

**ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПОЧВЕННУЮ МИКРОФЛОРУ****Сергей Анатольевич Замятин, кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID ID: 0000-0002-3999-9179****Раисия Болеславовна Максимова, научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-0324-8525**

Марийский научно-исследовательский институт сельского хозяйства –

филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»,  
п. Руэм, Республика Марий Эл, Россия

E-mail: zamyatin.ser@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты многолетних исследований по изучению биологической активности дерново-подзолистой почвы аппликационным методом на полевых шестипольных севооборотах в условиях Республики Марий Эл. Экспериментальные работы выполняли в длительном стационаре Марийского научно-исследовательского института сельского хозяйства на опытах, заложенных в 1996 году. Повторность вариантов трехкратная, расположение делянок систематическое. Наибольшая активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов в почве на естественном фоне была во II плодосменном севообороте, с внесением навоза под картофель – 23,5% в первый срок экспозиции и 54,7% – во второй. Наименьшая биологическая активность почвы за первые 45 дн. (17,7) отмечена в зернотравяном севообороте (83% зерновых) и 43,1% – во второй срок экспозиции. Это связано с дефицитом поступления органического вещества. Внесение минеральных удобрений ( $N_{60}P_{60}K_{60}$ ) под основную обработку достоверно повышает микробиологическую активность почвы по отношению к контрольному варианту. Высокую интенсивность разложения льняного полотна наблюдали в III плодосменном севообороте за первые 45 дн. – 22,7, 90 дн. – 56,7%. Корреляционный анализ (1996–2021 годы) показал тесную прямую зависимость между средним разложением льняного полотна под культурами и значением гидротермического коэффициента (ГТК) за весь период вегетации. Этот показатель в первые 45 дн. составил 0,84–0,86, во второй срок экспозиции – 0,78–0,82.

**Ключевые слова:** Республика Марий Эл, севооборот, биологическая активность почвы, минеральные удобрения, аппликационный метод

**INFLUENCE OF MINERAL FERTILIZER ON SOIL MICROFLORA****S.A. Zamyatin, PhD in Agricultural Sciences****R.B. Maksimova, Researcher**

Mari Agricultural Research Institute – Mari Agricultural Research Institute –

Branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Ruem, Mari El Republic, Russia

E-mail: zamyatin.ser@mail.ru

**Abstract.** The biomass of organic matter entering the soil after a particular crop affects the formation of humus, the phytosanitary state of the soil, and agricultural crops can use nutrients from plant residues much more efficiently than from mineral fertilizers. The article presents the results of many years of experiments on the study of the effect of stubble and root residues on the biological activity of soddy-podzolic soil using the application method in a field six-field crop rotation in the conditions of the Republic of Mari El. The experimental part of the work was carried out in the field on the experimental field of the Mari Research Institute of Agriculture – a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution FARC of the North-East according to the experience laid down in 1998. The repetition of options is three times, the location of the plots is systematic. It has been established that the activity of soil microflora mainly depends on the presence of organic matter in the soil. The highest activity of cellulose-destroying microorganisms on a natural background of fertility is observed in the second crop rotation when manure is applied for potatoes – 22.9% in the first period of exposure and 54.7% in the second period of exposure. The lowest biological activity of the soil for the first 45 days was noted in the grain-grass crop rotation (83% of cereals) – 17.7% and 43.4% – in the second period of exposure. This is due to the deficiency of organic substances due to their insufficient intake. The application of mineral fertilizers at a dose of  $N_{60}P_{60}K_{60}$  for pre-sowing cultivation significantly increases the biological activity of the soil in relation to the unfertilized background, and a rather high intensity of decomposition of flax cloth was observed in the second crop rotation – for the first 45 days – 24.9%, for 90 days – 56.8%. Correlation analysis (1998–2019) between the average value of canvas decomposition under crops for the entire growing season and the value of the hydrothermal coefficient (HTC) showed a close direct relationship, which in the first exposure period (45 days) was 0.87–0.90, in the second period of exposure – 0.86...0.89.

