

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2025 г. С. И. Новоселов^{1,*}, Т. Х. Гордеева¹

¹Марийский государственный университет
424000, Марий Эл, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1, Россия
*E-mail: Serg.novoselov2011@yandex.ru

В серии модельных опытов изучено воздействие ультрафиолетового излучения на почвенную микрофлору и некоторые агрохимические показатели пахотного слоя дерново-подзолистой почвы (Albic Glossic Retisol) Республики Марий Эл. В лабораторной установке для облучения использовали бактерицидную лампу 30-UVС. Время экспозиции составляло 50 ч. Инкубирование почвы проводили при оптимальной температуре и влажности (25°C, 60% ППВ) в течении 14 сут. Агрохимические анализы почвы проводили общепринятыми методами. Численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов определяли методом посева различных почвенных разведений на агаризованные питательные среды. Установлено, что под воздействием ультрафиолета в почве увеличивалось количество минерального и легкогидролизуемого азота, что свидетельствовало о фотохимической деструкции гумуса и образовании более подвижных, способных к вымыванию гумусовых веществ. Выявлено кратковременное снижение под действием ультрафиолетового излучения численности микрофлоры, участвующей в минерализации углерод- и азотсодержащего органического вещества. При этом чувствительность микроорганизмов к воздействию ультрафиолета была следующей: спорообразующие бактерии < актиномицеты < азотобактер < амилولитики < аммонификаторы < микромицеты < нитрификаторы. Показано изменение направленности процессов трансформации органического вещества в сторону активизации процессов минерализации и повышения обеспеченности микроорганизмов легкодоступными питательными веществами.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, дерново-подзолистая почва, почвенная микрофлора, микробиологическая активность почвы.

DOI: 10.31857/S0002188125030087, **EDN:** UQIXLT

ВВЕДЕНИЕ

Жизнедеятельность микроорганизмов неразрывно связана с окружающей их средой. На активность почвенных микроорганизмов и их сообществ оказывает влияние множество различных факторов: физических, агрохимических, биологических и т.п. Одним из факторов внешней среды, оказывающих существенное влияние на живые системы, является ультрафиолетовое излучение (УФИ). Являясь составной частью естественного солнечного спектра, УФ-лучи располагаются между тепловой и проникающей радиацией.

Влияние ультрафиолетового излучения на микроорганизмы различно. Малые дозы УФ-излучения способны оказывать стимулирующее действие на отдельные функции микроорганизмов, более высокие, но не приводящие к гибели дозы, вызывают

торможение ряда процессов обмена, изменение свойств, вплоть до наследуемых [1].

По мнению [2], большая протяженность спектра ультрафиолетовых лучей обуславливает разнообразие их действия как физико-химического, так и биологического характера. Воздействие ультрафиолетовой радиации на биологические объекты можно разделить на 2 основные группы: деструктивного (разрушающего) и фотохимического характера.

Бактерицидное действие УФ-излучения основано на фотохимических реакциях, в результате которых происходят необратимые повреждения ДНК, что препятствует процессу репликации и значительно сокращает скорость размножения бактерий [3] или приводит к гибели микробной клетки в первом или последующих поколениях [4–6].

По данным [7], кривая бактерицидной эффективности УФ-излучения соответствует спектру

поглощения нуклеиновых кислот, т.е. мишенью УФ-излучения являются молекулы ДНК. Помимо ДНК, ультрафиолет действует и на другие структуры клеток, в частности на РНК, клеточные мембраны и т.п. [8, 9].

Микроорганизмы отличаются различной резистентностью к ультрафиолетовым лучам. Более чувствительны к воздействию УФ-излучения вирусы и бактерии в вегетативной форме (палочки, кокки) [10], более устойчивы к их действию грибы, простейшие микроорганизмы и споры бактерий [1, 2].

По данным ряда авторов [11, 12], микроорганизмы с пигментированными конидиями или спорами менее восприимчивы к УФ-излучению, возможно, из-за защитного эффекта, оказываемого высокой концентрацией пигментов, таких как меланин, в их репродуктивных структурах. Под воздействием УФ-света у эпифитных бактерий, дрожжей и грибов, характерных для почв высокогорных районов с повышенной радиацией, образуются каротиноидные и меланоидные пигменты, служащие защитой от радиации [13]. Влияние УФ-излучения на жизнедеятельность грибов связывают главным образом с его мутагенным эффектом, а также с воздействием на плазматическую мембрану [14].

