((1 - \omega)^{3/2} + \omega^{3/2}), \quad (1)$$

где ω – доля плоского изображения определенного диапазона градаций серого. Результат этого расчета приведен на рис. 2. Следует обратить внимание на то, что расчет пористости по 2D-снимкам песок 00 (0.48) завывшал, а по 3D-модели снижал (0.11) ее относительно пикнометрического анализа песка. То есть ни предположения о форме частиц, ни введение функции извилистости пор в 3D-модель не оправдали себя. Кроме того, отклонение результатов могло быть связано с тем, что томографии подвергался сухой песок, а лабораторные анализы проводятся во влажной среде. В песке вода вызвала усадку с уменьшением пористости. Заметим, что наиболее близким было

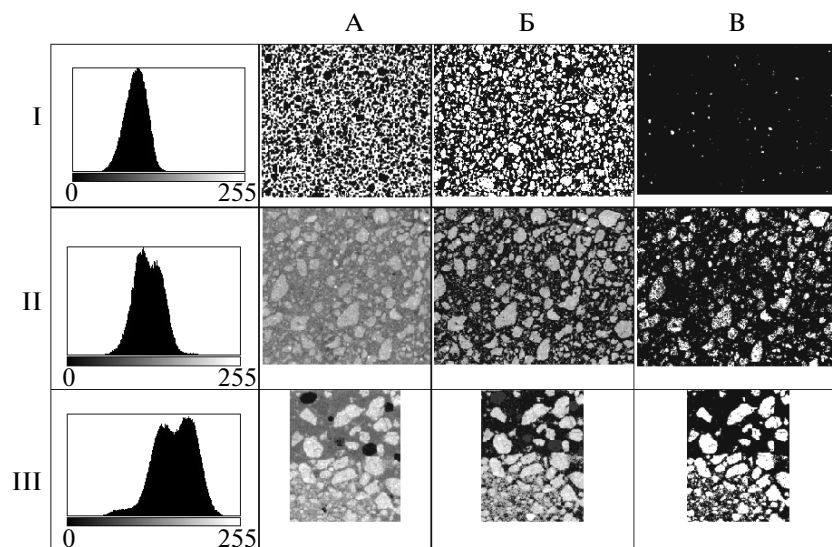


Рис. 1. Типичные сегментированные срезы томограмм и усредненные гистограммы градаций серого для образцов песок 00 (I), почва 00 (II) и почва 01 (III); пороги сегментации: А – 0–63; Б – 80–137; В – 170–255.

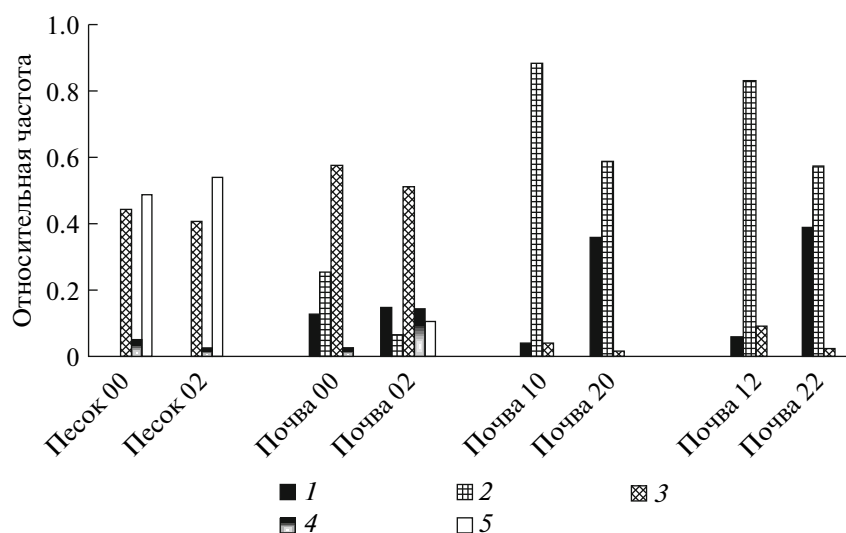


Рис. 2. Гистограммы градаций серого с укрупненными интервалами разбиения для исследованных грунтов, пересчитанные на объем по томографическим проекциям; интервалы градации серого: 1 – 255–170; 2 – 170–137; 3 – 137–80; 4 – 80–63; 5 – 63–0.

