УДК 577.342

ПОГЛОЩЕНИЕ УФ ЯЧМЕНЕМ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ОРГАНОГЕНЕЗА

Цыгвинцев П.Н.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»,
Обнинск, e-mail: rirae70@gmail.com

Предложен экспериментальный метод оценки поглощенной и отраженной доли УФ-излучения посевами растений. Показан одинаковый характер поглощения и отражения ультрафиолета разных диапазонов (УФ-А, УФ-В, УФ-С) растениями ячменя. Доля отраженного ультрафиолета незначительна и составляет 2,4%. Зависимость поглощенной доли ультрафиолета от общей площади листьев носит линейный характер и обусловлена увеличением проективного покрытия по мере роста растений и увеличения количества листьев. При мощности УФ-излучения 1 Вт/м² растением ячменя поглощается 0,17–1,33 мВт, в зависимости от фазы органогенеза. На ранних и поздних этапах органогенеза растений ячменя поглощение ультрафиолетового излучения значительно снижено, по сравнению с III–VI этапами органогенеза, что обусловлено различным пространственным расположением листьев в посевах. Удельная поглощенная мощность УФ (Вт/кг) линейно снижается по мере развития растений и увеличения их надземной биомассы.

Ключевые слова: УФ-радиация, поглощенная радиация, ячмень

ABSORPTION OF UV BY BARLEY AT DIFFERENT STAGES OF ORGANOGENESIS

Tsygvintsev P.N.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, e-mail: rirae70@gmail.com

An experimental method for estimating the absorption and reflection of UV radiation by plant crops is proposed. The same character of absorption and reflection of ultraviolet of different ranges (UV-A, UV-B, UV-C) by barley plants is shown. The fraction of reflected ultraviolet is 2.4%. The dependence of the absorbed fraction of the ultraviolet on the total leaf area is linear and is due to the increase in the projective coverage as the plants grow and the number of leaves increases. At a UV power of 1 W/m², the barley plant absorbs 0.17–1.33 mW, depending on the phase of organogenesis. The absorption of ultraviolet radiation is significantly reduced in the early and late stages of organogenesis of barley plants, compared with the III–VI stages of organogenesis, which is due to the different spatial arrangement of leaves in the crops. The specific absorbed power of UV (W / kg) decreases linearly with the development of plants and an increase in their above-ground biomass.

Keywords: UV-radiation, absorbed radiation, barley

В настоящее время при изучении эффектов ультрафиолетового излучения на биологические объекты используется концепция биологически эффективного УФ-излучения. Данная концепция заключается в оценке относительного вклада в наблюдаемый биологический эффект ультрафиолета произвольной длины волны по отношению к квантам УФ-излучения с определенной длиной волны, вызывающим биологический эффект по величине, принятой за единицу. Спектры биологического действия УФ-В-излучения на морфологические и ростовые характеристики высших растений были разработаны [1] и впоследствии дополнены для УФ-А-излучения [2].

Биологически эффективные дозы, полученные для заданного биологического эффекта, позволяют сравнивать степень радиационного воздействия по величине именно этого биологического эффекта, то есть определять зависимость «доза – эффект» как от искусственных источников ультрафиолетового излучения, так и от солнечного излучения. Но в то же время концепция биологически эффективной дозы имеет ряд ограничений, обусловленных различны-

ми механизмами действия ультрафиолета с разной частотой. Поэтому необходимо развивать в дополнение к концепции биологически эффективной дозы также и концепцию поглощенной дозы в отношении неионизирующего излучения.

По мнению одних авторов [3], поглощение лучистой энергии листьями растений происходит в соответствии с законом поглощения Ламберта – Бэра, тогда как другие авторы [4–5] полагают, что этот закон не применим к рассеивающим биологическим объектам, особенно таким, как листья растений.

В связи с высокой степенью гетерогенности листьев растений оптические и фотометрические закономерности, характеризующие их, безусловно, отличаются от закономерностей, принятых в оптике и спектроскопии прозрачных сред [5]. Поэтому представляет интерес проследить, существует ли закономерная зависимость между биологическим эффектом и величиной коэффициента поглощения лучистой энергии [5].

Однако геометрическая сложность растений, как объекта изучения, не позволяет определить конкретную величину поглощенной энергии, тем более что коэффици-

ент поглощения сильно зависит от спектра излучения.

