

лую энергию и обладают магнитным моментом, появление которого обусловлено тем, что направления спинов возбужденного и одного из невозбужденных электронов совпадают. Вероятность того, что молекула хлорофилла, находясь в возбужденном состоянии, успеет прореагировать с другой молекулой, гораздо больше в случае триплетного состояния (из которого происходит фосфоресценция), чем в случае синглетного возбужденного состояния (ответственного за флуоресценцию). Экспериментально было показано, что хлорофилл в органических растворителях может находиться в триплетном состоянии, но роль этих состояний в процессе фотосинтеза еще не выяснена.

#### 4.2. Перенос энергии. Сенсibilизированная флуоресценция

Явление сенсibilизированной флуоресценции включает взаимодействие двух молекул в растворе, причем они могут быть разделены большим числом молекул растворителя. В этом случае перенос энергии проявляется, когда раствор, содержащий молекулы двух разных пигментов, освещают светом такого спектрального состава, который может поглощаться лишь одним из пигментов (называемым *донором* энергии). Однако при этом спектр излучения раствора соответствует спектру флуоресценции второго пигмента — *акцептора* энергии. Таким образом происходит резонансный перенос энергии возбуждения от молекулы донора к молекуле акцептора. Одно из необходимых условий переноса энергии состоит в том, что уровень энергии возбужденного (флуоресцирующего) состояния донора должен быть выше или по крайней мере не ниже, чем соответствующий уровень энергии акцептора. Или, иначе говоря, полоса флуоресценции молекулы донора должна перекрываться с полосой поглощения молекулы акцептора (рис. 4.3).

Во многих водорослях кванты света, поглощенные вспомогательными пигментами, передаются с большей или меньшей эффективностью молекулам хлорофилла *a*. Этот перенос энергии, по-видимому, происходит по механизму, подобному тому, который действует при сенсibilизированной флуоресценции. В зеленых водорослях

флуоресценция хлорофилла *a* наблюдается при возбуждении самого хлорофилла *a*, а также хлорофилла *b* и каротиноидов. Энергетические уровни хлорофилла *a* самые низкие (о чем можно судить по положению спектра его флуоресценции), поэтому перенос энергии в хлоропласте всегда направлен к хлорофиллу *a*.

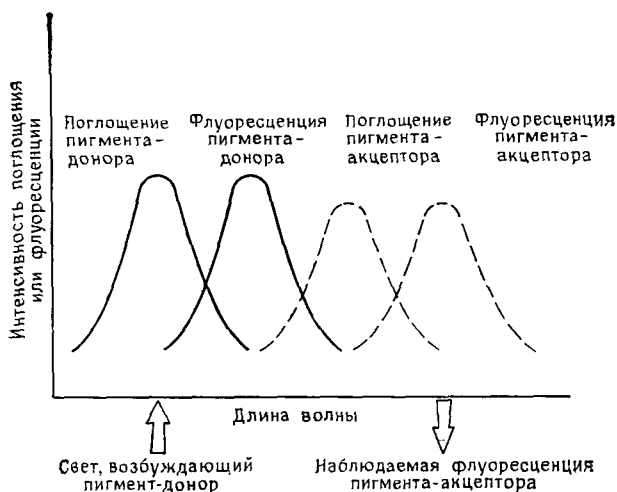


Рис. 4.3. Взаимное расположение полос поглощения и сенсibilизированной флуоресценции.

Изучение флуоресценции хлорофилла *a* и квантового выхода фотосинтеза у *Chlorella* показало, что у этой водоросли перенос энергии от хлорофилла *b* к хлорофиллу *a* происходит с эффективностью 100%, тогда как эффективность переноса энергии от каротиноидов к хлорофиллу *a* составляет лишь 40%. Для эффективного переноса энергии между молекулами различных пигментов необходимо, чтобы они были плотно упакованы в ламеллах хлоропластов.

### 4.3. Эффект Эмерсона и две световые реакции

Если процесс фотосинтеза возбуждается монохроматическим светом и при этом его эффективность измеряют по выделению  $O_2$  или по фиксации  $CO_2$ , то график зависи-