

ТОМОГРАФИЯ
ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВ

УДК 631.43

**ФИЗИКО-ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СТРУКТУРА
БАКТЕРИАЛЬНОГО СООБЩЕСТВА АГРОФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПРОРАСТАЮЩИЕ КОРНИ–ПОРОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПОЧВ
(МОДЕЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)**

© 2021 г. А. В. Суздалева^{а, *}, Н. В. Верховцева^а, К. Н. Абросимов^б, А. А. Романычева^с

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^бПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

^сЯрославский государственный медицинский университет, ул. Революционная, 5, Ярославль, 150000 Россия

*e-mail: avsuzdaleva@gmail.com

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

Компьютерная томография позволяет количественно охарактеризовать объемы элементов твердой фазы почв, порового пространства и корневой системы. В рамках физического модельного эксперимента с выращиванием проростков ячменя в течение 7 сут и томографической съемкой через равные промежутки времени фиксировалась динамика изменений структуры объемов почвенных пор и корней. Основная цель заключалась в количественной оценке изменений показателей пористости, диаметра и объема пор, при развитии корневой системы. Эксперимент проведен в образцах дерново-подзолистой (Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic)) почвы и чернозема (Calcic Chernozem). В пластиковых бюксах объемом 3 см³ создавались модели семенного ложа с двумя слоями: подсеменным, уплотненным до 1.2 г/см³, и надсеменным с плотностью 0.7–0.8 г/см³. Семена ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Михайловский размещались на границе слоев. По мере прорастания проводилась томографическая съемка и исследование бактериального сообщества методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии. В этот период зафиксировано сокращение томографической пористости в подсеменном слое и изменение численности микроорганизмов, преимущественно выполняющих деструкцию сложных углеводных соединений. Томографические и микробиологические исследования показали взаимосвязанность происходящих процессов изменения объемов пор почвы, корней и состава микробиоты при прорастании семени.

Ключевые слова: Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic), Calcic Chernozem, структура порового пространства почв, рентгеновская компьютерная томография почв, неинвазивная визуализация, структура микробиологического прикорневого сообщества

DOI: 10.31857/S0032180X21090112

ВВЕДЕНИЕ

Структура порового пространства вокруг корней имеет большое значение для роста и развития растения, обеспечения питательными веществами, формирования гидрофизических свойств почвы, газопроницаемости и среды обитания микроорганизмов [6, 20]. Требования растений к почвенным условиям могут выражаться через такие физические параметры, как плотность, объемное распределение пор по их диаметрам и соотношение воды и воздуха внутри пор. Известно, что растения хорошо развиваются в почве с плотностью в диапазоне от 1.15 до 1.45 г/см³ и пористостью в диапазоне от 45 до 50% [1]. Однако отмечено, что кор-

невые волоски увеличивают агрегацию почвы [11] и тесно связаны с формированием ризосферы [7]. Структура порового пространства также может определять биоразнообразие микробного сообщества. В частности, такой параметр, как связность пор был предложен в качестве объяснения биоразнообразия микроорганизмов в почве [6]. Отмечалось, что агрегаты с большей площадью поверхности и большей пористостью наиболее благоприятны для развития микробиоты [18].

Цель работы – исследовать процесс формирования корневой системы ячменя, визуализированный с помощью метода рентгеновской компьютерной микротомографии, и соответствующие количественные изменения физических

параметров структуры почв и бактериального це-
ноза прикорневого пространства в ходе прораста-
ния семени.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для проведения эксперимента создавалась ис-
кусственная модель семенного ложа из агрегатов
двух типов почв:

– чернозема южного (Calcic Chernozem – WRB) [9]. Место отбора проб – Соль-Илецкий район, Оренбургская область 51°58'12" N, 55°19'15" E. Почва отнесена к тяжелосуглинистой по содержанию физической глины (<0.01 мм) – от 51.8 до 59.1%;

– дерново-подзолистой почвы (Albic Glossic Retisols, Loamic, Cutanic – WRB) [9]. Место отбора проб – Московская область, с. Ельдигино 56°07'23" N 37°48'16" E. Почва отнесена к тяжело-суглинистой по содержанию физической глины (<0.01 мм) – от 51.8 до 59.1%.

В пластиковые бьюксы, объемом 3 см³, прозрачные для рентгеновских лучей микротомографа и обладающие минимальной степенью поглощения, сопоставимой с водой, помещались почвенные агрегаты (5–3 мм) таким образом, чтобы создать 2 слоя, различающихся по плотности почв. Нижний слой утрамбовывался поршнем до плотности 1.2 г/см³, верхний – состоял из агрегатов и не уплотнялся дополнительно (равновесная плотность – 0.7 г/см³). На границе слоев располагалось семя ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Михайловский.

