НОВЫЙ ВИД ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЗЕЛЁНЫХ РАСТЕНИЙ

До последнего времени известен был один вид люминесценции растений — флуоресценция.

Флуоресценция зелёных растений была открыта сто лет назад Стоксом. В настоящее время исследованию этого явления посвящено значительное количество работ.

Установлено, что флуоресцирует хлорофилл листьев. Наиболее интенсивная полоса флуоресценции листьев обусловлена хлорофиллом *a* и имеет максимум приблизительно при 682 *мμ*; кроме того, обнаружена более слабая полоса с максимумом при 656 *мμ*, обусловленная хлорофиллом *b*, и две слабые полосы от хлорофилла *a* с максимумом при 740 *мμ* и 812 *мμ*.

Интенсивность флуоресцентного излучения живых листьев составляет приблизительно 0,1% от количества поглощённого света; в растворах хлорофилла интенсивность флуоресценции в десятки раз больше.

Основным стимулом к изучению флуоресценции было убеждение, что полученные данные могут дать прямые сведения о механизме использования световой энергии растениями при фотосинтезе. Однако связь между флуоресценцией и эффективностью использования световой энергии при фотосинтезе оказалась более сложной, чем это предполагалось ранее.

В настоящее время имеются основания считать, что независимо от длины волны поглощаемого света возбуждённая молекула хлорофилла практически мгновенно переходит на более низкий энергетический уровень, соответствующий энергии «красного» кванта. Из этого состояния возможны различные пути превращения энергии возбуждения. Возможен, во-первых, прямой переход на основной уровень; этот случай соответствует испусканию красного света флуоресценции. Гораздо более вероятен, однако, переход в результате процесса внутренней конверсии на метастабильный уровень, лежащий несколько ниже «красного» уровня. Именно с этого метастабильного уровня, повидимому, и происходит передача энергии возбуждения хлорофилла фотосинтетическому акцептору. Очевидно, что вероятность такой передачи мало зависит от вероятности испускания кванта флуоресцентного излучения.

Теоретически можно было ожидать, что в результате флуктуаций тепловой энергии часть молекул хлорофилла, находящихся в долгоживущем метастабильном состоянии, перейдёт обратно на «красный» уровень с последующим излучением кванта света. Однако экспериментально такая замедленная флуоресценция не наблюдалась. Мыслим также и прямой переход из метастабильного состояния в основное; этот случай соответствовал бы слабому фосфоресцентному излучению, лежащему в ближайшей инфракрасной области. Опыты, специально поставленные для обнаружения этого излучения, также не дали положительного результата.

Вместо этих теоретически ожидаемых, чисто «физических» видов люминесценции недавно случайно был открыт новый вид послесвечения, обладающего рядом интересных свойств [1]. Было обнаружено, что если применить достаточно чувствительный детектор света, то после предварительного облучения листьев растений светом, поглощаемым хлорофиллом (т. е. светом, лежащим практически полностью в видимой области спектра), можно обнаружить весьма слабое и длительное послесвечение листьев.

В качестве детектора света применялся фотоумножитель в сочетании с усилителем. Охлаждая умножитель до температуры жидкого азота, удалось наблюдать послесвечение в течение нескольких минут. Спустя 0,1 сек. по прекращении облучения интенсивность люминесценции оказалась

в тысячи раз меньше интенсивности обычной флуоресценции. Низкой интенсивностью свечения и следует объяснить, повидимому, запоздалое открытие нового явления.

В результате обстоятельного исследования удалось установить основные свойства нового вида люминесценции.

Следующие характеристики сближают её с обычной флуоресценцией:

1) По спектральному составу оба типа излучения подобны и, возможно, идентичны; проделанные измерения, однако, не достаточно точны для доказательства тождественности спектров.

2) Спектры возбуждения совпадают между собой и подобны спектру действия фотосинтеза, а следовательно, и спектру поглощения хлорофилла.

3) Зависимость интенсивности послесвечения от концентрации углекислого газа одинакова для обоих типов люминесценции; именно, увеличение концентрации CO_2 уменьшает интенсивность люминесценции.

По другим своим свойствам обнаруженное послесвечение существенно отличается от обычной флуоресценции и вместе с тем самым непосредственным образом связано с фотосинтезом:

1) Скорости затухания отличаются в 10^8—10^9 раз.

2) В неполярных растворах хлорофилла новое послесвечение (так же как и фотосинтез) не наблюдается, в то время как интенсивность флуоресценции, как уже отмечалось, возрастает в десятки раз.

3) Ультрафиолетовые лучи достаточной интенсивности уничтожают способность листа испускать длительное люминесцентное излучение и вместе с тем полностью останавливает фотосинтез; флуоресценция при тех же условиях практически не меняется.

4) Низкая температура (4—6° С) снижает интенсивность люминесценции и одновременно тормозит фотосинтез; интенсивность же флуоресценции, наоборот, увеличивается.

5) Световое насыщение люминесценции и фотосинтеза наступает приблизительно при одном и том же значении интенсивности возбуждающего света; интенсивность же флуоресценции продолжает ещё расти при значительно больших значениях интенсивности возбуждающего света.

6) Химические агенты, обычно тормозящие фотосинтез, снижают и интенсивность люминесценции и усиливают флуоресценцию.

Такие свойства как температурная зависимость, световое насыщение и влияние химических агентов указывают, что наблюдаемое длительное послесвечение сопряжено по крайней мере с одной энзиматической химической реакцией и, следовательно, не может быть объяснено чисто физическими явлениями — замедленной флуоресценцией или фосфоресценцией.

Для объяснения полученных результатов авторы делают предположение, что и в общей цепи реакций фотосинтеза некоторые из ранних реакций обратимы вплоть до высвечивания поглощённого кванта света.

Дополнительные данные в пользу такого хемилюминесцентного механизма были получены при изучении длительного послесвечения у изолированных хлоропластов [2]. Хлоропласты, т. е. тельца, содержащие хлорофилл, обычно находятся в клетках листьев и могут быть отделены от клеток путём растирания листьев в подходящей жидкости с последующей фильтрацией и центрифугированием. Чрезвычайно интересным свойством таких «изолированных» хлоропластов является их способность выделять кислород под действием света в присутствии достаточно активных окислителей (реакция Хилла). Отметим, что углекислый газ, являющийся окислителем при фотосинтезе, не является достаточно активным окислителем для осуществления реакции Хилла.

Новое послесвечение удалось также обнаружить и у изолированных хлоропластов. Такие черты, как температурная зависимость, влияние химических агентов, скорость затухания и световое насыщение, оказались сходными со свойствами, наблюдаемыми у листьев. Как можно было ожидать, углекислый газ не влияет на интенсивность люминесценции изолированных хлоропластов.

Наиболее существенным результатом было количественное доказательство того, что интенсивность люминесценции и скорость выделения кислорода одинаковым образом зависят от интенсивности возбуждающего света. В частности, насыщение обоих процессов наблюдалось при одном и том же значении интенсивности падающего света. Этот факт рассматривается автором как решающий довод в пользу хемилюминесцентной природы длительного послесвечения.

В настоящее время трудно оценить значение нового явления для изучения механизма фотосинтеза. Однако самый факт существования такого биологического механизма хемилюминесценции представляет, несомненно, большой принципиальный интерес.

Л. Б.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. L. Strehler, W. T. Arnold, Gen. Phys. **34**, 809 (1951).
2. B. L. Strehler, Arch. Biochem. Biophys. **34**, 239 (1951).