

Оригинальная статья

УДК 502/504: 631.6.02:631.434.12:57.087.3

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-19-26

## СИСТЕМА РЕНТГЕНОСКОПИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ В ЦЕЛЯХ ТОЧНОГО МЕЛИОРАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

**ШАБАНОВ ВИТАЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**<sup>1</sup>✉, д-р техн. наук, профессор  
515vvsh@gmail.com

**ГРАБОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ**<sup>2</sup>, канд. техн. наук., директор отделения  
angara@triniti.ru

**ГРИБОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ**<sup>2</sup>✉, канд. техн. наук., начальник лаборатории  
gribov@triniti.ru

**ШИШЛОВ АЛЕКСАНДР ОЛЕГОВИЧ**<sup>2</sup>, младший научный сотрудник  
shishlov@triniti.ru

**БОДЯГИН СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ**<sup>2</sup>, инженер  
bodyagin@triniti.ru

**МИТРОФАНОВ КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ**<sup>2</sup>✉, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник  
mitrofan@triniti.ru

**СТРИЖНИКОВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ**<sup>3</sup>, аспирант  
oleg.strijnikov@yandex.ru

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

<sup>2</sup> АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНИЦ РФ ТРИНИТИ», РОСАТОМ); 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (ВНИИГиМ), РАН, Москва; 127550, ул. Б. Академическая, 44, Россия

Рассмотрена проблема построения системы управления плодородием мелиорируемых земель. Констатируется, что возможными причинами неудачного приумножения в плодородия являются не только неполная формулировка понятия плодородия в законах, но и отсутствие эффективных инструментов оценки органического вещества в почве. Рассматриваются возможности и некоторые эксперименты по использованию рентгеновского микроскопа для оценки органического вещества почвы. Обсуждены методические вопросы подготовки образцов для исследования, устанавливается возможность определения биомассы почвенного биотического сообщества по результатам рентгеноскопии почвенного образца. Анализ рентгеновских снимков торфяных почв показал возможность определения в образце органического вещества (48%), воды (30%), воздуха (20%), минеральных частиц (менее 2%). Появилась возможность проанализировать объем ризосферы корня растения, пространства, в котором происходят основные процессы подготовки почвенной биотой питательного «субстрата» для растения. Учитывая то, что рентгеновское излучение данного микроскопа не повреждает живые ткани, предположительно можно наблюдать динамику изменения ризосферы, таким образом визуализируя процессы изменения актуального плодородия во времени. Обсуждены перспективы использования этой методологии для мелиоративных исследований, связанных с управлением плодородием мелиорируемых земель в рамках концепции развития точного мелиоративного регулирования факторов внешней среды, в сферу которого входят не только растение, но и почвенная биота. Предполагается, что рассмотренная методология может быть использована для управления (минимизации) «углеродного следа» при мелиорации земель.

**Ключевые слова:** мелиорируемые земли, плодородие, рентгеноскопические методы исследования почв, точная мелиорация

**Формат цитирования:** Шабанов В.В., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Шишлов А.О., Бодягин С.Ю., Митрофанов К.Н., Стрижников О.А. Система рентгеноскопической визуализации органического вещества в почве в целях точного мелиоративного регулирования // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 19-26. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-19-26.

© Шабанов В.В., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Шишлов А.О., Бодягин С.Ю., Митрофанов К.Н., Стрижников О.А., 2022