совпадение лабораторно определенной пористости контрольного образца песок 00 с томографически определенной пористостью 3D-модели нефтезагрязненного песка песок 02 (0.30).

Томография образцов выявила, что в верхней части образца почва 00 располагалось меньше крупных плотных частиц, чем в нижней (рис. 3). При набивке образцов песок 00 и почва 02 данная разница практически отсутствовала. Однако для анализа изображения расхождения между его верхней и нижней частью были незначимы, так как рассматривали средние по профилю величины. Обработка 2D- и 3D-снимков почвы 00

привела к одинаковому значению пористости – 0.03 (если считать пораи почвы диапазон градаций серого 0–80) – это в 2 раза меньше, чем доля гравитационных пор, определенная лабораторными методами. Остальная часть пор, очевидно, отображалась на снимках так же, как рыхлое вещество (градации 80–137).

Средний диаметр зерен песка, определенный по 2D-снимкам (рис. 4) более чем в 2 раза превышал полученный седиментологически – 0.125 мм. Средний диаметр частиц почвы по снимкам также был завышен относительно определенного седиментологически в 4 раза. Промачивание почвы в

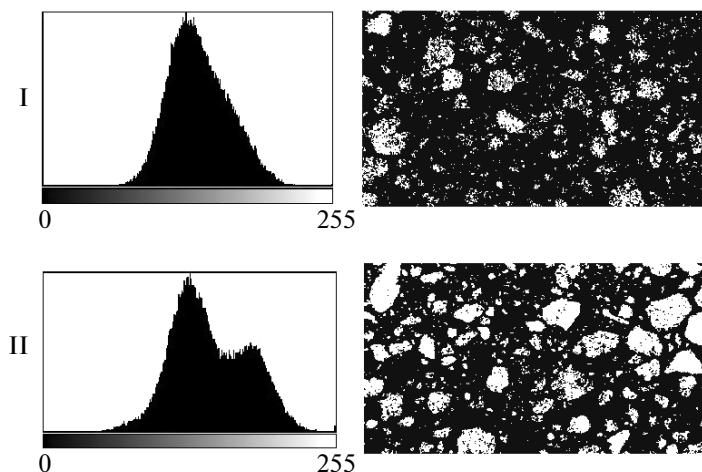


Рис. 3. Типичные сегментированные срезы томограмм верхней (I) и нижней (II) части сосуда с образцом почва 00 (воздушно-сухая почва, не содержащая нефти) и соответствующие гистограммы градаций серого (порог сегментации – 170).

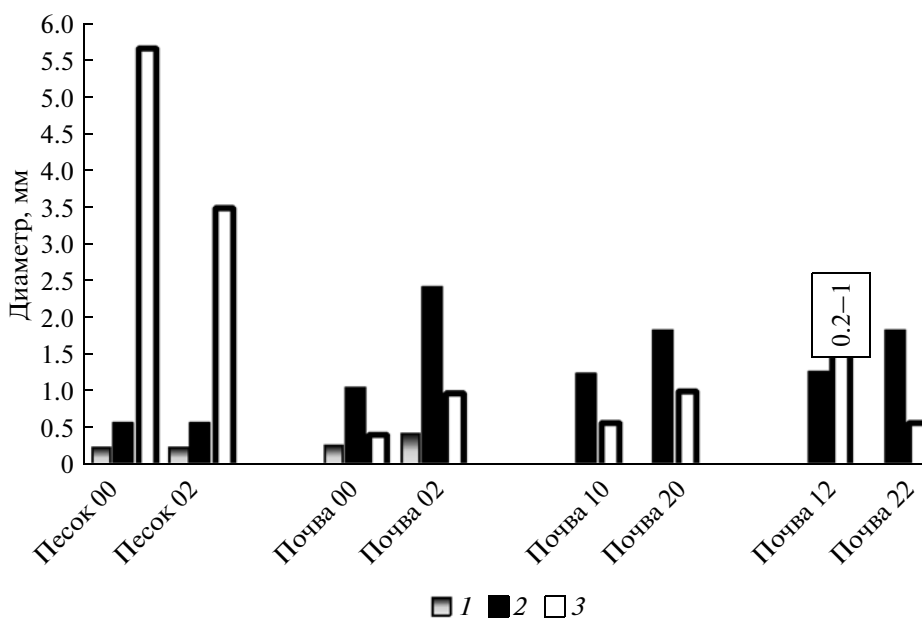


Рис. 4. Средний диаметр структурных элементов исследованных грунтов, рассчитанный по седиментации частиц и томографическим снимкам: 1 – агрегаты (седиментация); 2 – агрегаты на 2D-снимках; 3 – видимые поры на 3D-снимках.