Цель работы состоит в оценке доли поглощенного ультрафиолетового излучения посевами ячменя на разной стадии онтогенеза.

Материалы и методы исследования

Сущность метода состоит в измерении потока излучения через замкнутую поверхность (в нашем случае – параллелепипед), внутри которой помещен объект изучения, и сравнение с тем же потоком, но без объекта. Объектом изучения были посе́вы ячменя сорта Зазерский в вегетационном сосуде (диаметром 20 см на уровне почвы) на разной стадии вегетации, плотность посевов составляла 14–20 растений на сосуд, или 350–480 растений на метр квадратный, в одном случае, для сравнения, использовали разреженный посев – 7 растений на сосуд, или 170 растений на метр квадратный. Для фиксации радиометра в постоянных точках измерения использовали параллелепипед, изготовленный из металлической сетки размером ячейки 45х45 мм, что обусловлено конструктивными особенностями радиометра. Вегетационный сосуд с посевами ячменя размещали таким образом, чтобы измерения на нижней грани параллелепипеда приходились на уровне почвы. Для фоновых измерений таким же образом размещали вегетационный сосуд с почвой без растений. Источником УФ-излучения являлась лампа ДРТ-240, размещенная в 30 см над верхней поверхностью параллелепипеда по центру, измерения проводили в темной комнате при стабильном режиме работы лампы.

Измерение потока излучения проводили УФ-радиометром ТКА-АВС, предназначенном для измерения энергетической УФ-облученности в трех диапазонах:

- УФ-А (315...400 нм) источниками УФ-излучения за исключением газоразрядных ртутных ламп без люминофоров;
- УФ-В (280...315 нм) источниками УФ-излучения за исключением газоразрядных ртутных ламп с люминофорами типа «А», а также естественных источников излучения;
- УФ-С (200...280 нм) газоразрядными ртутными лампами высокого и низкого давления без люминофоров.

Поскольку в нашем эксперименте источником излучения являлась ртутная лампа высокого давления без люминофора, показания прибора в области УФ-А имели систематическую погрешность. Однако, так как нас интересует только относительная доля поглощенного УФ-излучения, данное обстоятельство не имеет значения.

Угол измерения данным прибором составляет 20–30°, в зависимости от диапазона, поэтому в некотором приближении можно считать показания измерения равными потоку излучения, перпендикулярному плоскости измерения.

Измерения проводили по всем ячейкам параллелепипеда 7х7х11. Для дальнейших расчетов использовали только те ячейки, разница в которых при измерении с объектом составляла более 5% от фоновых измерений.

Поглощенную мощность излучения рассчитывали как разницу между не прошедшей через посе́вы и отраженной мощностью излучений:

$$U_{ab} = U_d - U_r, \quad (1)$$

где U_d – не прошедший через посе́вы поток УФ-излучения, интегрированный по площади тех ячеек с объектом, где поток уменьшался, разница с фоновыми измерениями, мВт;

U_r – отраженный посевами поток УФ-излучения, интегрированный по площади тех ячеек с объектом, где поток увеличивался, разница с фоновыми измерениями, мВт.

Поскольку источник освещения располагался на небольшом расстоянии от объекта, средний поток излучения на посе́вы рассчитывали по формуле

$$S = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{S_0 \times L^2}{(L-x)^2} \times dx = S_0 \times \frac{L}{L-H}, \quad (2)$$

где S_0 – поток излучения на уровне почвы, Вт/м²;

L – расстояние от почвы до источника излучения, м;

H – средняя высота растений в посевах, м.

Для сравнения различных измерений и эффективности поглощения УФ разного диапазона полученные результаты нормировали на одно растение и на поток излучения 1 Вт/м² на уровне почвы.

Достоверность различий средних значений проводили t-критерием, в тексте и таблице представлены средние значения с ошибкой.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлен пример фактических измерений потока УФ-излучения через поверхность параллелепипеда при фоновом измерении и с объектом. Как и следовало ожидать, максимальная часть потока проходит через нижнюю грань, на боковых гранях наблюдается сверху вниз снижение тангенциальной доли излучения от источника, а на верхней грани регистрируется незначительный поток отраженного излучения от внутренних элементов установки.