Original article

# FLUOROSCOPIC IMAGING SYSTEM OF ORGANIC MATTER IN THE SOIL FOR PRECISE RECLAMATION REGULATION

**SHABANOV VITALIJ VLADIMIROVICH**<sup>1</sup>✉, *doctor of technical sciences, director of the department, professor*

515vvsh@gmail.com

**GRABOVSKY EVGENIJ VALENTINOVICH**<sup>2</sup>, *candidate of technical sciences, director of the department*

angara@triniti.ru

**GRIBOV ALEXANDR NIKOLAEVICH**<sup>2</sup>✉, *candidate of technical sciences, head of the laboratory*

gribov@triniti.ru

**SHISHLOV ALEXANDR OLEGOVICH**<sup>2</sup>, *junior researcher*

shishlov@triniti.ru

**BODYAGIN SERGEY YURJEVICH**<sup>2</sup>, *engineer*

bodyagin@triniti.ru

**MITROFANOV KONSTANTIN NIKOLAEVICH**<sup>2</sup>✉, *doctor of physical-mathematical sciences, leading researcher*

mitrofan@triniti.ru

**STRIZHNIKOV OLEG ALEXANDROVICH**<sup>3</sup>, *graduate student*

oleg.strizhnikov@yandex.ru

<sup>1</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49, Russia

<sup>2</sup> Joint Stock Company «State Research Center of the Russian Federation, Troitsk Institute of Innovation and Fusion Research» (JSC «SRC RF TRINITI», ROSATOM); 108840, Moscow, Troitsk, ul. Pushkovykh, vl. 12, Russia

<sup>3</sup> All-Russian research institute of hydraulic engineering and land reclamation named after A.N. Kostyakov (VNIIGiM), RAS: Moscow, 127550, Academicheskaya, 44, Russia

*The problem of building a fertility management system for reclaimed lands is considered and it is stated that a possible cause of failures in increasing fertility is not only the incomplete formulation of the concept of fertility in the laws, but also the lack of effective tools for assessing organic matter in the soil. Possibilities and some experiments on the use of an X-ray microscope to assess soil organic matter are being considered. Methodological issues of preparing samples for research are discussed, and the possibility of determining the biomass of the soil biotic community based on the results of fluoroscopy of the soil sample is established. Analysis of X-ray images of peat soils showed the possibility of determining in the sample organic matter (48%), water (30%), air (20%), mineral particles less than 2%. It became possible to see and analyze the volume of the rhizosphere of the root of the plant, the space in which the main processes of preparing the nutrient «substrate» for the plant with soil biota take place. Given that the X-ray radiation of this microscope does not damage living tissues, presumably, it is possible to observe the dynamics of changes in the rhizosphere, thus visualizing the processes of change in actual fertility over time. The prospects for using this methodology for reclamation studies related to the management of the fertility of reclaimed lands within the framework of the concept of development of accurate reclamation regulation of environmental factors, the scope of which includes not only the plant, but also the soil biota, were discussed. It is assumed that the considered methodology can be used to manage (minimize) the «carbon footprint» in land reclamation.*

**Keywords:** reclaimed lands, fertility, fluoroscopy methods of soil research, precise land reclamation

**Format of citation:** Shabanov V.V., Grabovsky E.V., Gribov A.N., Shishlov A.O., Bodyagin S.Yu., Mitrofanov K.N., Strizhnikov O.A. Fluoroscopic imaging system of organic matter in the soil for precise reclamation regulation // *Prirodoobustrojstvo*. – 2022. – № 3. – P. 19-26. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-19-26.

**Введение.** Актуальность оценки плодородия (органического вещества и функционирования почвенной биоты в почве) на мелиорируемых землях. В современных условиях основными для мелиорации становятся природоохранные требования. Концепция «углеродного следа» может сыграть негативную

роль в развитии сельского хозяйства России в связи с тем, что зарубежные «партнеры» из других стран будут налагать «углеродные пошлины» на наши экспортные продукты, при этом стараясь не учитывать роль в поглощении парниковых газов наших природных экосистем.

Известно, что основные парниковые газы выделяет почва. Эти процессы особенно ускоряются при «интенсивных» системах земледелия (большое количество удобрений и ядохимикатов), которые угнетают почвенную биоту. Решающую роль в минимизации отрицательных последствий интенсивного земледелия может сыграть точная мелиорация как система, управляющая не только средой обитания растения, но и целенаправленно – средой обитания почвенной биоты.

Признание почвенной биоты самостоятельным объектом управления наряду с растением и разработка мелиоративных методов управления почвенной биотой помогут решить задачу восстановления плодородия мелиорируемых земель и прекращения деградации (ветровая и водная эрозия) сельскохозяйственных земель вообще. Однако этого нельзя достичь без выполнения определенного условия, а именно формулирования понятия плодородия в нормативных документах в следующем виде: «Плодородие, способность почвы создавать оптимальные условия для растений и почвенной биоты».

Почвенное биотическое сообщество, «перерабатывающее» органическое вещество в почве, создает актуальное (необходимое для растения в каждый момент жизни) плодородие. Но для любого метода управления плодородием необходим метод мониторинга органического вещества в почве.