ходе лабораторного анализа приводило к разрушению органического клея [9], соединяющего частицы в агрегаты, что могло послужить причиной наблюдаемого завышения. В песке такого клея нет, поэтому могли сыграть роль форма частиц, отличная от предполагаемой, и невидимые на снимке поры, разделяющие элементы. Поскольку причина обнаруженного завышения – пересечение порогов сегментации, общих для всех снимков, то оно нивелируется сравнением исследуемых вариантов с контролем.

Сравнение усредненных гистограмм градаций серого на снимках образцов песок 00 и песок 02 показало, что нефть повысила прозрачность пес-

чаных образцов для рентгеновских лучей (рис. 5). В присутствии нефти появилось больше пикселей с нулевым затенением и уменьшилось среднее значение тона снимка, из чего можно заключить, что стало больше пор, либо, что менее вероятно, нефть сократила рассеяние излучения частицами. Как видно (рис. 2), увеличился объем видимых пор, а их средний диаметр уменьшился на 40% (рис. 4). При этом анализ оседания частиц песка без нефти и с нефтью показал, что нефть склеивала частицы диаметра 50–100 мкм в агрегаты, в 2 раза более крупные (рис. 6). На томографических снимках этого укрупнения не видно (рис. 4), вероятно, в связи с близкими оттенками отобра-

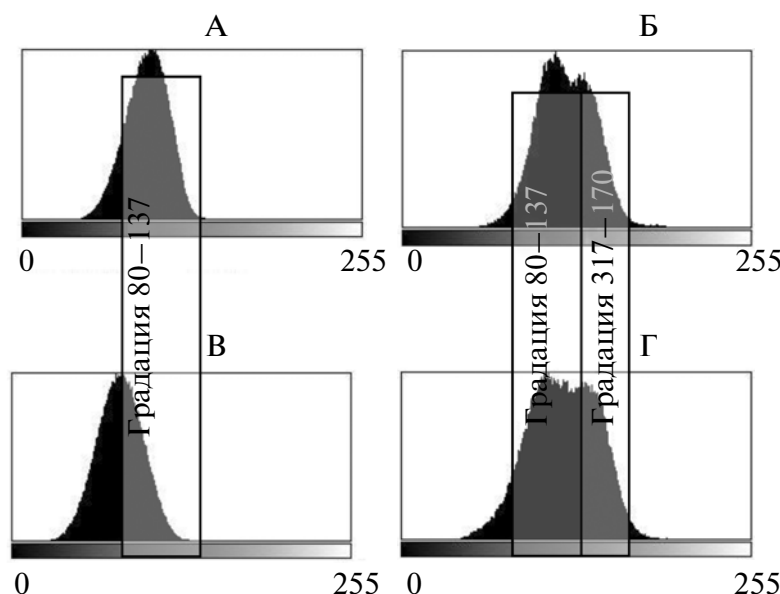


Рис. 5. Усредненные гистограммы градаций серого виртуальных срезов томограмм грунта без нефти (А – песок 00 и Б – почва 00) и с нефтью (В – песок 02 и Г – почва 02).