**Keywords:** Mari El Republic, fertility, biological activity of the soil, mineral fertilizers, application method

Почва играет важную роль в жизнедеятельности человека, как основное средство сельскохозяйственного производства, относится к незаменимым природным ресурсам. Недостаточное внесение органических и минеральных удобрений, длительное возделывание пропашных культур на одном и том же месте приводит к снижению гумуса, ухудшению водных, физических и физико-химических свойств почвы, истощению плодородия. Эффективное ведение сельскохозяйственного произ-

водства возможно при обязательном применении прогрессивных технологий с использованием сбалансированных, хорошо организованных и экономически обоснованных методов. Основные критерии деятельности такого производства – сохранение естественных ресурсов, снижение себестоимости продукции, стремление к получению максимальной прибыли. [10]

Биологическая активность почвы зависит от численности и видового состава обитающих в ней

Таблица 1.

Схема опыта

№ севооборота	Фактор А (вид севооборота)	Фактор В (минеральные удобрения)
1	Зернотравной (овес + клевер, клевер 1 г. п., озимые, вика/овес на зерно, яровая пшеница, ячмень)	Без удобрений N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>
2	I плодосменный (вика/овес на зеленую массу, озимые, ячмень, картофель, вика/овес на зерно, яровая пшеница)	Без удобрений N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>
3	II плодосменный (вика/овес на зерно, яровая пшеница, картофель (навоз 80 т/га), ячмень + клевер, клевер 1 г.п., озимые)	Без удобрений N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>
4	III плодосменный (ячмень + клевер, клевер 1 г. п., клевер 2 г. п., озимые, картофель, овес)	Без удобрений N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>

живых микроорганизмов. Агротехнические мероприятия, направленные на повышение плодородия почвы, должны иметь почвенно-микробиологическое обоснование. [7, 9] На активность почвенной микрофлоры также влияет благоприятное сочетание температуры, влажности и плотности. [8, 13]

Из-за небольшого удельного веса многолетних трав в севооборотах снизилось плодородие почвы Нечерноземья. Поживные остатки и корневая масса сельскохозяйственных культур иногда единственный источник органического вещества.

Многие ученые подтверждают, что регулирование интенсивности биологических процессов в почве возможно только с помощью плодосменных севооборотов. [4, 6]

Внесение минеральных удобрений увеличивает биологическую активность почвы на 3...6%. Недостаточное количество атмосферных осадков при повышенном температурном режиме замедляет процесс разложения почвенной микрофлоры. [11, 12]

Важная характеристика растений в севообороте – почвоулучшающая способность. Чередование культур приводит к изменению уровня накопления фитомассы и интенсивности ее разрушения в почве, а также различиям в составе и биохимической деятельности микроорганизмов. [1, 2]

Растительные остатки участвуют в круговороте углерода, формируют сообщество из почвенных организмов, которые стимулируют структурную устойчивость почвы. [14–17]

Один из способов оценки биологической активности почвы – определение ее целлюлозоразлагающей способности аппликационным методом. [5]

Цель работы – исследование влияния минеральных удобрений на биологическую активность почвы под культурами экспериментальных полевых шести-польных севооборотов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект изучения – полевые севообороты, минеральные удобрения. На поле Марийского научно-исследовательского института сельского хозяйства был заложен многолетний (1996–2021 годы) двухфакторный опыт: фактор А – виды севооборотов, фактор В – внесение минеральных удобрений (табл. 1).

Почва опытного участка дерново-подзолистая среднесуглинистая (табл. 2). Агротехника возделывания культур общепринятая для условий Республики Марий Эл.

Минеральные удобрения (аммиачная селитра, двойной суперфосфат, хлористый калий) вносили перед посевом культур. Азотные удобрения под бобовые не применяли. Навоз в дозе 80 т/га разбрасывали во II плодосменном севообороте под картофель.