Почва является естественной средой обитания для самых различных микроорганизмов и одним из важнейших природных объектов, обеспечивающих устойчивость и стабильность агроэкосистем. В связи с этим являются актуальными исследования, направленные на изучение состояния почвы и ее свойств под влиянием факторов внешней среды.

Цель работы – изучить влияние ультрафиолетового излучения на микробный комплекс дерново-подзолистой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила дерново-среднеподзолистая, среднесуглинистая почва опытного поля МарГУ, Albic Glossic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric).

Эксперименты проводили в лаборатории с искусственным освещением. В лабораторной установке для облучения использовали бактерицидную лампу 30-UVC. Время экспозиции – 50 ч. При облучении почву периодически перемешивали. Эффект от облучения определяли по разнице до и после облучения. Инкубирование почвы проводили в течении 14 сут при температуре 25°C и влажности 60% от полной полевой влагоемкости.

Содержание легкогидролизуемого азота ($N_{лг}$) определяли по Корнфилду, аммонийного азота ($N-NH_4$) – с реактивом Несслера, нитратного ($N-NO_3$) – потенциометрическим методом с ионоселективным электродом [15].

Образцы почв для микробиологического анализа отбирали из слоя 0–20 см почвы общепринятыми методами [16]. Численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов определяли традиционным методом путем посева различных почвенных разведений на агаризованные питательные среды [17]. Интенсивность микробиологических процессов минерализации почвенного органического вещества оценивали по индексам минерализации, олиготрофности [18].

Измерение всех параметров проводили в пятикратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы Statistica 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что воздействие ультрафиолетового излучения на почву приводило к увеличению количества легкогидролизуемого и минерального азота: минерального азота – с 19.4 до 38.3, легкогидролизуемого – с 67.2 до 88.9 мг/кг. При этом количество аммиачного азота ($N-NH_4$) в почве возросло с 9.41 до 26.13, нитратного азота ($N-NO_3$) – с 10.0 до 12.2 мг/кг (табл. 1).

Увеличение количества аммонийного азота по сравнению с нитратным свидетельствовало о разложении гумусовых веществ почвы. После

Таблица 1. Влияние ультрафиолетового излучения на содержание минерального и легкогидролизуемого азота в дерново-подзолистой почве

Показатель	Без компостирования		С компостированием	
	без облучения	с облучением	без облучения	с облучением
$N_{лг}$, мг/кг	67.2	88.9	75.6	99.4
$N-NH_4$, мг/кг	9.41	26.1	10.5	12.5
$N-NO_3$, мг/кг	10.0	12.2	53.7	72.4
$N_{мин}$, мг/кг	19.4	38.3	64.2	84.9

2-недельного компостирования в условиях оптимальной влажности и температуры данная закономерность сохранялась. Количество легкогидролизуемого и минерального азота увеличивалось в 1.3 раза.

Лабораторные исследования свидетельствовали, что в результате фотохимических реакций происходила деструкция гумуса с образованием более подвижных, способных к вымыванию гумусовых веществ [19].

Анализ микробного комплекса исследованной почвы показал, что ультрафиолетовое облучение оказало негативное влияние на численность микрофлоры, участвующей в трансформации углерод- и азотсодержащего органического вещества: аммонификаторов, амилитических бактерий и актиномицетов, нитрификаторов, олиготрофов и микроскопических грибов. Менее чувствительными к УФ-излучению были спорообразующие бактерии и азотобактер, что было обусловлено, вероятно, наличием покоящихся форм – спор и цист (табл. 2).

Выявлен следующий ряд чувствительности микроорганизмов к воздействию ультрафиолетового излучения: спорообразующие бактерии < актиномицеты < азотобактер < олиготрофы < амилитики < аммонификаторы < микромицеты < нитрификаторы.

Полученные результаты согласуются с данными ряда авторов [1, 3, 7]. По их мнению, ультрафиолетовое излучение одних и тех же длин волн и одинаковой интенсивности обладает селективным бактерицидным действием, что обусловлено уникальностью структуры ДНК каждого живого организма. Авторами было установлено, что грамположительные бактерии более устойчивы к ультрафиолетовому излучению, чем грамотрицательные, а дрожжи, плесневые грибки и споры бактерий гораздо устойчивее к их действию, чем вегетативные формы.