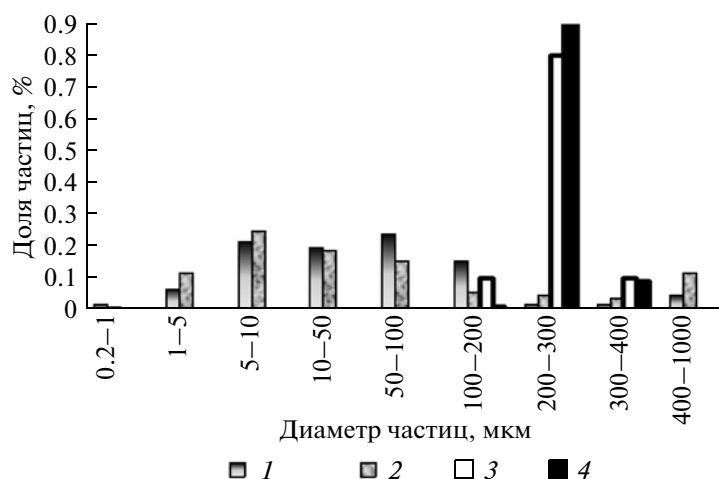


Рис. 6. Гранулометрический состав экспериментальных сред (1 – почва 00; 2 – почва 02; 3 – песок 00; 4 – песок 02), определенный по скорости седиментации частиц.

жения песка и нефти. Однако именно склеивание внутри постоянного объема должно было иметь следствием образование трещин, что отражается томографически.

Почва оказалась менее прозрачной средой для излучения, чем песок, о чем свидетельствует более высокий средний тон ее гистограмм (рис. 5). С одной стороны, здесь могло сыграть роль поглощение излучения глинистыми минералами или более сложная структура порового пространства почвы. Однако, с другой стороны, в отличие от песка в почве присутствовало органическое вещество, имеющее в десятки раз меньшую рентгеновскую плотность, чем песок. Оно занимало около 12% облучаемой площади и

вполне могло повлиять на увеличение прозрачности среды, что не наблюдали. Поэтому на данном этапе исследований вопрос о средней прозрачности остается открытым.

После загрязнения и распределения нефти в почве средний диаметр агрегатов увеличился приблизительно вдвое относительно контроля (рис. 4). Их объемная доля осталась прежней, о чем можно судить по рис. 2, где показаны укрупненные интервалы градаций серого с объемными долями на снимках, рассчитанными по формуле (1). То есть место нескольких небольших, но видимых на изображении агрегатов, под действием нефти занимал один агрегат большего размера. Кроме того, до загрязнения на снимке почвы

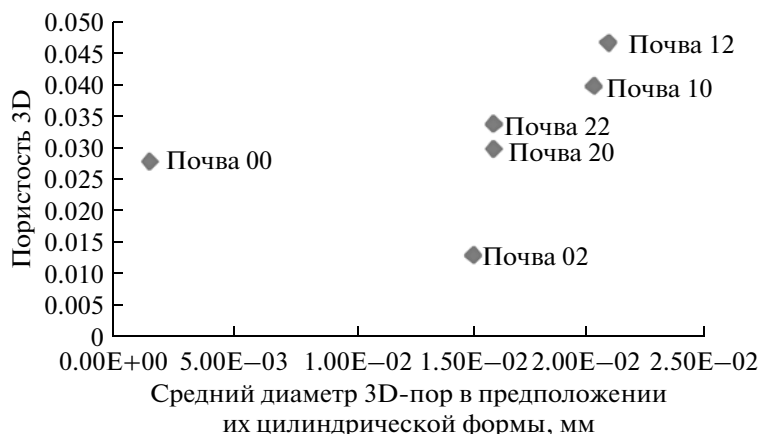


Рис. 7. Связь характеристик почвенных пор, полученных по томографической 3D-модели

(образец почва 00) практически не было рентгеновски прозрачных пикселей, а после загрязнения они появились, то есть стал значительным объем видимых пор, а их средний диаметр увеличился вдвое. Эти факты указывают на слипание почвенных агрегатов с растрескиванием отдельных областей почвы под действием нефти. Аналогичный процесс наблюдали в песке. Лабораторный анализ седиментации почвенных частиц подтвердил факт слипания увеличением доли частиц крупнее 100 мкм в 2.5 раза относительно почвы без нефти (рис. 6). Учитывая применение дополнительных мер (механических и химических) по разделению частиц при этом анализе, можно сказать, что нефть является прочным клеем для частиц, подвергшихся слипанию, то есть диаметром 50–200 мкм.