Повторность вариантов трехкратная, расположение делянок систематическое. Общая площадь делянок первого порядка 330 м<sup>2</sup>, второго – 165 м<sup>2</sup>. Учетная площадь – 60 м<sup>2</sup>. Биологическую активность почв определяли методом аппликации. В опытах использовали льняную ткань из-за ее однородности по химическому составу, способности быстро разлагаться и отражать исходную биологическую активность почвы. До закладки льняные полотна (5×20 см) взвешивали на аналитических весах ACCULAB ALC – 110d4 с точностью до 0,001 г. К образцам с одной стороны прикрепляли синтетическими нитками полиэтиленовые пленки и закапывали на глубину пахотного слоя. Время экспонирования – 90 дн. Через 45 дн. часть полотен извлекали. По уменьшению массы ткани судили о биологической активности почвы (%).

Период исследований состоял из благоприятных и экстремальных по погодным условиям вегетационных периодов. Близкое к средней многолетней норме количество осадков выпало в 1997, 1998, 2004, 2005, 2011, 2013, 2021 годах. Засушливыми были 1999, 2001, 2002, 2009, 2010, 2014, 2016, 2018 годы, избыточно влажными – 2000, 2007, 2008, 2012, 2017, 2019, 2020.

Учеты и наблюдения проводили общепринятыми методами по Б.А. Доспехову. [3] Основные результаты исследований математически обрабатывали с помощью дисперсионного анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Почвенные микроорганизмы – индикаторы процессов превращения органических и минераль-

Таблица 2.

Агрохимические показатели почвы опытного участка

Показатель	Значение
pH <sub>кон.</sub>	5,67
Гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г	1,41
Сумма поглощенных оснований, мг-экв/100 г	8,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (по Кирсанову), мг/кг	270
K <sub>2</sub> O (по Кирсанову), мг/кг	130
Гумус по Тюрину, %	1,72
Общий азот, %	0,19

Таблица 3.

**Биологическая активность почвы по севооборотам, среднее за 1996–2021 годы**

Севооборот	Удобрение	Разложение полотна, %	
		45 дн.	90 дн.
1. Зернотравяной (83% зерновых)	Без удобрений	17,7	43,1
	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	19,4	45,9
2. I плодосменный (67% зерновых)	Без удобрений	19,0	50,2
	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	20,6	54,0
3. II плодосменный (67% зерновых)	Без удобрений	23,5	54,7
	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	24,6	57,3
4. III плодосменный (50% зерновых)	Без удобрений	21,2	54,9
	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	22,7	57,9
НСР <sub>05</sub> частных различий 1		4,2	10,5
частных различий 2		0,9	1,4
фактор А (севооборот)		3,0	7,4
фактор В (удобрения)		0,4	0,7

ных соединений почв и удобрений, синтеза и разложения перегноя.

Интенсивность разложения льняного полотна в пахотном слое почвы изменялась в течение вегетационного периода (табл. 3). Биологическая дея-

тельность почвы в первые 45 дн. на удобренных делянках – 17,7...23,5%. Активность разложения полотна в этот период относительно высока, что обусловлено составом почвы и благоприятным температурным режимом. За 26 лет исследований лучшую активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов на естественном фоне плодородия наблюдали во втором плодосменном севообороте в первый срок определения – 23,5, второй – 54,7%. Менее активно из-за дефицита органического вещества микробиологическая деятельность почвы протекала в зернотравяном севообороте (83% зерновых) – 17,7 и 43,1% соответственно.

В вариантах с включением бобовых культур степень разложения полотна значительно повышается, так как в почве остается большая масса богатого азотом легкоразлагающегося органического вещества (III плодосменный севооборот). Лучшие условия для активизации микробиологической деятельности почвы создаются при внесении минеральных удобрений (N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>) под основную обработку. Высокую интенсивность разложения льняного полотна наблюдали во II плодосменном севообороте за первые 45 дн. – 24,6, 90 дн. – 57,3%. Наибольшее разложение льняного полотна было под картофелем при внесении навоза в дозе 80 т/га. Положительное влияние навоза проявляется с первых дней.