После 2-недельного компостирования в условиях оптимальной влажности и температуры численность исследованных групп микроорганизмов возрастала, как в вариантах с облучением, так и без воздействия ультрафиолета.

В компостированной, облученной УФ-лучами почве увеличивалась численность микрофлоры, участвующей в процессах минерализации органического углерода и иммобилизации минерального азота. Количество аммонифицирующих бактерий, использующих органические формы азота, увеличивалось в варианте без облучения в 3.8 раза, в облученной почве – в 6.8 раза по сравнению с контролем. Количество бактерий, ассимилирующих минеральный азот, также возрастало: амилитических – в 4.8 раза

Таблица 2. Влияние ультрафиолетового излучения на численность микрофлоры дерново-подзолистой почвы

Микроорганизмы	Без компостирования		С компостированием	
	без облучения	с облучения	без облучения	с облучением
Аммонифицирующие, млн кл./г а.с.п. *	5.67 ± 1.10	3.94 ± 0.31	21.7 ± 2.1	26.7 ± 2.4
Амилитические, млн кл./г а.с.п.	6.26 ± 1.14	4.60 ± 0.53	29.7 ± 2.9	38.2 ± 5.7
Актиномицеты, млн кл./г а.с.п.	2.45 ± 0.67	3.01 ± 0.71	9.83 ± 1.70	13.4 ± 2.3
Олигонитрофильные, млн кл./г а.с.п.	10.3 ± 2.3	7.01 ± 1.30	31.1 ± 3.5	52.1 ± 6.7
Олиготрофные, млн кл./г а.с.п.	4.34 ± 0.65	3.39 ± 0.32	16.0 ± 2.0	19.8 ± 2.3
Спорообразующие, тыс. кл./г а.с.п.	176 ± 31	198 ± 29	292 ± 19	319 ± 32
Микромицеты, тыс. кл./г а.с.п.	36.1 ± 3.1	24.9 ± 1.9	61.7 ± 9.9	83.6 ± 8.9
Нитрифицирующие, тыс. кл./г а.с.п.	3.7 ± 0.75	2.30 ± 0.92	6.30 ± 1.10	11.6 ± 3.3
Азотфиксирующие, %	98.7 ± 7.6	94.7 ± 8.1	98.7 ± 7.6	100 ± 13
Коэффициент минерализации	1.54	1.93	1.82	1.93
Коэффициент олигонитрофильности	1.81	1.95	1.43	1.77
Коэффициент олиготрофности	0.76	0.86	0.74	0.74

*а.с.п. - абсолютно-сухая почва.

в почве без облучения, в 8.3 раза – в облученной почве, нитрификаторов – в 1.7 и 5.0 раза соответственно.

Установлено, что численность микроорганизмов, использующих минеральный азот, в 1.2–1.5 раза превышала количество бактерий, трансформирующих его органические формы, что служило показателем интенсификации мобилизационных процессов в почве.

Преобладание микроорганизмов, усваивавших минеральные соединения азота, над бактериями, ассимилирующими его органические формы, указывало на возросшую активность минерализационных процессов и обеспеченность легкодоступным азотом [18], что подтверждено высоким коэффициентом микробиологической минерализации (>1).

В компостированной облученной почве увеличивался удельный вес спорообразующих бактерий и актиномицетов, являющихся активными деструкторами органических веществ в почве. Высокая численность бактерий и актиномицетов в облученной компостированной почве свидетельствовала о достаточно глубокой минерализации азотсодержащих соединений и преобладании в ней окислительных процессов [20]. Изменение численности микроорганизмов данных групп совпадало с динамикой количества азотомобилизирующих бактерий. Количество бактерий увеличилось в 1.61 раза, актиномицетов – в 1.34–4.44 раза по сравнению с исходной почвой.

Исходная почва характеризовалась низким содержанием микроскопических грибов: без облучения – 36.1 тыс. КОЕ/г абсолютно сухой почвы, облученная – 24.9 тыс. КОЕ/г абсолютно сухой почвы. Процессы микробной минерализации органических соединений в этом случае шли в основном за счет бактериальных комплексов, в том числе и актиномицетов. В компостированной почве количество микромицетов увеличилось, что свидетельствовало об усилении роли мицелиальных форм в минерализационных процессах.