Существующие методы, основанные на «сжигании» (физическом или химическом) органического вещества почвы, не дают возможности следить за трансформацией органического вещества в процессе вегетации и оценивать эффективность различных приемов мелиоративного регулирования. В этой ситуации необходим «неразрушающий контроль» массы почвенной органики. Инструментами такого контроля могут явиться приборы, основанные на рентгенографическом принципе визуализации материи. В данном случае необходим прибор, дающий возможность не только дифференцировать отдельные физические среды, но «проникать» внутрь органической материи и видеть не только контуры, но и «объемы» живого вещества. Кроме того, прибор должен быть безопасным для людей и в целом живого вещества, то есть иметь мягкое рентгеновское излучение. Такой аппарат был разработан в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

**Материалы и методы.** Объектом для проверки работоспособности рассматриваемого метода были образцы торфяной почвы, используемые при проведении опытов в рамках темы (ВНИИГиМ и Проблемная лаборатория РГАУ-МСХА) «...по оценке влияния хлореллы,

очищающей дренажные стоки с мелиорируемых земель, на активность почвенной биоты».

Опыт заключался в проведении рентгенографического анализа почвы при различных способах подачи хлореллы с оросительной водой в процессе проращивания семян перца сорта Раширо. Образцы брались из верхнего слоя, непосредственно примыкавшего к корневой системе. В качестве модели торфяной почвы для проведения опытов был выбран универсальный почвогрунт фирмы Гера. Состав данного субстрата включает в себя, мг/л, – азот (*N*) (200); фосфор (*P2O5*) (200); калий (*K2O5*) (200). Серии опытов: (1) полив дистиллированной водой; (2) полив пророщенных семян перца с применением хлореллы (плотность – 15 млн кл/мл) на разных глубинах (одноразовая закладка хлореллы на глубине 6 см и 12 см); поверхностный полив суспензией хлореллы (через день, по 0.38 объема сосуда с растением – примерно до ПВ).

Наблюдение за растениями проводилось на протяжении 10 дней. Результаты эксперимента представлены в таблице 1. Более активное развитие было отмечено на варианте с регулярным поливом суспензией хлореллы.

Метод исследований основан на использовании рентгеновского аппарата ТРИНИТИ (МХ-1) для проекционной рентгенографии биологических объектов. Получение высокого пространственного разрешения на рентгеновских снимках объектов просвечивания возможно, когда источник излучения достаточно мал. Этим набором свойств обладает источник рентгеновского излучения X-пинч (Икс-пинч).

Источник рентгеновского излучения был создан в 70-е гг. прошлого столетия [1]. X-пинч представляет собой несколько скрещенных в одной точке проволок микронного размера, через которые пропускается импульс тока с амплитудой несколько десятков килоампер. В результате прохождения импульсного тока через перекрещенные проволоки возникает рентгеновский импульс длительностью <1 наносекунды с энергией квантов в диапазоне 2-7 кэВ, который излучается из области 1-2 мкм.

С использованием опыта, накопленного на крупных установках в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», разработан новый аппарат Микс-1 (МХ-1) на основе X-пинча для исследований в медицине, биологии и сельском хозяйстве. В отличие от применяемых в настоящее время рентгеновских аппаратов он не требует специальной защиты человека от рентгеновского излучения.

Рентгеновский аппарат Микс-1 предназначен для просвечивания биологических объектов размером до 1 см с максимальным разрешени-

ем 1-2 мкм. Благодаря простоте управления он не требует высококвалифицированного персо-

нала и может легко обслуживаться сотрудниками медицинской или биологической лаборатории.