Тонкая фракция почвы под действием нефти перераспределась, однако не так, как ожидалось, исходя из изображения фазы нефти на снимке почва 01. Вместо возрастания доли условно рыхлого вещества наблюдали пятикратное увеличение доли фазы, пограничной между видимыми порами и тонкой фракцией почвы. На 3D-снимках почвы 02 зафиксировано уменьшение объема видимых пор по отношению к контрольному варианту почва 00 (рис. 7). Диаметр видимых пор при этом вырос по отношению к контролю в 2 раза. Уменьшение видимой пористости, наряду с увеличением средних размеров пор и видимых пор, может быть объяснено отображением самой нефти. Маловероятно, чтобы нефть вызвала реальное уплотнение рыхлой фазы почвы, так как для этого ей пришлось бы проникнуть в поры на грани характерного для себя размера – около 1 мкм. О характерном размере пор, занимаемых нефтью, можно судить по данным других анализов распределения органического вещества в почве [8, 13, 15]. В седиментологическом анализе выяснилось, что под действием нефти

(почва 02) произошло небольшое увеличение доли частиц диаметра 1–10 мкм, вероятно, за счет сокращения числа частиц диаметра 10–200 мкм. Обращает на себя внимание, что и в песке, и в почве внесение нефти сократило долю фракции 100–200 мкм, увеличив долю фракции 200–300 мкм. Учитывая эти факты, можно предположить, что и поры, в которые она проникла, немногим меньше этих размеров. Таким образом, несмотря на сложность идентификации отображения нефти на снимках, сравнение данных, полученных лабораторными и томографическими методами, позволило судить о ее действии на поровую среду.

Добавление воды в незагрязненную почву за двое суток до съемки (почва 10) привело к существенному сокращению объема видимых агрегатов и увеличению объема видимых пор. Однако в целом по отношению к снимкам почвы 00 наблюдался рост рентгеновской плотности. Тона здесь большей частью лежали в диапазоне градаций серого 137–170, соответствуя мелкодисперсному твердому веществу и, вероятно, внутриагрегатным порам. Доля снимка, покрытая этим диапазоном градаций серого, увеличилась по сравнению с вариантом почва 00, в основном, за счет уменьшения доли оттенков 80–137, то есть условно рыхлого вещества. 3D-модель показала увеличение среднего размера пор относительно сухого контроля (почва 00). При этом в лабораторных исследованиях изменения объема почвы при поливе не наблюдали. Эти результаты указывают на то, что вода снизила плотность крупных агрегатов и увеличила объем видимых пор за счет того, что рыхлое вещество стянулось в более плотную фазу, и объем невидимых на снимке пор уменьшился. Средний размер агрегатов и видимых пор остался почти таким же, как в сухой почве.

Визуально на виртуальных срезах можно зафиксировать последствия распределения воды в

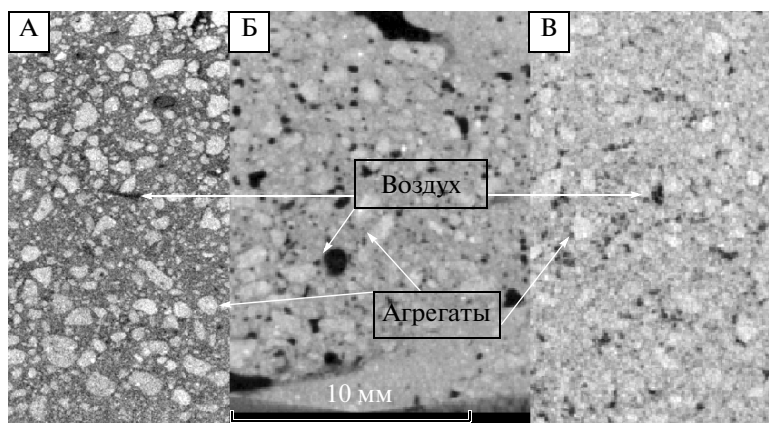


Рис. 8. Изменение типичных виртуальных срезов томограмм почв (А – почва 00, Б – почва 10, В – почва 20) под действием увлажнения.