Существенную роль в мобилизации азота в почве играют олигонитрофильные бактерии. Наибольшая численность олигонитрофилов отмечена в компостированной облученной почве, при этом увеличивался и коэффициент олигонитрофильности, что могло свидетельствовать о значительном присутствии несимбиотических азотфиксаторов, т.к. многие олигонитрофилы обладают способностью связывать молекулярный азот [21]. Увеличение численности олигонитрофильных бактерий свидетельствовало как о достаточной обеспеченности почвы доступным органическим веществом, так и отражало уровень интенсивности мобилизационных процессов в почве.

Следует отметить высокое содержание в компостированной облученной почве олиготрофных микроорганизмов, использующих низкие концентрации

мономеров и завершающие минерализацию органических остатков. Олиготрофы метаболически связаны с аммонификаторами, их количество увеличивается в тех зонах, где процессы минерализации подходят к завершению и органические вещества находятся в низких концентрациях [22].

Активность олиготрофов, не требовательных к элементам питания, изменялось аналогично, как и численность бактерий, культивируемых на МПА. Однако низкие величины коэффициента олиготрофности (<1) свидетельствовали о преобладании зимогенной микрофлоры над микроорганизмами группы рассеивания при достаточном количестве легкодоступного органического вещества почвы [23].

В результате проведенного исследования выявлено изменение коэффициентов минерализации и олиготрофности. Наибольшие величины коэффициента минерализации отмечены в компостированной облученной почве, что определяло высокую активность минерализационных процессов, при этом величина коэффициента олиготрофности снижалась, что отражало достаточную обеспеченность микроорганизмов легкодоступными питательными веществами.

ВЫВОДЫ

1. Воздействие ультрафиолета на почву приводило к увеличению количества легкогидролизуемого и минерального азота.
2. Ультрафиолетовое облучение почвы снижало численность микрофлоры, участвующей в минерализации углерод- и азотсодержащего органического вещества: аммонификаторов, амилитиков, нитрификаторов, олиготрофов и микроскопических грибов. Менее чувствительными к УФ-излучению были спорообразующие бактерии и азотобактер, что было обусловлено, вероятно, наличием покоящихся форм – спор и цист.
3. Двухнедельное компостирование в условиях оптимальной влажности и температуры способствовало возрастанию количества исследованных групп микроорганизмов, как в вариантах с облучением, так и без воздействия ультрафиолета.
4. Выявлено изменение направленности процессов трансформации органического вещества в сторону активизации процессов минерализации и повышения обеспеченности микроорганизмов легкодоступными питательными веществами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиж Т.В., Козьмин Г.В., Полякова Л.П. Радиационная обработка как технологический прием в целях повышения уровня продовольственной безопасности // Вестн. РАН. 2011. № 4. С. 44–49.