Предварительно для исследуемых семян устанавливались значения всхожести (она составляла 92%) и энергии прорастания составляли (61%) в соответствии с требованиями методики ГОСТ [3, 4]. Внутри бьюкса на протяжении всего эксперимента поддерживалась оптимальная влажность, близкая к наименьшей влагоемкости (НВ). Растения первоначально поливали сверху, избыток гравитационной воды свободно стекал через воронкообразное отверстие, после чего добавляли по 0.5 мл каждые 48 ч для поддержания воды на уровне, близком к НВ. Контроль влажности проводился с помощью взвешивания образцов. Температура в помещении составляла 26°C, прорастание семян происходило в условиях темноты.

На протяжении периода прорастания с первых по седьмые сутки через равные промежутки времени проводилась томографическая съемка с помощью рентгеновского микротомографа Bruker Sky Scan 1172G (Бельгия). Настройки съемки и реконструкции для образца данного типа и диаметра неоднократно опробованы в ряде аналогичных исследований [8, 12, 15, 19], но в данном случае они скорректированы в сторону ускорения процесса съемки из-за быстрого роста корней. Время съемки для одного сегмента занимало

10 мин. В процессе реконструкции и воссоздания объемной структуры с четко различимыми рентген-контрастными фазами удалось разделить почву, поровое пространство и биологические объекты (зерно с проростком и корнями). Реконструкция – отдельный этап томографического исследования, при котором теневые проекции пересчитываются в набор горизонтальных томографических срезов по заранее выставленным настройкам. В процессе модельного эксперимента получено около 2000 томографических срезов для каждого образца, с разрешением 16.1 мкм и размером 1000 × 1000 пикселей. В микротомографах SkyScan вертикальное разрешение равно горизонтальному, что позволяет сгенерировать вертикальные томографические срезы без математического пересчета. Цифровые шумы скорректированы программными фильтрами (Median, Smoothing). Автоматическая сегментация фаз в таких условиях оказалась частично работоспособной – методом Оцу [13] можно успешно сегментировать только почву. По этой причине в исследовании использована ручная сегментация, что с высокой степенью достоверности позволило разделить перечисленные выше рентген-контрастные фазы.

Помимо визуализации объемной структуры проросшего семени рассчитывали объем семени и корней на каждом этапе исследования при помощи программного обеспечения Bruker CT analyzer (CTan), а также общую пористость почвы.

Состав микробного сообщества реконструировали по микробным маркерам (жирным кислотам и их производным – жирным гидроксикислотам и альдегидам), которые определяли после кислого метанолиза почвенных образцов молекулярным методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии (ГХ-МС). Анализ проводили на ГХ-МС системе “HP-5973 Agilent Technologies” (США). Подробно методика анализа описана в [14, 17]. Анализировали следующие образцы: контрольный – исходная почва, в которой не производилось выращивание ячменя; почва из образцов с прорастающим семенем ячменя на пятые и седьмые сутки. Измерения проводили в трехкратной повторности. Образцы, в которых проводился отбор проб для микробиологического исследования разбирались. Отделялось около 1.5 г почвы в зоне корней. В основном это были агрегаты, которые пронизаны корнями. Воздушно-сухой образец растирался в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Из этой почвы отбирались навески для микробиологического анализа.

Определение влажности в образцах проводилось на приборе анализатор влажности MX-50 (Япония), термogrавиметрическим методом.

Содержание органического углерода определялось на экспресс-анализаторе АН-7529 (Измеритель, Беларусь) методом сухого сжигания в по-

Таблица 1. Плотность (г/см³) и содержание С_{орг} в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы и чернозема южного

Почва	Плотность, г/см ³				С _{орг} , %
	агрегированного надсеменного слоя	уплотненного подсеменного слоя	твердой фазы	агрегатов в надсеменном слое	
Чернозем южный, тяжелосуглинистый, Оренбургская обл. (Calcic Chernozem)	0.7	1.2	2.56	1.28–1.36	2.73–3.18
Дерново-подзолистая, тяжелосуглинистая почва, Московская обл. (Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic))	0.8	1.2	2.57	1.23–1.51	1.23

токе кислорода. Определение плотности твердой фазы – пикнометрическим методом, определение плотности агрегатов методом парафинирования [5]. Гранулометрический состав почвы – методом лазерной дифракции Analysette 22 (Fritsch, Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены некоторые свойства исследуемых почв. По содержанию органического вещества обе почвы относятся к малогумусным.

На рис. 1 показано томографическое изображение контрольного образца модели семенного ложа без семени в вертикальном срезе. Отчетливо различимы рыхлый надсеменной и уплотненный подсеменной слои. Были рассчитаны значения томографической пористости, которые составили для черноземной почвы для контрольного образца – 34.9%, в образце на пятые сутки – 19.7%, на седьмые сутки – 24.1%, для дерново-подзолистой почвы для контрольного образца – 37.8%, в образце на пятые сутки – 37.8%, на седьмые сутки – 38.2%.