Таблица 1

## Рост растений перца (при поливе суспензией хлореллы и чистой водой)

Table 1

## Growth of pepper plants (when watering with chlorella suspension and clean water)

Вариант опыта <i>Variant of the experiment</i>	Относительная длина проростка перца ( $l_{отн} = li/l_{max}$ ) <i>Relative length of pepper sprout (<math>l_{отн} = li/l_{max}</math>)</i>				
	Повторность / <i>Repetition</i>				Среднее / <i>Average</i> ± ср ошибка / <i>error</i>
	1	2	3	4	
<b>Контроль (полив дистиллированной водой). Первый вариант</b> <i>Control (watering with distilled water). First variant</i>	0,43	0,43	0,57	0,5	0,48 (± 0.07)
<b>Одноразовая закладка хлореллы на глубину 12 см. Второй вариант</b> <i>Single laying of chlorella to a depth of 12 cm. Second variant</i>	0,57	0,43	0,57	0,67	0,56 (± 0.04)
<b>Одноразовая закладка хлореллы на глубину 6 см. Третий вариант</b> <i>Single laying of chlorella to a depth of 6 cm. Third variant</i>	0,57	0,57	0,57	0,5	0,55 (± 0.02)
<b>Регулярный полив суспензией хлореллы сверху. Четвертый вариант</b> <i>Regular watering with chlorella suspension from above. Fourth variant</i>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Основные характеристики аппарата:

- габариты – 1400 × 600 × 1400 мм<sup>3</sup>
- вес – около 300 кг
- длительность импульса излучения ≤ 1 нс
- объект съемки (≤ 1 см) в атмосфере
- сменная нагрузка на 5 излучателей, позволяющая сделать несколько кадров без вскрытия вакуумной камеры
- энергия излучения – 1 ÷ 7 кэВ (0.2-1.2 нанометра),
- мощность излучения – 50-300 мегаватт
- линейное увеличение от 1:4 до 1:12
- отсутствие излучения, опасного для находящихся вблизи сотрудников
- Управление, осуществляемое от компьютера
- мгновенная регистрация на цифровой фотоаппарат с выводом на компьютер

Важным преимуществом данного аппарата является то, что живые объекты в момент съемки находятся в воздухе и остаются неповрежденными (живыми); можно наблюдать физиологические процессы, а не только анатомию объектов. Небольшой размер аппарата позволяет его перемещать вручную на колесах.

На рисунке 1 представлены общий вид рентгеновского аппарата Микс-1 и размещение его элементов на верхней крышке.

Рентгеновский аппарат состоит из двух, объединенных в одну конструкцию, шкафов: шкафа высокоточного генератора и шкафа системы управления, вакуумной камеры с размещенной на ее крышке предметной камерой, где располагаются объекты для просвечивания, системы регистрации изображений и управляющего компьютера. В шкафу высокоточного генератора располагается сам генератор с высоковольтной системой запуска, который формирует в нагрузке импульс тока. В шкафу системы управления располагаются блоки зарядки генератора и контроллер управления, который обеспечивает автоматическую работу аппарата. Управляющий компьютер с помощью специальной программы управляет контроллером управления и системой регистрации изображений для подготовки цифровой камеры перед пуском и копирования файлов изображений объектов на компьютер.

Исследуемый образец находится в атмосфере и не повреждается при получении изображения. Образец помещается в конверт размером около 1 см из тонкой лавсановой пленки, устанавливается на пластине и опускается в предметную камеру, затем производится пуск генератора. Изображение записывается на флэш-память, с которой считывается на компьютер, входящий в состав Микс-1. С помощью аппарата



Микс-1 можно производить серию снимков с интервалом в несколько минут, не повреждая

образец, что позволяет наблюдать изменения в почве или в ином образце.

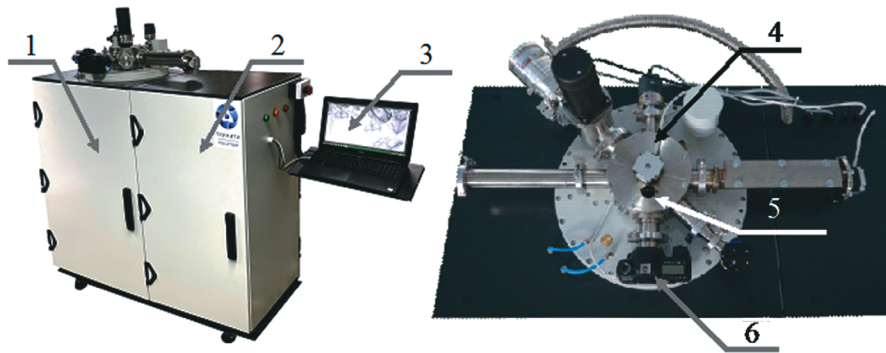


Рис. 1. Общий вид рентгеновского аппарата Микс-1:

- 1 – шкаф сильноточного генератора с высоковольтной системой запуска; 2 – шкаф системы управления; 3 – управляющий компьютер; 4 – вакуумная камера; 5 – предметная камера с образцом; 6 – система регистрации изображений

Fig. 1. General view of the X-ray machine Mix-1:

- 1 – high-current generator cabinet with high-voltage starting system, 2 – control system cabinet, 3 – control computer, 4 – vacuum chamber, 5 – object chamber with sample, 6 – image recording system

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке 2 представлена рентгенограмма корня растения с проволоками толщиной 20 мкм, полученная на рентгеновском аппарате Микс-1.