почве на протяжении двух недель (почва 20) (рис. 8). Агрегаты вновь уплотнились, а их доля выросла в 3 раза по отношению к сухой почве. Средний размер агрегатов и видимых пор вырос почти в 2 раза. Таким образом, если двухдневное присутствие воды в почве привело к доминированию единственной фазы, отображаемой в градациях серого 137–170, то двухнедельное – к выделению двух значимых фаз в градациях 137–170 и 170–255. Причем доля оттенков 137–170 на снимках увлажненной почвы 20 почти в точности соответствует доле тонов 80–137 на снимках сухой почвы 00. Это позволяет предположить, что вода разместилась в фазе, соответствующей тонам 80–137 (тонкая фракция почвы) на снимках сухой почвы, за две недели увеличила ее плотность, например, за счет стягивания стенок пор, и соответственно придала ей тона 137–170 на снимках влажной почвы. Это не противоречит физической реальности, так как вода со временем стремится занимать более мелкие поры [1, 16]. Следовательно, изменение почвы под действием воды отражается в укрупнении агрегатов и уплотнении мелкодисперсного вещества. Долговременное присутствие воды (почва 20), так же как нефти (почва 02), способствовало увеличению среднего диаметра структурных элементов (пор и частиц) рассчитанные по томограммам. При этом вода вызвала менее выраженное укрупнение агрегатов, чем нефть. Необходимо отметить, что не наблюдали линейной связи между средним диаметром пор и видимой пористостью 3D-моделей образцов.

Добавление воды в нефтезагрязненную почву сказалось на гистограммах градаций серого почти так же, как ее добавление в почву без нефти. В случае нефтезагрязненной почвы (почва 12) по отношению к свежееувлаженному варианту без нефти (почва 10) несколько повысилась доля диапазона градаций серого 80–137, который мог соответствовать либо изображе-

нию самой нефти, либо тонким фракциям почвы. Однако изменение размера структурных элементов, видимых на томограммах, под действием воды в нефтезагрязненной почве произошло не так, как в незагрязненной. При двухсуточном промачивании наблюдалось сложение эффектов нефти и воды в увеличении среднего диаметра видимых пор 3D-модели образца почва 12, здесь он в 3 раза превышал диаметр контрольного варианта почва 00. В то же время полив в течение двух недель приводил к возвращению видимого диаметра пор на уровень контрольного. Полив как незагрязненной, так и нефтезагрязненной почвы выявил близкие тенденции роста пористости и среднего диаметра пор 3D-модели по отношению к контрольному варианту почва 00. При этом видимая пористость так же, как диаметр пор, резко увеличивались в первые 2 дня полива и снижались на протяжении последующих двух недель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компьютерная рентгеновская томография – информативный метод изучения крупных частиц и пор, как в сухой, так и в увлажненной среде. Ее основное преимущество заключается в возможности наблюдать внутреннее пространство грунта, не нарушая его.

На томографических снимках выделены диапазоны градаций серого, соответствующие почвенным агрегатам, песчаным зернам, видимым порам, тонким фракциям почвы и нефти. Показано, что нефть томографически отображалась в тех же тонах, что и песок, а почвенные агрегаты – как более плотное для рентгеновских лучей вещество.

Поставлены в соответствие характеристики пористости и гранулометрического состава исследованных сред, полученные лабораторными и томографическими методами. Выявлено несоответствие геометрических форм структурных эле-

ментов порового пространства, предполагаемых при анализе томографических снимков, формам, предполагаемым при лабораторном анализе. Это вызвало существенные расхождения в определении пористости разными методами и завышение диаметра твердых частиц на снимках.

Определено влияние нефти и воды на размер крупных элементов песка и почвы: видимых пор и частиц. По томографическим снимкам и в ходе седиментации установлены факты кажущегося укрупнения частиц песка и почвы и сопутствующее растрескивание под действием как нефти, так и воды. Выявлено, что долговременное присутствие воды способствовало увеличению среднего диаметра пор почвы настолько же, насколько долговременное присутствие нефти. При этом вода вызвала менее выраженное укрупнение агрегатов, чем нефть. В присутствии и той, и другой жидкостей наблюдалось уплотнение агрегатов почвы. Вероятно, в случае воды уплотнение было реальным и вызывалось стягиванием мелких частиц, составляющих агрегаты, капиллярными силами. В случае нефти видимое уплотнение вещества могло быть вызвано ее отображением на снимке. Видимая пористость 3D-модели под действием воды возрастала, а под действием нефти уменьшалась.