Регистрация изменения потока при измерении с объектом (посе́вы ячменя), хорошо видимая на рис. 1, позволила рассчитать мощность поглощенного и отраженного УФ-излучения. Полученные данные, а также морфологические показатели посевов ячменя представлены в табл. 1–2. Следует отметить, что при вегетационных экспериментах в условиях теплицы развитие растений проходит заметно медленнее, чем должно быть в полевых условиях, к тому же образование боковых стеблей и их рост сильно замедлены.

Нормирование полученных данных на одно растение в посе́ве и на поток УФ-излучения в 1 Вт/м² позволяет сравнить поглощение и отражение ультрафиолета различных диапазонов ячменем на разных этапах органогенеза (табл. 3). Ранговый дисперсионный анализ данных табл. 3 показывает отсутствие различий как в поглощении ($p < 0,40$), так и в отражении ($p < 0,22$) УФ разных диапазонов. В то же время различия между измерениями высоко достоверны ($p < 0,01$).

Рис. 1. Развертка поверхности измерения потока УФ-излучения для посевов ячменя на стадии колошения

Таблица 1

Показатели растений ячменя в посевах

№ измерения	Возраст растений, сутки	Количество растений на сосуд	Этап органогенеза по Куперману	Высота растений, см	Общая масса листьев, г	Надземная фитомасса, г	Общая площадь листьев, см ²
1	20	19	II	23,4 ± 1,5	5,32	7,98	76 ± 6
2	29	20	II	31,6 ± 1,4	5,8	9,4	98 ± 7
3	35	7	III	49,1 ± 1,5	11,2	18,2	89 ± 8
4	58	18	V-VI	48,1 ± 1,3	13,68	24,84	140 ± 12
5	86	20	VIII	60,3 ± 3,0	16,8	47,5	240 ± 20
6	100	14	X	64,4 ± 2,0	29,4	71,1	239 ± 14

Таблица 2

Поглощенная и отраженная мощность УФ-излучения в посевах ячменя

№ измерения	Поток на посев, Вт/м ²			Поглощенная мощность УФ, мВт по диапазонам			Отраженная мощность УФ, мВт по диапазонам		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1,4	0,7	1,2	4,4	0,4	7,0	0,1	0,04	0,4
2	1,6	0,8	1,4	14,2	6,9	11,5	0,3	0,1	0,7
3	2,6	1,3	2,3	20,3	12,5	24,2	0,6	0,3	1,5
4	2,6	1,4	2,3	43,1	20,2	36,6	0,6	0,3	1,5
5	4,7	2,5	4,1	78,5	39,1	66,1	2,0	0,9	1,0
6	5,9	3,0	5,0	57,1	30,7	47,8	1,9	1,3	2,1

Таблица 3

Поглощенная и отраженная мощность УФ-излучения отдельным растением ячменя при потоке 1 Вт/м²

№ измерения	Поглощенная мощность УФ, мВт по диапазонам				Отраженная мощность УФ, мВт по диапазонам			
	A	B	C	Среднее	A	B	C	Среднее
1	0,17	0,03	0,31	0,17 ± 0,08	0,004	0,003	0,018	0,008 ± 0,005
2	0,44	0,41	0,41	0,42 ± 0,01	0,009	0,006	0,025	0,013 ± 0,006
3	1,11	1,35	1,52	1,33 ± 0,12	0,033	0,032	0,094	0,053 ± 0,021
4	0,92	0,82	0,89	0,88 ± 0,03	0,013	0,012	0,036	0,020 ± 0,008
5	0,84	0,80	0,81	0,82 ± 0,01	0,021	0,018	0,012	0,017 ± 0,003
6	0,69	0,72	0,68	0,70 ± 0,01	0,023	0,031	0,030	0,028 ± 0,002

Поглощенная
мощность УФ на
1 растение, мВт

Рис. 2. Зависимость поглощенной и отраженной мощности УФ-излучения ячменем от площади листьев растения

Различия в величине поглощенного УФ на разных этапах органогенеза растений обусловлены в первую очередь изменениями в величине ассимилирующей поверхности, площади листьев и их расположением (рис. 2).

Если рассматривать поглощенный и отраженный поток ультрафиолета с учетом площади листовой поверхности, то можно убедиться, что на определенном этапе органогенеза растение поглощает практически все, падающее на него УФ-излучение (рис. 3).