2. *Ненахова Е.В., Николаева Л.А.* Ультрафиолетовое излучение. Влияние ультрафиолетового излучения на организм человека. Иркутск: ИГМУ, 2020. 58 с.
3. *Харитонов В.Д., Шерстнева Н.Е.* Влияние ультрафиолетового излучения на основные компоненты и микробиологические показатели жидких пищевых продуктов // Тр. БГУ. 2014. Т. 9. Ч. 1. С. 9–22.
4. *Begum M., Hocking A.D., Miskelly D.* Inactivation of food spoilage fungi by ultra violet (UVC) irradiation // *Inter. J. Food Microbiol.* Elsevier, 2009. V. 129. № 1. P. 74–77.
5. *Corrêa T.Q.* Efficiency of an air circulation decontamination device for microorganisms using ultraviolet radiation // *J. Hospital Infection.* W.B. Saunders, 2021. V. 115. P. 32–43.
6. *Racchi I.* Sterilization of food packaging by UV-C irradiation: Is *Aspergillus brasiliensis* ATCC 16404 the best target microorganism for industrial biovalidations // *Inter. J. Food Microbiol.* Elsevier, 2021. V. 357. P. 109383.
7. *Антонов В.В.* Разработка и использование малогабаритного спектрофотометрического УФ-радиометра для измерения спектральной облученности: Дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2011. 125 с.
8. *Лаврентьева Л.В., Авдеев С.М., Соснин Э.А., Величевская К.Ю.* Бактерицидное действие ультрафиолетового излучения эксимерных и эксиплексных ламп на чистые культуры микроорганизмов // *Вестн. ТомскГУ.* 2008. № 2. С. 18–27.
9. *Астахова С.А.* Инактивация микроорганизмов ультрафиолетовым излучением эксилампы с использованием пероксида водорода и нанодисперсных частиц диоксида титана: Дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2009. 97 с.
10. *Williamson C.E., Neale P.J.* Ultraviolet radiation // *Encyclopedia of Inland Waters.* Elsevier, 2022. P. 83–94.
11. *Cockell C.S., Knowland J.* Ultraviolet radiation screening compounds // *Biol. Rev.* 1999. V. 74. № 3. P. 311–345.
12. *Esbelin J.* Role of pigmentation in protecting *Aspergillus niger* conidiospores against pulsed light radiation // *Photochemistry and Photobiology.* John Wiley & Sons, Ltd., 2013. V. 89. № 3. P. 758–761.
13. *Комарова А.С.* Влияние микроволнового излучения на почвенные бактерии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: Из-во МГУ, 2008. 24 с.
14. *Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Новожилов Ю.К., Абакумов Е.В.* Оценка антропогенного влияния на микобиоту Антарктики в районах российских полярных станций // *Сибир. экол. журн.* 2018. Т. 5. С. 514–525.
15. *Новоселов С.И., Завалин А.А.* Роль фотохимического фактора в деструкции гумусовых веществ почвы // *Агрохимия.* 2013. № 1. С. 59–64.
16. *Методы почвенной микробиологии и биохимии* / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
17. *Теннер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И.* Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2004. 256 с.
18. *Муха В.Л.* О показателях, отражающих интенсивность и направленность почвенных процессов // *Тр. ХарьковСХИ.* 1980. Т. 273. С. 13–16.
19. *Новоселов С.И.* Влияние фотохимического воздействия света на подвижность гумусовых веществ и свойства почвы // *Агрохимия.* 2021. № 12. С. 37–41.
20. *Гусев М.В., Минеева Л.А.* Микробиология. М.: Академия, 2003. 464 с.
21. *Титова В.И., Козлов А.В.* Методы оценки функционирования микробного сообщества почвы, участвующего в трансформации органического вещества. Н.Новгород, 2012. 64 с.
22. *Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова М.Г.* Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 445 с.
23. *Гузев В.С., Иванов П.И.* Функциональная структура зимогенной части микробной системы почвы // *Изв. АН СССР. Сер. Биол.* 1986. № 5. С. 739–746.

Influence of Ultraviolet Radiation on Microbiological Activity of Sod-Podzolic Soil

S. I. Novoselov^{a,#}, T. H. Gordeeva^a

^a*Mari State University,
pl. Lenina 1, Mari El, Yoshkar-Ola 424000, Russia,*
[#]*E-mail: Serg.novoselov2011@yandex.ru*

In a series of model experiments, the effects of ultraviolet radiation on the soil microflora and some agrochemical parameters of the arable layer of sod-podzolic soil (Albic Glossic Retisol) of Republic of Mari El were studied. A 30-UVC bactericidal lamp was used for irradiation in a laboratory installation. The exposure time was 50 hours. Soil incubation was carried out at an optimal temperature and humidity (25°C, 60% full field moisture capacity) for 14 days. Agrochemical analyses of the soil were carried out using generally accepted methods. The number of the main ecological and trophic groups of microorganisms was determined by sowing various soil dilutions on agarized nutrient media. It was found that under the influence of ultraviolet radiation, the amount of mineral and easily hydrolyzable nitrogen in the soil increased, which indicated the photochemical destruction of humus and the formation of more mobile humic substances capable of leaching. A short-term decrease in the number of microflora involved in the mineralization of carbon- and nitrogen-containing organic matter was revealed under the influence of ultraviolet radiation. At the same time, the sensitivity of microorganisms to ultraviolet radiation was as follows: spore-forming bacteria < actinomycetes < azotobacter < amylolytics < ammonifiers < micromycetes < nitrifiers. The change in the orientation of the transformation processes of organic matter towards the activation of mineralization processes and an increase in the provision of microorganisms with readily available nutrients is shown.

Keywords: ultraviolet radiation, sod-podzolic soil, soil microflora, microbiological activity of the soil.