На рис. 2 изображена визуализация объемной структуры проросшего семени в черноземе южном. В самом низу образца корни упираются в часть лизиметрической установки для сбора воды, которая имеет форму воронки. На третьи сутки корневая система только начинает формироваться (объем составляет 14%), к седьмым суткам он увеличивается в 3 раза (45%). При этом доля семени уменьшается почти в 2 раза (с 81 до 42%). В дерново-подзолистой почве энергия прорастания больше – на третьи сутки объем корней занимает уже 22%, увеличиваясь к седьмым суткам практически в 3 раза (до 61%). При этом доля семени уменьшилась при прорастании в дерново-подзолистой почве немного более чем на половину (с 50 до 31%).

Таким образом, несмотря на близкие значения плотности двух исследованных почв и плотности

их твердой фазы, дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва оказалась более благоприятной для начальных этапов прорастания семени ячменя, при этом корневая система в обеих почвах к седьмым суткам увеличивает свой объем в 3 раза. Однако потери доли семени в дерново-подзолистой почве меньше, чем в черноземе.

Основной тренд развития, прослеживающийся на всем этапе роста растения, – корни успешно осваивают почвенное пространство, почвенное сложение не оказывает определяющего влияния. Биологические программы роста и необходимость освоения пространства, заложенные в се-

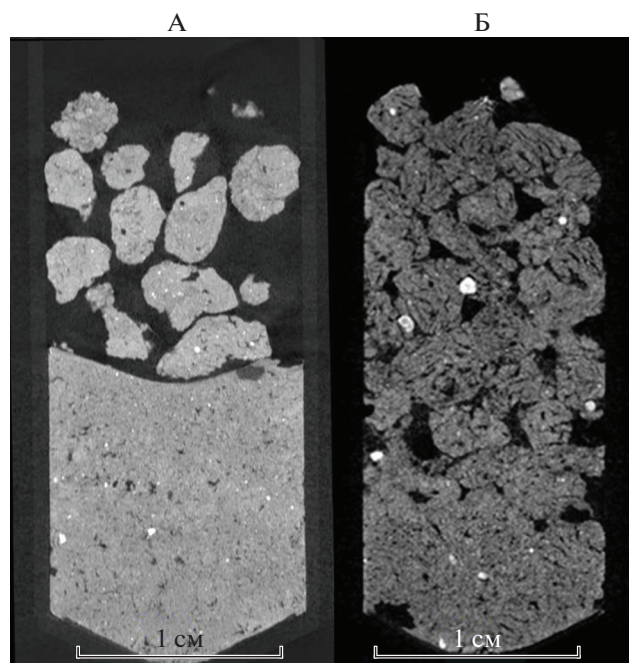


Рис. 1. Томографическое изображение модели семенного ложа в вертикальном срезе: А – чернозем южный, тяжелосуглинистый, Б – дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва.

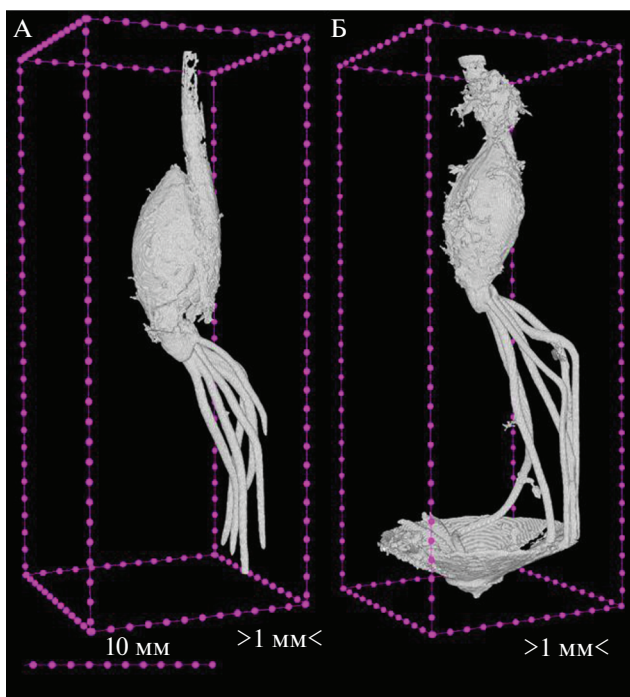


Рис. 2. Томографическая объемная реконструкция прорастающего зерна ячменя на плотном зерновом ложе: А – на третьи, Б – на седьмые сутки.