Как видно из данных, представленных на рис. 3, на III–VI этапах органогенеза растение поглощает практически весь падающий на него поток (1 Вт/м^2), отраженный поток не зависит достоверно от этапа органогенеза и составляет в среднем всего $2,4 \pm 0,4\%$ от потока, падающего на растение. Низкая удельная доля поглощенного УФ-излучения на раннем этапе органогенеза обусловлена, по-видимому, вертикальным расположением листьев растения, что снижает их проективное покрытие по сравнению с площадью листьев. На поздних этапах органогенеза снижение удельной доли поглощенного ультрафиолета обусловлено частичным затенением листьев в посевах.

Подтверждением этого предположения является наличие большого количества защитных пигментов в клетках листьев яч-

меня. Подобного мнения придерживаются и другие авторы [5]. Ряд авторов сообщали, что растения поглощают УФ-радиацию очень эффективно (свыше 90%), и что в сущности ее не пропускают [6]. Следовательно, обычно отражается менее чем 10% УФ-радиации. Интересно заметить, что в случае пустынных сочных растений, таких как *Agave americana* и *Opuntia leavis*, отражение может достигать 10–20%, в то время как у хвойных растений отражение может быть только 2–3% [6].

В настоящее время в радиобиологии неионизирующих излучений основным дозовым критерием является экспозиционная доза (Дж/м^2), однако радиобиологические эффекты обусловлены не экспозиционной, а поглощенной дозой излучения (Дж/кг). Учитывая, что поглощение излучения у растений ячменя происходит в основном листьями, как имеющими наибольшую ассимилирующую поверхность, можно рассчитать удельную поглощенную мощность при потоке 1 Вт/м^2 . При этом, если рассматривать поглощенную мощность УФ-излучения в листьях ячменя в зависимости от общей надземной биомассы растений (рис. 4), можно отметить быстрое снижение удельной поглощенной дозы по мере роста растения.

Рис. 3. Изменение удельного поглощенного и отраженного ультрафиолета от возраста растений ячменя при потоке УФ-излучения на уровне почвы 1 Вт/м^2

Рис. 4. Удельная поглощенная мощность УФ-излучения (Вт/кг) при плотности потока 1 Вт/м² в зависимости от надземной биомассы растений ячменя

Таким образом, оценивая радиобиологические эффекты от действия УФ-радиации на ячмень, необходимо учитывать различия в поглощении ультрафиолета на разных этапах органогенеза растений.

Выводы

1. Различные диапазоны УФ-излучения практически одинаково поглощаются и отражаются растениями. При этом доля отраженного ультрафиолета для ячменя составляет 2,4%.

2. Зависимость поглощенной доли ультрафиолета от общей площади листьев носит линейный характер и обусловлена увеличением проективного покрытия по мере роста растений и увеличения количества листьев. На ранних и поздних этапах органогенеза растений ячменя поглощение ультрафиолетового излучения значительно снижено, по сравнению с III–VI этапами органогенеза, что обусловлено различным

пространственным расположением листьев в посевах.

3. Для сравнения радиобиологических эффектов действия острого УФ-облучения на растения, находящиеся на разных этапах органогенеза, необходимо учитывать не только экспозиционную, но и поглощенную дозу.

Список литературы

1. Caldwell M.M. Photophysiology. Academic press. – New York, 1971. – Vol. 6. – P. 131–177.
2. Flint S.D., Caldwell M.M. Field testing of UV biological spectral weighting functions for higher plants. // Physiol. Plant. – 2003. – Vol. 117. – P. 145–153.
3. Seybold A. Über die optischen Eigenschaften der Laubblätter. I–IV. Planta. – 1933, 20, Heft 4, 577.
4. French C.S., Young V.K. The absorption action and fluorescence spectra of photosynthetic pigments in living cells and in solutions. In Radiation biol. – 1956, III, 343. Ed. Hollaender.
5. Брандт А.Б., Тареева С.В. Оптические параметры растительных организмов. М.: Наука, 1967. – 281 с.
6. Gates D.M., Keegan H.J., Schleter J.C. and Wiedner V.R. Spectral properties of plants. Appl. Opt. – 1965. – № 4. – P. 11–20.