Совместное действие воды и нефти в течение двух суток привело к взаимному дополнению эффекта образования крупных пор. При этом через две недели размер видимых пор вернулся на уровень контрольного варианта. Полив нефтезагрязненной почвы приводил к увеличению ее видимой пористости через двое суток с превышением контрольного значения. После двух недель полива видимая пористость несколько уменьшалась. Такая динамика образования пор может сказаться на повышении способности нефтезагрязненной почвы к инфильтрации, например, дождевой воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусова И.А., Костерин А.В. Защитные свойства трещиновато-пористой зоны аэрации при загрязнении грунтовых вод углеводородными жидкостями // Водные ресурсы. 2004. № 2. С. 242–246.
2. Герке К.М., Корост Д.В. Применение высокопроизводительных вычислительных методов для определения свойств пород-коллекторов: [Электронный ресурс] // Сб. мат-лов 2-й научно-практической конференции “Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли”, 2011 URL: http://www.hpc-oilgas.ru/hpc-oilgas/files/019_Gerke.pdf (дата обращения 25.07.2013).
3. 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.
4. Джиошвили О.А., Рубилов С.Н., Галишев М.А. Экспериментальное исследование влияния физических свойств почвенных отложений на их нефтенасыщение при анализе чрезвычайных ситуаций в северных регионах // Вестник Санкт-Петербургского ун-та ГПС МЧС России. 2012. № 1. С. 16–24.
5. Корост Д.В., Калмыков Г.А., Янаскурт В.О., Иванов М.К. Применение компьютерной микро-томографии для изучения строения терригенных коллекторов // Геология нефти и газа. 2010. № 2. С. 36–42.
6. Костерин А.В., Софинская О.А. Моделирование деградации n-тридекана в условиях различной влажности почвы // Почвоведение. 2010. № 6. С. 1–8.
7. Новогрудский Д.М. Влияние размеров почвенных частиц на распределение почвенных микроорганизмов // Микробиология. 1947. Т. 16. Вып. 2. С. 147–153.
8. Способ определения пространственного распределения и концентрации компонента в поровом пространстве пористого материала: патент (19) RU 2467316 С1. Российская Федерация: МПК G01N 23/083 (2006.01) / Михайлов Д.Н., Надеев А.Н., Хлебников В.Н., Зобов П.М. Пат. № 2011125733/28. Опубликовано 20.11.2012. Бюл. № 32. 8 с.
9. Шейн Е.В. Курс физики почвы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
10. Anderson S.H., Wang H., Peyton R.L., Gantzer C.J. Estimation of porosity and hydraulic conductivity from X-ray CT-measured solute breakthrough // Application of X-ray computed tomography in the geosciences. London: The Geological Society, 2003. 234 p.
11. Falconer R.E., Houston A.N., Otten W., Baveye P.C. Emergent behavior of soil fungal dynamics: influence of soil architecture and water distribution // Soil Science. 2012. V. 177. P. 111–119.
12. Kravchenko A.N., Wang W., Smucker A.J.M., Rivers M.L. Long-term differences in tillage and land use affect intra-aggregate pore heterogeneity // Soil Sci. Soc. Am. J. 2011. V. 75. P. 1658–1666.
13. Li G., Huang W., Lerner D.N., Zhang X. Enrichment of degrading microbes and bioremediation of petrochemical contaminants in polluted soil // Water Res. 2000. № 15. P. 3845–3853.
14. Mees F., Swennen R., Van Geet M., Jacobs P. Application of X-ray computed tomography in the geosciences // Application of X-ray computed tomography in the geosciences. London: The Geological Society, 2003. 234 p.
15. Mtambanengwe F., Mapfumo P., Kirchmann H. Decomposition of organic matter in soil as influenced by texture and pore size distribution // Managing nutrient cycles to sustain soil fertility in sub-Saharan Africa. Nairobi: Academy Science Publishers, 2004. 608 p.
16. Ritz K., Young I.M. Interactions between soil structure and fungi // Mycologist. 2004. V. 18. P. 52–59.
17. Wang W., Kravchenko A.N., Smucker A.J.M., Rivers M.L. Comparison of image segmentation methods in simulated 2D and 3D microtomographic images of soil aggregates // Geoderma. 2011. V. 162. P. 231–241.
18. Официальный сайт программы ImageJ в России: [электронный ресурс]. 2012. URL: <http://www.imagej.ru> (дата обращения 23.06.2012).