мени, в начальный период, по-видимому, играют главенствующую роль. Это подтверждает график распределения соотношения толщины корней и основных диапазонов пор. Как видно из рис. 3, наибольший объем порового пространства представлен порами <0.17 мм, тогда как наибольшая доля объемов корней сосредоточена в диапазоне от 0.17 до 0.27 мм, что указывает на способность корней прорастающего семени изменять поровое пространство почв, формировать собственные пути для развития корней диаметром от 0.1 до 0.24 мм.

Для того, чтобы определить, какой биологический фактор играл главенствующую роль на разных этапах прорастания, в двух почвах определили динамику их ризосферного микробного сообщества.

В составе сообществ ризосферы методом ГХ-МС реконструировано 39 (в черноземе) и 37 (в дерново-подзолистой почве) бактериальных видов, принадлежащих к пяти филумам – *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Cyanobacteria*. Видовой состав и численность микробного комплекса представлен в табл. 2.

По биоразнообразию наиболее многочисленно был представлен филум *Proteobacteria*. Далее по количеству видов следовали *Actinobacteria* и

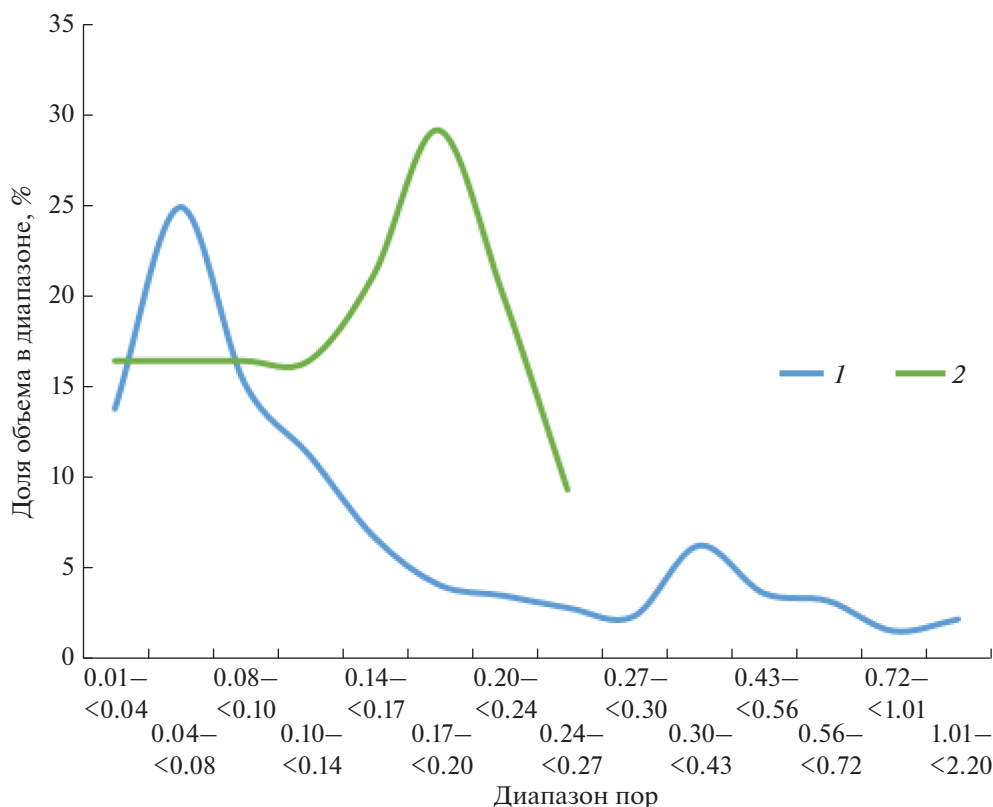


Рис. 3. Соотношение распределений объемов пор почвы (1) и корней (2) по диаметрам на седьмые сутки в дерново-подзолистой почве.

Таблица 2. Видовой состав микробного комплекса и численность микроорганизмов сообщества агрофизической системы прорастающие корни—поровое пространство