С помощью корреляционного анализа (1996–2021 годы) между средним разложением льняного полотна под культурами за весь период вегетации и значением гидротермического коэффициента (ГТК) выявили тесную прямую зависимость в первый срок экспозиции – 0,84...0,87, во второй – 0,78...0,82 (табл. 4).

Таким образом, биологическая деятельность почвы в течение вегетационного периода была наиболее выражена во II и III плодосменных севооборотах, слабее – в I, незначительно – в зерновом.

**Выводы.** Изменение биологической активности зависит от вида сельскохозяйственных культур, их предшественников и метеорологических условий. Внесение минеральных удобрений перед посевом существенно активизирует разложение льняного полотна. Наибольшая биологическая активность наблюдается под яровыми зерновыми культурами, возделываемыми после картофеля. При насыщении севооборотов зерновыми культурами микробиологическая активность почвы снижается. Меньшая степень разложения в указанных вариантах объясняется незначительным поступлением в почву органического вещества, состоящего из корневых остатков, поскольку надземная масса была удалена за пределы поля вместе с урожаем.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Аристовская Т.В., Чугунова М.В. Экспресс-метод определения биологической активности почв // Почвоведение. 1989. № 11. С. 142–147.
2. Берестецкий О.А., Торжевский В.И., Мочалов Ю.М. Особенности микрофлоры дерново-подзолистой почвы при бессменном выращивании сельскохозяйственных растений и в севообороте // Микробиология. 1976. Т. 45. Вып. 4. С. 710–716.
3. Доспехов Б.А. Методы полевого опыта с основами статистической обработки / Изд-е 5-е, дополненное и переработанное. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Таблица 4.

**Корреляционная зависимость разложения льняного полотна от ГТК**

Год	Разложение ткани за 45 дн., %		ГТК за первую половину вегетации	Разложение ткани за 90 дн., %		ГТК за вегетацию
	без удобрений	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>		без удобрений	N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	
1996	18,4	19,9	1,38	29,0	31,9	1,07
1997	20,9	22,8	1,88	31,2	33,9	1,30
1998	15,5	15,1	0,61	38,6	38,5	0,97
1999	12,7	12,4	0,57	39,7	39,9	0,99
2000	37,9	40,7	2,61	83,9	91,3	1,73
2001	27,0	31,0	1,66	40,8	44,3	1,03
2002	12,0	11,9	0,53	28,6	28,9	0,56
2003	21,8	26,5	1,77	62,5	72,0	1,64
2004	20,5	21,7	1,38	43,9	46,1	1,15
2005	19,6	20,9	1,25	41,2	44,3	1,14
2006	26,1	29,2	1,15	60,5	62,6	1,48
2007	13,7	14,9	0,87	49,1	54,7	1,34
2008	36,0	38,1	2,06	85,8	88,7	1,71
2009	8,3	7,8	0,78	37,0	36,1	0,77
2010	12,9	11,7	0,51	21,5	19,1	0,37
2011	29,8	30,3	1,52	86,9	88,7	1,22
2012	23,0	25,0	1,04	63,9	66,7	1,24
2013	21,4	21,4	0,93	42,2	45,0	1,21
2014	12,8	13,4	0,80	25,6	28,0	0,84
2015	19,5	21,9	0,77	61,9	67,8	1,29
2016	9,5	9,7	0,50	25,7	28,6	0,56
2017	32,4	37,7	2,87	78,0	86,8	1,85
2018	20,9	22,1	1,37	40,6	44,3	0,87
2019	17,6	19,3	1,31	65,4	68,4	1,76
2020	26,4	31,0	1,40	51,3	58,5	1,86
2021	8,2	8,3	0,88	33,5	34,4	0,84
r	0,84	0,86		0,78	0,82	