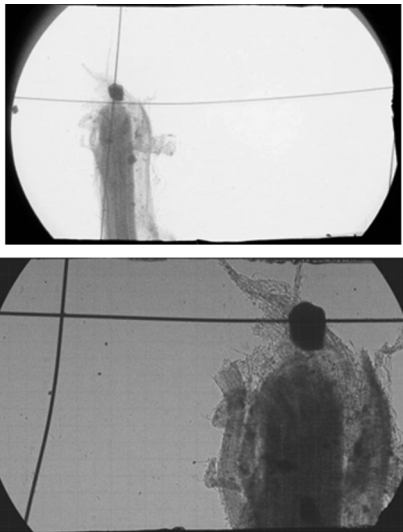


Рис. 2. Рентгенограмма ризосферы и корня растения:

диаметр – от 300 до 400 мкм; максимальная «толщина» слоя – 100 мкм; сетка размером 100 × 100 мкм<sup>2</sup>

Fig.2. Radiograph of the rhizosphere and root of the plant:

(diameter from 300 to 400 μm).

The maximum «thickness» of the layer is 100 μm.

The grid has a size of 100 × 100 μm<sup>2</sup>

С помощью рентгеновского аппарата были проведены четыре серии экспериментов по просвечиванию почвы с добавлением хлореллы. Результаты этих экспериментов

представлены в таблице 2, где показаны рентгенограммы образцов почвы (левая колонка) и их оптические изображения (правая колонка), полученные с помощью микроскопа.

Если увеличить и осветлить кадр 1 рисунка 2, то можно рассчитать площади различных субстанций: органика, вода, воздух, минеральная часть.

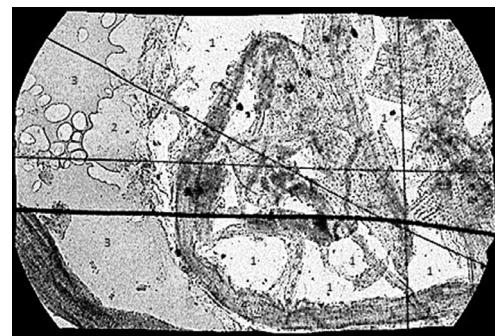


Рис. 3. Рентгеновский снимок почвы, вариант 1 (полив дистиллированной водой).

Номера на снимке: 1 – воздух в поровом пространстве; 2 – пузыри воздуха в воде; 3 – вода в порах; 4 – органическое вещество; пятна черного цвета – минеральные частицы.

Прямые линии на снимке – масштабные проволоки диаметром 6 и 20 мкм, которые во много раз меньше измеряемых объектов, что свидетельствует о высокой точности метода

Fig. 3. Soil X-ray, variant 1 (distilled water irrigation).