Микроорганизмы		Состав микроорганизмов, кл × 10 ⁶ /г					
		дерново-подзолистая почва			чернозем южный		
		контроль	пятые сутки	седьмые сутки	контроль	пятые сутки	седьмые сутки
<i>Actinobacteria</i>	Актинобактерии (без определения видов)	43.8	382.6	63.7	0	0	0
	<i>Actinomadura roseola</i>	0.6	0.3	1.2	0.3	0.2	0.3
	<i>Arthrobacter</i> sp.	12.6	10.6	12.3	1	0.5	0.3
	<i>Bifidobacterium</i> sp.	0	0	0	5.9	5.2	8.9
	<i>Cellulomonas</i> sp.	11.3	19.1	7.9	0	0	0
	<i>Mycobacterium</i> sp.	3.5	4.9	5.6	5.8	6.2	11.3
	<i>Nocardia carnea</i>	2.8	2.7	3.5	0	0	0
	<i>Nocardiopsis</i>	0	0	0	0.3	0.3	0.5
	<i>Propionibacterium jensenii</i>	0	0	0	2.7	3.6	4.3
	<i>Pseudonocardia</i> sp.	3	4.4	2.5	0.6	0.5	0.4
	<i>Rhodococcus equi</i>	31.3	29.6	27.3	3.4	2	2.3
	<i>Streptomyces-Nocardiopsis</i>	14.2	9.2	13.2	1.6	0.9	1.8
	Сумма	123	463.4	137.2	21.6	19.4	30.2
<i>Bacteroidetes</i>	<i>Bacteroides fragilis</i>	0	0	0	0.1	0.1	0.3
	<i>Bacteroides hypermegas</i>	0.2	0.1	0.2	0	0	0
	<i>Bacteroides ruminicola</i>	1.3	1.1	1.5	0.2	0.3	0.4
	<i>Cytophaga</i> sp.	2.4	2.1	2.2	0	0.1	0.2
	<i>Riemirella</i>	1.5	1.3	1.2	0.2	0.2	0.6
	<i>Sphingobacterium spiritovororum</i>	1.7	1.5	1.8	0.6	0.3	0.7
	Общее количество	7.1	6	6.9	0.9	0.8	1.9
<i>Cyanobacteria</i>	<i>Anabaena (cyanobacteria)</i>	6.5	6	9	36	29.4	56.8
	Сумма	6.5	6	9	36	29.4	56.8
<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus subtilis</i>	5.1	5.8	4.6	1.5	0.8	0.9
	<i>Bacillus subtilis</i>	0	0	0	0.6	0.6	0.9
	<i>Butyrivibrio 1-2-9</i>	0	0	0	0.3	0.5	2.3
	<i>Butyrivibrio 1-4-7</i>	0	0	0	0.5	1.5	6.1
	<i>Butyrivibrio 7S-14-1</i>	0	0	0	1.4	1.6	4.1
	<i>Clostridium pasteurianum</i>	19.9	49.6	11	4.6	4.2	3.4
	<i>Eubacterium lentum</i>	0	0	0	0.1	0.5	1.7
	<i>Ruminococcus</i> sp. +**	81.9	107.2	43.5	0	0	0
	Сумма	106.8	162.6	59.2	9.1	9.7	19.5
<i>Proteobacteria</i>	<i>Acetobacter</i> sp.	9	6.8	7.4	0	0	0
	<i>Acetobacter</i> sp.	0	0	0	0.1	0.2	1.5
	<i>Acetobacter-Rhodobacter</i> group	0	0	0	1.7	1.1	2.3
	<i>Aeromonas hydrophila</i>	7.8	9.8	6.5	0.2	0	0.3
	<i>Agrobacterium radiobacter</i>	2.5	0.4	0.9	0.5	0.4	0.4
	<i>Caulobacter</i> sp.	5	4	6.1	1.2	1.2	1.4
	<i>Desulfovibrio</i> sp.	6.1	5.9	5.3	10.8	9.3	17.5
	<i>Enterobacteriaceae</i>	5.7	2	13.5	0.4	0.7	1.1
	<i>Nitrobacter</i> sp.	17.4	25.5	13.3	0	0	0

Таблица 2. Окончание

Микроорганизмы		Состав микроорганизмов, кл × 10 ⁶ /г					
		дерново-подзолистая почва			чернозем южный		
		контроль	пятые сутки	седьмые сутки	контроль	пятые сутки	седьмые сутки
Proteobacteria	<i>Ochrobactrum</i>	0	0	0	0.5	0.4	0.8
	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	3.8	4.2	7.6	0.7	0.5	1.6
	<i>P. putida</i>	0.9	0.6	2	0	0	0
	<i>P. vesicularis</i>	1.4	1.2	1.6	0.2	0.1	0.5
	<i>Sphingomonas adgesiva</i>	1	1.5	2	0.5	0.3	0.6
	<i>Sphingomonas capsulata</i>	2	2.1	3	2.9	2.4	3.4
	WARB*	3	2.7	2.5	0.4	0.1	0.6
	<i>Xanthomonas</i> sp.	4.7	3.6	4.9	0.5	0.3	0.6
	Сумма	70.4	70.4	76.7	19.8	16.8	30.1
	Сумма	333.8	734.9	305.1	89.6	77.5	142.9

* *Wolinella* sp., *Acholeplasma* sp., *Roseomonas* sp., *Burkholderia* sp.