4. Дридигер В.К., Стукалов Р.С., Гаджиумаров Р.Г. Экономическая эффективность севооборотов при возделывании полевых культур без обработки почвы // Сельскохозяйственный журнал. 2019. № 4 (12). С. 6–12. DOI: 10.25930/0372-3054/001.4.12.2019.
5. Замятин С.А., Максимова Р.Б. Влияние культур севооборотов на биологическую активность почвы. Зерновое хозяйство России. 2021. № 4 С. 39–44. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-76-4-39-44.
6. Карабутов А.П., Соловиченко В.Д., Никитин В.В. Воспроизводство плодородия почв, продуктивность и энергетическая эффективность севооборотов // Земледелие. 2019. № 2. С. 3–7. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10201.
7. Козлова Л.М., Носкова Е.Н., Попов Ф.А. Оптимизация полевых севооборотов, как фактор сохранения почвенного плодородия и экологизации земледелия // Агроэкология. 2020. № 3. С. 147–153. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-147-153.
8. Кузминых А.Н. Влияние видов паров на микробиологическую активность почвы // Аграрная наука Северо-Востока. 2012. № 5 (30). С. 44–46.
9. Мишустин Е.Н., Емцев В.Т., Микробиология. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1987. 368 с.
10. Никитин В.В., Соловиченко В.Д., Навальнев В.В., Карабутов А.П. Влияние севооборотов, способов обработки почв и удобрений на изменение органического вещества в черноземе типичном // Агрохимия. 2017. № 2. С. 233.
11. Обшия Е.Н. Хрипунов А.И. Целлюлозоразлагающая активность почвы в условиях склоновых земель ландшафтов как один из элементов ее биологической активности // Сельскохозяйственный журнал. 2019. № 2 (12). С. 25–28. DOI: 10.25930/004.2.12.2019.
12. Применение метода льняных полотен для учета биологической активности почвы в условиях техногенного загрязнения / Экологическая безопасность в АПК. РЖ. М., 2008. № 1. 18 с.
13. Саегалиева Г.Э. Ферментативная активность почвы как показатель ее плодородия // Молодой ученый. 2014. С. 277–278.
14. Bardgett R.D., Mommer L., De Vries F.T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes//Trends Ecol. Evol. 2014. № 29. P. 692–699. DOI: 10.1016/j.tree.2014.10.006.
15. Bisen N., Rahangdale C.P. Crop residues management option for sustainable soil health in rise-wheat system: a review // International Journal of Chemical Studies. 2017. № 5 (4). PP. 1038–1042. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/318959582\\_residues\\_management\\_option\\_for\\_sustainable\\_soil\\_health\\_in\\_rise-wheat\\_system\\_a\\_review](https://www.researchgate.net/publication/318959582_residues_management_option_for_sustainable_soil_health_in_rise-wheat_system_a_review) (дата обращения: 10.01.2023).
16. Hirte J. et al. Overestimation of crop root biomass in field experiments due to extraneous organic matter // Front Plant Sci. 2017. № 8. p. 284. DOI: 10.3389/fpls.2017.00284.
17. Philippot L., Raaijmakers J.M., Lemanceau P., Van der Putten W.H. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere // Nat. Rev. Microbiol. 2013. № 11. P. 789–799. DOI: 10.1038/nrmicro3109.
1. Aristovskaya T.V., Chugunova M.V. Экспресс-метод определения биологической активности почв // Pochvovedenie. 1989. № 11. С. 142–147.
2. Beresteckij O.A., Torzhevskij V.I., Mochalov Yu.M. Osobnosti mikroflory dernovo-podzolistoj pochvy pri bessmennom vyrashchivanii sel'skohozyajstvennyh rastenij i v sevooborote // Mikrobiologiya. 1976. Т. 45. Вып. 4. С. 710–716.