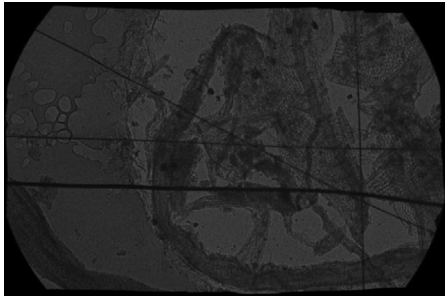

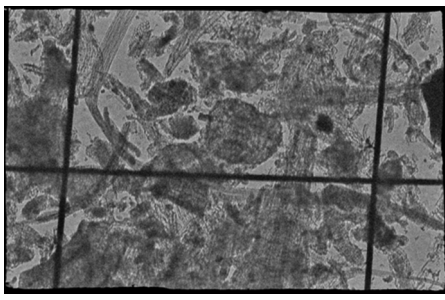
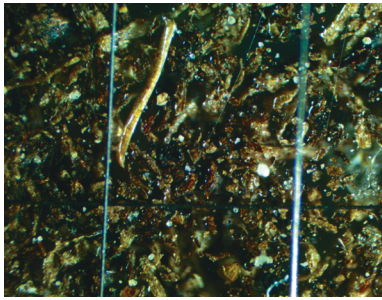
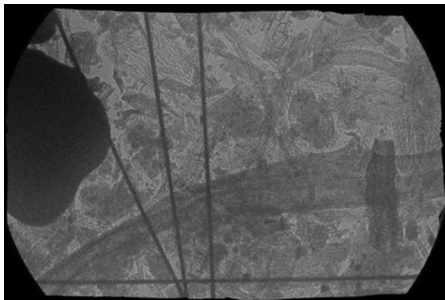

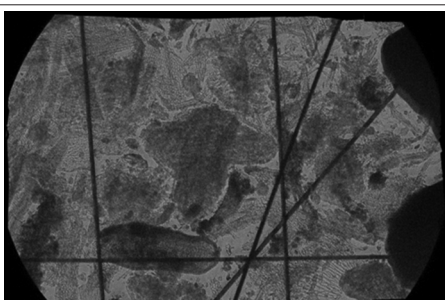

Numbers in the picture: 1- air in the pore space; 2 – air bubbles in water; 3 – water in the pores; 4 – organic matter; black spots – mineral particles.

Straight lines in the image are large-scale wires of a diameter of 6 and 20 μm, which are many times smaller than the measured objects, which indicates the high accuracy of the method

## Рентгенограммы почвенных образцов

Table 2

## Radiographs of soil samples

1		2	
3		4	
5		6	
7		8	

**Первый вариант.** Контроль (полив дистиллированной водой). Кадр 1 – рентгенограмма; кадр 2 – оптический микроскоп.

**Второй вариант.** Одноразовая закладка хлореллы на глубину 12 см. Кадр 3 – рентгенограмма; кадр 4 – оптический микроскоп.

**Третий вариант.** Одноразовая закладка хлореллы на глубину 6 см. Кадр 5 – рентгенограмма; кадр 6 – оптический микроскоп.

**Четвертый вариант.** Регулярный полив суспензией хлореллы сверху. Кадр 7 – рентгенограмма; кадр 8 – оптический микроскоп.

*The first variant. Control (watering with distilled water) – frame 1 radiograph; frame 2 – optical microscope;*

*The second variant. Single laying of chlorella to a depth of 12 cm; frame 3 – radiograph; frame 4 – optical microscope;*

*The third variant. Single laying of chlorella to a depth of 6 cm; frame 5 – radiograph; frame 6 – optical microscope;*

*The fourth variant. Regular watering with a suspension of chlorella from above; frame 7 – radiograph; frame 8 – optical microscope*

Обработка снимка заключается в определении площади отдельных субстанций почвы. Такие расчеты можно делать в различных

компьютерных программах, но можно рассчитать, нанеся сетку в программе word. Расчеты показали, что содержание воздуха в данном



образце с учетом воздушных пузырьков в жидкости составляют около 20%, воды – 30%, органики – более 48%, минеральных частиц – менее 2%. Данные измерений соответствуют торфу со средней степенью разложения при влажности почвы около 0.6 ПВ (полной влагоемкости). В первом приближении, считая почвенное пространство трехмерно однородным, можно полагать, что объем органического вещества будет оставаться в тех же пропорциях.

Особый интерес представляет возможность визуализации ризосферы. Известно, что основные процессы подготовки «усвояемого продукта» для растения происходят именно в этой зоне. Здесь же находится и основная масса активной почвенной биоты, которая и определяет актуальное плодородие, поэтому объемы ризосферы могут косвенно характеризовать и плодородие.

Из рисунка 3 следует, что диаметр ризосферы составляет около 240 мкм (по данным литературы – до 8 мм = 8000 мкм). В связи с тем, что «мягкое» рентгеновское излучение не разрушает живое вещество, возможно наблюдение продолжения роста корня, которое будет зависеть от комплекса факторов жизни растения (температуры, концентрации раствора, вида растения и интенсивности деятельности почвенной биоты в этой зоне).