** *Ruminococcus*/*Glomus*/*Scutellospora* AMF/*Acetobacterium*/железоредукторы от Лавли.

Firmicutes (рис. 4, А) в черноземе и *Bacteroidetes* в дерново-подзолистой почве (рис. 4, Б). Исходя из экологических принципов, это свидетельствует о том, что именно эти филумы были наиболее устойчивы и адаптационно пластичны. Наиболее отличался в двух почвах по количеству видов филум *Firmicutes*, который в дерново-подзолистой почве был в 2 раза меньше, чем в черноземной.

Кроме того, был проведен анализ динамики таксономического состава микробиологического сообщества. По мере роста семени в черноземной почве происходит увеличение количества анаэробных видов из разных филогенетических групп (рис. 4), в том числе тех, для которых известна

способность гидролизовать целлюлозу в анаэробных условиях (табл. 2). В частности, об этом свидетельствует существенное увеличение численности в черноземном образце облигатно анаэробного вида *Desulfovibrio* sp. с такой ферментативной активностью [16]. По-видимому, уменьшается количество кислорода, увеличивается содержание углекислого газа (изменяется окислительно-восстановительный потенциал) и доминантными в процессе разрушения оболочки становятся анаэробы. Об изменении газового режима в сторону увеличения содержания CO₂ в образцах с черноземом свидетельствует рост численности таких видов, как *Anabaena* sp. — анаэробной фототрофной бакте-

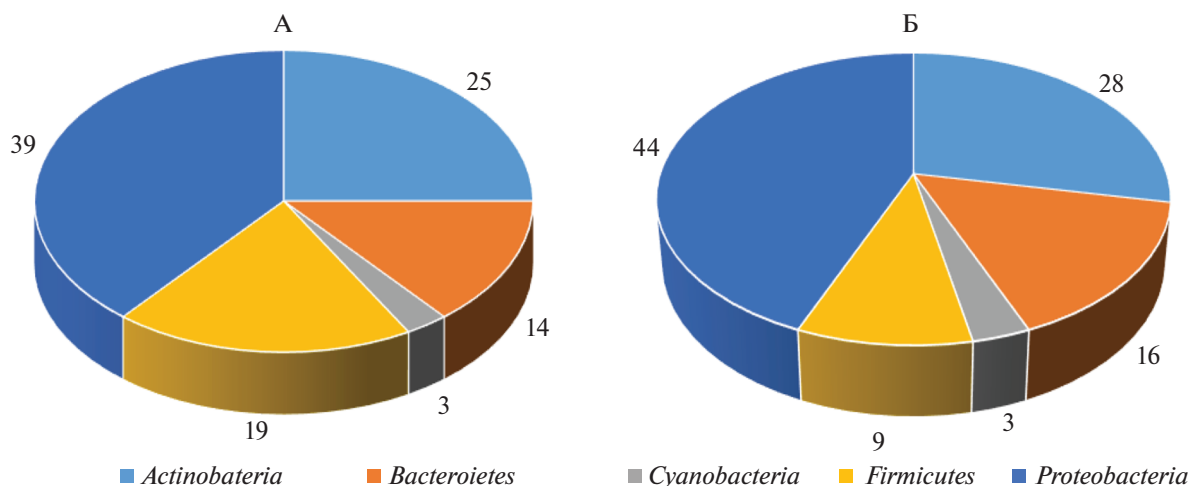


Рис. 4. Биоразнообразие бактерий (%) в филумах: А — чернозем южный, тяжелосуглинистый, Б — дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва.

рии, то есть осуществляющей анаэробный фотосинтез и *Bifidobacterium* sp. — анаэроба, требующего высокого содержания (10%) CO₂ в среде. Консорциум анаэробных фототрофов с другими видами бактерий описан как взаимовыгодная ассоциация [2]. Повышено относительно других видов и содержание *Propionibacterium jensenii*, анаэробного вида, способного за счет выделения большого количества пропионовой кислоты изменять pH среды, что определяет его антифунгальные свойства [10] и, следовательно, регулирующую роль в формировании сообщества.

В образцах дерново-подзолистой почвы наблюдалось обилие численности анаэробного азотфиксатора *Clostridium pasteurianum*, анаэробного гидролитика *Ruminococcus* sp. и аэробного нитрификатора *Nitrobacter* sp. Увеличение этих видов свидетельствует о первоначальном разрушении целлюлозной оболочки зерна и процессов фиксации и преобразовании азота в микробиоте прорастающего семени, необходимого для формирования C/N соотношения. Наблюдалось также увеличение численности *Cellulomonas* sp. на пятые сутки, с последующим уменьшением на седьмые. Этот вид является представителем факультативно анаэробных целлюлозолитиков, как и другой представитель филомы *Actinobacteria*, *Pseudonocardia* sp. — активный целлюлозолитик с комплексом целлюлозолитических ферментов. В таком же количестве, как и в черноземной почве, представлен и анаэробный фототрофный вид *Anabaena*.