3. Dospekhov B.A. Metody polevogo opyta s osnovami statisticheskoj obrabotki / Izd-e 5-e, dopolnennoe i pererabotannoe. М.: Agropromizdat, 1985. 351 s.
4. Dridiger V.K., Stukalov R.S., Gadzhiumarov R.G. Ekonomicheskaya effektivnost' sevooborotov pri vozdelevanii polevyh kul'tur bez obrabotki pochvy // Sel'skohozyajstvennyj zhurnal. 2019. № 4 (12). С. 6–12. DOI: 10.25930/0372-3054/001.4.12.2019.
5. Zamyatin S.A., Maksimova R.B. Vliyanie kul'tur sevooborotov na biologicheskuyu aktivnost' pochvy. Zernovoe hozyajstvo Rossii. 2021. № 4. С. 39–44. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-76-4-39-44.
6. Karabutov A.P., Solovichenko V.D., Nikitin V.V. Vosproizvodstvo plodorodiya pochv, produktivnost' i energeticheskaya effektivnost' sevooborotov // Zemledelie. 2019. № 2. С. 3–7. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10201.
7. Kozlova L.M., Noskova E.N., Popov F.A. Optimizaciya polevyh sevooborotov, kak faktor sohraneniya pochvennogo plodorodiya i ekologizacii zemledeliya // Agroekologiya. 2020. № 3. С. 147–153. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-147-153.
8. Kuzminyh A.N. Vliyanie vidov parov na mikrobiologicheskuyu aktivnost' pochvy // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2012. № 5 (30). С. 44–46.
9. Mishustin E.N., Emcev V.T., Mikrobiologiya. Izd. 3-e, pererab. i dop. М.: Agropromizdat, 1987. 368 s.
10. Nikitin V.V., Solovichenko V.D., Naval'nev V.V., Karabutov A.P. Vliyanie sevooborotov, sposobov obrabotki pochv i udobrenij na izmenenie organicheskogo veshchestva v chernozeme tipichnom // Agrohimiya. 2017. № 2. С. 233.
11. Obshchiya E.N. Hripunov A.I. Cellyulozorazlagayushchaya aktivnost' pochvy v usloviyah sklonovyh zemel' landshaftov kak odin iz elementov ee biologicheskoy aktivnosti // Sel'skohozyajstvennyj zhurnal. 2019. № 2 (12). С. 25–28. DOI: 10.25930/004.2.12.2019.
12. Primenenie metoda l'nyanyh poloten dlya ucheta biologicheskoy aktivnosti pochvy v usloviyah tekhnogennoho zagryazneniya / Ekologicheskaya bezopasnost' v APK. RZH. М., 2008. № 1. 18 s.
13. Saetgalieva G.E. Fermentativnaya aktivnost' pochvy kak pokazatel' ee plodorodiya // Molodoy uchenyj. 2014. С. 277–278.
14. Bardgett R.D., Mommer L., De Vries F.T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes// Trends Ecol. Evol. 2014. № 29. P. 692–699. DOI:10.1016/j.tree.2014.10.006.
15. Bisen N., Rahangdale C.P. Crop residues management option for sustainable soil health in rise-wheat system: a review // International Journal of Chemical Studies. 2017. № 5 (4). PP. 1038–1042. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/318959582\\_residues\\_management\\_option\\_for\\_sustainable\\_soil\\_health\\_in\\_rise-wheat\\_system\\_a\\_review](https://www.researchgate.net/publication/318959582_residues_management_option_for_sustainable_soil_health_in_rise-wheat_system_a_review) (data obrashcheniya: 10.01.2023).
16. Hirte J. et al. Overestimation of crop root biomass in field experiments due to extraneous organic matter // Front Plant Sci. 2017. № 8. p. 284. DOI: 10.3389/fpls.2017.00284.
17. Philippot L., Raaijmakers J.M., Lemanceau P., Van der Putten W.H. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere // Nat. Rev. Microbiol. 2013. № 11. P. 789–799. DOI: 10.1038/nrmicro3109.

## REFERENCES