Таким образом, используя методику рентгенографической визуализации почвы, можно создать систему мониторинга почвенной органики и плодородия как процесса взаимодействия растения с почвенной биотой, источником энергии для которого является органическое вещество. Это существенным образом может помочь точной мелиорации [8] выполнить свои задачи.

В настоящее время разрабатывается методика определения элементного состава образца, что особенно интересно для быстрого анализа почвы. По снимкам с различными фильтрами, меняющими энергию квантов излучения X-пинча, задавшись предположением об элементном составе почвы, в принципе

можно определить долю углерода в образце, и тем самым – долю органического вещества.

С другой стороны, разрабатывается система биоиндикаторов плодородия [8-10]. Совмещение этих двух систем позволит более точно осуществлять проектирование и эксплуатацию систем точного мелиоративного регулирования, цель которого [8] – получение не только экологически чистой сельскохозяйственной продукции и воспроизводство плодородия, но и управление «углеродным следом». А это в настоящее время весьма актуально и может существенно расширить роль мелиорации не только в нашей стране, но и во всем мире, путем создания триединой системы «Точное земледелие-точная мелиорация-точное водное хозяйство» [11-13].

### Выводы

1. Повышение экологических требований к сельскохозяйственному производству диктует необходимость развития точного мелиоративного регулирования комплекса факторов внешней среды, в которое включаются не только сельскохозяйственные растения, но и почвенные биотические сообщества как самостоятельный объект управления.

2. Управление сложной системой «Окружающая среда-растение-почвенная биота» требует разработки новых систем мониторинга почвенного биотического сообщества на микро- и нано уровнях.

3. Система рентгеновского микроскопа, основанная на плазменных технологиях, позволяет осуществлять неразрушающий контроль всех составляющих почвенного пространства включая органическое вещество и ризосферу.

4. Развитие междисциплинарных подходов в точном мелиоративном регулировании позволит придать новый импульс развитию мелиорации как отрасли в целом, так как возможная ее роль в управлении углеродным балансом будет все более и более востребованной.

### Библиографический список

1. Пикуз С.А., Самохин А.И., Улшмид И. Проволочный X-пинч в сильноточном диоде // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1982. – Т. 8. – С. 1060.
2. Effect of core-corona plasma structure on seeding of instabilities in wire array Z pinches. Phys. Rev. Lett / S.V. Lebedev, N. Beg F., S.A. Pikuz et al. 2000. – V. 85. – 1. – P. 98.
3. Временные характеристики рентгеновского излучения X пинча / С.А. Пикуз, Т.А. Шелковенко, Д.Б. Синарс и др. // Физика плазмы. – 2006. – Т. 32, № 12. – С. 1106-1120.
4. Симметричный многослойный X-пинч с мегаамперным током / Т.А. Шелковенко, С.А. Пикуз,

### References

1. Pikuz S.A., Samokhin A.I., Ulshmid I. Provolchny H-pinch v silnotochnom diode // Pisjma v Zhurnal eksperimentalnoj i teoreticheskoj fiziki. – 1982. – T. 8. – S. 1060.
2. Effect of core-corona plasma structure on seeding of instabilities in wire array Z pinches. Phys. Rev.Lett. / Lebedev S.V., Beg F.N., Pikuz S.A. et al. 2000. – V. 85. 1. P. 98.
3. Vremennye harakteristiki rentgenovskogo izlucheniya X-pincha / Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Sinars D.B. i dr. // Fizika plazmy. – 2006. – T. 32. № 12. – S. 1106-1120.
4. Simmetrichny mnogoslujny X-pinch s megaampernym tokom / Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Mak

Р.Д. Мак Брайд и др. // Физика плазмы. – 2010. – Т. 36, № 1. – С. 53-70.

5. Методика рентгеновского зондирования излучением X-пинча плазмы многопроволочных сжимающихся лайнеров на установке «Ангара-5-1» / Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, М.В. Зурин и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 110-124.

6. Исследования мега амперного многопроволочного X-пинча / С.С. Ананьев, Ю.Л. Бакшаев, П.И. Блинов и др. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2008. – Т. 87, № 7-8. – С. 426-432.

7. Синхронизируемый генератор X-пинча / А.П. Артёмов, А.С. Жигалин, И.В. Лавринович и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 92.