Таким образом, как в черноземной, так и в дерново-подзолистой почве при прорастании семени ячменя формируется специфическое сообщество микроорганизмов, которое обеспечивает разрушение целлюлозной оболочки за счет аэробно-анаэробного консорциума бактерий, в которой первичные анаэробные виды (*Clostridium pasteurianum*) для дерново-подзолистой почвы и вторичные анаэробы (*Desulfovibrio* sp.) для черноземной обеспечивают не только разрушение оболочки, но и фиксацию азота в анаэробных условиях (анаэробный фототроф *Anabaena*).

Обращаясь к результатам, которые получены томографическим методом, можно связать увеличение численности анаэробных видов бактерий с существенным (в 3 раза) увеличением доли корней в системе семя—корневая система, что приводит к повышению выделения экссудатов корневой системой, стимулирующих развитие определенных видов микроорганизмов, которые связаны с этими органическими соединениями трофическими потребностями. С другой стороны, дыхание повышенной биомассы корней приводит к увеличению содержания углекислого газа и уменьшения концентрации кислорода. Эти физические факторы определяют изменение экологических факторов почвенной среды и соответ-

ствующего взаимосвязанного отклика микробного сообщества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микротомография позволяет количественно охарактеризовать структуру порового пространства почвы, определив показатели пористости, диаметра и объема пор, распределение пор по размерам, а также количественно оценить параметры формирования корневой системы. Такие, как толщина корневой, доля объема корней, длина корней, что весьма важно для оценки функционирования агрофизической динамической системы прорастающие корни—поровое пространство.

Корни осваивают уплотненное (до 1.2 г/см³) поровое пространство, формируя собственные ходы, при этом показатель томографической пористости к седьмым суткам в черноземе южном уменьшается с 34.9 до 24.1%, в дерново-подзолистой почве меняется незначительно с 37.8 до 38.2%.

В изученный период в составе микробного сообщества в ризосфере *Hordeum vulgare* L. складывается специфический гидролитический комплекс микроорганизмов, способных к активной, преимущественно анаэробной, деструкции сложных органических соединений (растительных остатков, семенной оболочки, углеводов корневых выделений) и обладающих антагонистической активностью к фитопатогенам.