8. **Шабанов В.В., Голованов А.И.** Некоторые аспекты точной мелиорации // Природообустройство. – 2019. – № 1. – С. 92-96.

9. **Шабанов В.В., Солошенко А.Д.** Количественные методы оценки плодородия для целей точного мелиоративного регулирования // Природообустройство. – 2020. – № 4. – С. 13-22.

10. **Шабанов В.В., Маркин В.Н., Солошенко А.Д.** Оценка требований почвенной биоты к гидротермическим условиям внешней среды // Доклады ТСХА. – 2020. – С. 173-178.

11. **Шабанов В.В., Каспарян А.М.** Концепция создания системы адаптивного мониторинга мелиораций с использованием функции продуктивности // Доклады ТСХА. – 2021. – Вып. 293. – С. 28-31.

12. **Шабанов В.В., Маркин В.Н.** Система точного управления водными ресурсами // Доклады ТСХА. – 2020. – С. 223-229.

13. **Шабанов В.В., Маркин В.Н.** Элементы триединой системы точное земледелие – точная мелиорация – точное водное хозяйство // Доклады ТСХА. – Вып. 293. – 2021. – С. 107-110.

#### Критерии авторства

Шабанов В.В., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Шишлов А.О., Бодягин С.Ю., Митрофанов К.Н., Стрижников О.А. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 24.03.2022

Одобрена после рецензирования 11.05.2022

Принята к публикации 24.05.2022

Braid R.D., i dr. // Fizika plazmy. – 2010. – Т. 36, № 1. – С. 53-70.

5. Metodika rentgenovskogo zondirovaniya izlucheniem X-pincha plazmy mnogoprovolochnyh szhima-yushchihsy lainerov na ustanovke «Angara-5-1» / Volkov G.S., Grabovsky E.V., Zurin M.V. i dr. // Pribory i tehnika experimenta. 2004. – № 3. – S. 110-124.

6. Issledovaniya megaampernogo mnogoprovolochnogo X-pincha. / Ananjev S.S., Bakshaev Yu.L., Blinov P.I. i dr. // Pisjma v Zhurnal eksperimentalnoj i teoreticheskoj fiziki. – 2008. – T. 87. № 7-8. – S. 426-432.

7. Sinhronizuemy generator X-pincha / Artemov A.P., Zhigalin A.S., Lavrinovich I.V. i dr. // Pribory i tehnika experimenta. – 2014. – № 4. – S. 92.

8. **Shabanov V.V., Golovanov A.I.** Nekotorye aspekty tochnoj melioratsii // Prirodoobustrojstvo. – 2019. – № 1. – S. 92-96.

9. **Shabanov V.V., Soloshenkov A.D.** Kolichestvennye metody otsenki plodorodiya dlya tselej tochnogo meliorativnogo regulirovaniya // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 4. – S. 13-22.

10. **Shabanov V.V., Soloshenkov A.D., Markin V.N.** Otsenka trebovanij pochvennoj bioty k gidrotermicheskim usloviyam vneshej sredy // Doklady TSHA. – 2020. – S. 173-178.

11. **Shabanov V.V., Kasparyan A.M.** Kontseptsiya sozdaniya sistemy adaptivnogo monitoringa melioratsij s ispolzovaniem funktsii produktivnosti // Doklady TSHA. – 2021. – Vyp. 293. – S. 28-31.

12. **Shabanov V.V., Markin V.N.** Sistema tochnogo upravleniya vodnymi resursami // Doklady TSHA. – 2020. – S. 223-229.

13. **Shabanov V.V., Markin V.N.** Elementy triedonoy sistemy tochnoe zemleddelie – tochnaya melioratsiya – tochnoe vodnoe hozyastvo // Doklady TSHA. – Vyp. 293. – 2021. – S. 107-110.

#### Criteria of Authorship:

Shabanov V.V., Grabovsky E.V., Gribov A.N., Shishlov A.O., Bodyagin S.Yu., Mitrofanov K.N., Strizhnikov O.A. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Shabanov V.V., Grabovsky E.V., Gribov A.N., Shishlov A.O., Bodyagin S.Yu., Mitrofanov K.N., Strizhnikov O.A. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 24.03.2022

Approved after reviewing 11.05.2022

Accepted for publication 24.05.2022