Томографические и микробиологические исследования показали взаимосвязанность происходящих процессов. Первые позволили заглянуть внутрь почвы при прорастании семени, а результаты изучения динамики таксономического состава сообщества микроорганизмов дали возможность получить новые данные о формировании газового режима, порового пространства и особенностей изменения плотности почвы при посеве семян зерновых культур.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Томографические исследования проведены с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-05112 мк).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов С.В., Ханин Ю.В. Проблемы повышения плодородия почвы “Общество, образование, наука в современных парадигмах развития” [Электронный ресурс] // Сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции (26 ноября 2020 г.) Керчь: ФГБОУ ВО “КГМТУ”, 2020. 236 с. http://www.kgmtu.ru/documents/nauka/obcshestvo,obrazovanie,nauka_vparadigmah_1-2020.pdf
2. Зенова Г.М., Иванова Е.А., Омарова Е.О., Николаев Г.М., Лобакова Е.С., Чижикова Н.П. Модельные ассоциации актиномицетов и цианобактерии *Anabaena variabilis* KÜTZ и их способность к преобразованию структуры глинистых минералов // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 79–88. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2009-3-079-088>
3. Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания: ГОСТ 10968-88. [Введен 1988-07-01]. М.: Стандартинформ, 2009. 4 с.
4. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: ГОСТ 12038-84. [Введен 1986-07-01]. М.: Стандартинформ, 2011. 64 с.
5. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н., Дембовецкий А.В. Практикум по физике твердой фазы почв. М.: Буки-Веди, 2017. 119 с.
6. Carson J.K., Gonzalez-Quñones V., Murphy D.V., Hinz C., Shaw J.A., Gleeson D.B. Microbial Ecology Low Pore Connectivity Increases Bacterial Diversity in Soil Jennifer // Applied and Environmental Microbiology. 2010. V. 76. № 12. P. 3936–3942. <https://doi.org/10.1128/AEM.03085-09>
7. George T.S., Brown L.K., Ramsay L., White P.J., Newton A.C., Bengough A.G., Russell J., Thomas W.T.B. Understanding the genetic control and physiological traits associated with rhizosheath production by barley (*Hordeum Vulgare* L.) // New Phytologist. 2014. V. 203. P. 195–205. <https://doi.org/10.1111/nph.12786>
8. Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B. Tomography of soil pores: from morphological characteristics to structural-functional assessment of pore space // Eurasian Soil Science. 2019. № 52(1). P. 50–57. <https://doi.org/10.1134/S106422931901006X>
9. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2014.
10. Lind H. Antifungal properties of dairy propionibacteria. Doctoral thesis // Uppsala: Sverigeslantbruksuniv, ActaUniversitatis agriculture Sueciae. 2010. 44 p.
11. Moreno-Espíndola I.P., Rivera-Becerril F., Ferrara-Guerrero M., De León-González F. Role of root-hairs and hyphae in adhesion of sand particles // Soil Biology and Biochemistry. 2007. V. 39. № 10. P. 2520–2526. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.04.021>
12. Müller K., Katuwal S., Young I., McLeod M., Moldrup P., de Jonge L.W., Clothier B. Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures // Geoderma. 2018. V. 313. P. 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.020>
13. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. V. 9(1). P. 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
14. Shekhovtsova N.V., Marakaev O.A., Pervushina K.A., Osipov G.A. The underground organ microbial complexes of moorland spotted orchid *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó (*Orchidaceae*) // Advances in Bioscience and Biotechnology. 2013. № 4. P. 35–42. <https://doi.org/10.4236/abb.2013.47A2005>
15. Skvortsova E.B., Shein E.V., Abrosimov K.N., Romanenko K.A., Yudina A.V., Klyueva V.V., Khaidapova D.D., Rogov V.V. The Impact of Multiple Freeze-Thaw Cycles on the Microstructure of Aggregates from a Soddy-Podzolic Soil: A Microtomographic Analysis // Eurasian Soil Science. 2018. № 51(2). P. 190–199. <https://doi.org/10.1134/S1064229318020102>
16. Taufieq N.A., Rahim S.A., Jamil H., Huyyirnah H.J., Arfan A. Isolation and Identification of *Desulfovibrio* sp. Bacteria from Acid Sulfate Soil // Asian J. Applied Sciences. 2015. № 03(05). P. 730–738.
17. Verkhovtseva N.V., Osipov G.A., Bolysheva T.N. et al. Comparative Investigation of Vermicompost Microbial Communities. Microbiology of composting. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. P. 99–108. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08724-4_8
18. Voltolini M., Taş N., Wang S., Brodie E.L., Ajo-Franklin J.B. Quantitative characterization of soil microaggregates: New opportunities from sub-micron resolution synchrotron X-ray microtomography // Geoderma. 2017. № 305. P. 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.005>
19. Wildenschild D., Sheppard A.P. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems // Advances in Water Resources. 2013. № 51. P. 217–246. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.07.018>
20. White P.J., George T.S., Gregory P.J., Bengough A.G., Hallett P.D., McKenzie B.M. Matching roots to their environment // Annals of Botany. 2013. № 112. P. 207–222. <https://doi.org/10.1093/aob/mct123>

Physical-Tomographic Characteristics and Structure of the Bacterial Community of the Agrophysical System “Germinating Roots–Pore Space of Soils” (Physical Model Experiment)

A. V. Suzdaleva^{1,*}, N. V. Verkhovtseva¹, K. N. Abrosimov², and A. A. Romanycheva³

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Dokuchaev Soil Institute, Moscow, 119017 Russia*

³*Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, 150000 Russia*

*e-mail: avsuzdaleva@gmail.com

Computed tomography allows quantifying the volume of elements of the soil solids, pore space and root system. Within the framework of a special physical model experiment with cultivation of barley seedlings for 7 days and tomographic imaging at key stages, it was possible to record the dynamics of changes in the soil pore volume structure. The main goal was to quantify the structural changes in the development of the root system and their dynamics. The experiment was performed on samples of soddy-podzolic soil and chernozem, along with changes in the soil structure the changes in the structure of the microbiological community were recorded in the agrophysical system “germinating roots – pore space”. In plastic buckets with a volume of 3 cm³, models of the seedbed were created with two layers: the subseminal layer compacted to 1.2 g/cm³ and the above-seed aggregated layer with a density of 0.7–0.8 g/cm³. Seeds of barley (*Hordeum vulgare* L.) of the Mikhailovsky variety were placed on the boundary of the layers. Soil water content was maintained close to the field capacity. As germination progressed from 3 to 7 days, a tomographic survey and a study of the microbiological community were carried out by gas chromatography-mass spectrometry. During this period, a decrease in the tomographic porosity in the subseminal layer and a change in the number of microorganisms that mainly perform the destruction of complex carbon compounds were recorded. Tomographic and microbiological studies have shown the interconnectedness of the processes occurring during seed germination and can be used to quantify the emerging root system.

Keywords: Albic Glossic Retisol (Lomic, Cutanic), Calcic Chernozem, structure of soil pore space, X-ray computed tomography, non-invasive imaging, structure of the microbial community