

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт морских биологических исследований
им. А. О. Ковалевского

Геворгиз Р. Г., Малахов А. С.

**Пересчёт величины освещённости
фотобиореактора в величину облучённости**

Учебно-методическое пособие

Севастополь, 2018

УДК 582.232:58.082

ББК 28.591.2

Г–27

Р е ц е н з е н т : Корепанов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной и световой техники Томского политехнического университета

Геворгиз Р. Г., Малахов А. С.

Пересчёт величины освещённости фотобиореактора в величину облучённости : учебно-методическое пособие / РАН, Ин-т морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского. — Севастополь, 2018. — 60 с.

В настоящем учебно-методическом пособии изложена подробная инструкция по пересчёту редуцированной фотометрической величины освещённости (лк) в энергетическую фотометрическую величину облучённости ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Представлены термины и определения, а также приведены примеры расчётов поверхностной облучённости культур микроводорослей.

Пособие адресовано аспирантам и студентам всех специальностей.

Утверждено к публикации учёным советом
ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского»
(протокол № 2 от 12.03.2018)
Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ,
грант № 18-34-00672.

ISBN: 978-5-6041191-4-3

© Р. Г. Геворгиз, А. С. Малахов, 2018

© ФГБУН ИМБИ, 2018

Область применения

Свет является источником энергии для многих процессов биосинтеза у фотосинтезирующих организмов, поэтому уровень обеспеченности фотосинтетически активной радиацией (ФАР) играет ключевую роль в их жизнедеятельности. В силу ряда причин (исторических, экономических, эксплуатационных) для регистрации этого уровня используются различные приборы: пиранометры, квантометры, люксметры и т. д., поэтому в научных публикациях значения ФАР приводятся в различных единицах измерения. В микробиологической литературе разных лет значение ФАР преимущественно указано в люксах. Однако для сравнительных энергетических оценок, для расчётов эффективности утилизации энергии света при фотобиосинтезе, для оценки эффективности источников света при интенсивном культивировании микроводорослей и т. п. значение ФАР, выраженное в люксах неприменимо. Для таких расчётов требуются значения ФАР, которые выражены в ваттах на квадратный метр или в количестве молей квантов света (эйнштейн), приходящихся на единицу площади в единицу времени.

Термины и определения

Длительное эволюционное развитие различных направлений светотехники, конструкций осветительных приборов, представлений о природе электромагнитного излучения, использования энергии света (излучения) в различных сферах науки и техники и т. д. явилось результатом чрезвычайного разнообразия величин, количественно характеризующих свет (излучение) как природное явление [2, 3, 6, 8]. Различают объективные величины, характеризующие энергетическую сторону излучения электромагнитных волн, и субъективные (световые) редуцированные фотометрические величины, связанные с особенностями восприятия света человеческим глазом.

К объективным величинам относятся:

Энергия излучения, W_e (лучистая энергия) — энергия, передаваемая в виде электромагнитного излучения (переносимая оптическим излучением). Единица измерения — Дж.

Поток излучения, Φ_e (лучистый поток) — мощность излучения, т. е. количество переносимой энергии излучения (оптического излучения) dW_e за малый промежуток времени dt . $\Phi_e = dW_e/dt$. Единица измерения — Дж/с = Вт.

Сила излучения, I_e (энергетическая сила света) — пространственная плотность потока излучения (оптического излучения), т. е. величина, характери-

зующая распространение плотности потока излучения в пространстве. Она численно равна отношению потока излучения $d\Phi_e$ к телесному углу $d\Omega$, в пределах которого поток распространяется!¹ $I_e = d\Phi_e/d\Omega$. Единица измерения — Вт/ср.

Телесный угол, Ω — часть пространства, ограниченного конической поверхностью (т. е. множеством лучей, выходящих из одной точки). Мерой телесного угла является отношение площади S участка, вырезаемого из поверхности сферы телесным углом (конусом) с вершиной в её центре, к квадрату её радиуса, $\Omega = S/R^2$, м²/м². Единица измерения — ср (стерадиан).

Облучённость, E_e (энергетическая освещённость) — поверхностная плотность потока излучения, т. е. величина, характеризующая распределённую плотность потока излучения на поверхности. Эта величина численно равна отношению потока излучения $d\Phi_e$ к площади облучаемой поверхности dS . $E_e = d\Phi_e/dS$. Единица измерения — Вт/м².

Субъективными величинами являются:

Световая энергия, W_v — энергия, передаваемая в виде электромагнитного излучения, которая вызывает у человека зрительные ощущения. *Световая энергия* является некоторой долей от энергии, переносимой оптическим излучением (*энергии излучения*). Размер этой доли зависит от чувствительности человеческого глаза к различным длинам волн в спектре излучения (см. пример на рис. 3 и 6). Единица измерения — Дж = лм × с. *Световая энергия* в системе редуцированных фотометрических величин является аналогом *энергии излучения* (W_e) в системе энергетических фотометрических величин.

Световой поток, Φ_v — количество переносимой электромагнитным излучением *световой энергии* dW_v за малый промежуток времени dt . $\Phi_v = dW_v/dt$. Т. е. это величина, оценивающая *поток излучения* Φ_e по зрительным ощущениям человеческого глаза. *Световой поток* является некоторой долей *потока излучения*. Размер этой доли зависит от чувствительности человеческого глаза к различным длинам волн в спектре излучения. Единица измерения — лм (люмен). *Световой поток* в системе редуцированных фотометрических величин является аналогом *потока излучения* (Φ_e) в системе энергетических фотометрических величин.

Сила света, I_v — это пространственная плотность *светового потока*, т. е. величина, характеризующая распространение плотности *светового потока* в

¹Предполагается, что источник излучения является точечным, т. е. его размерами по сравнению с расстоянием до места наблюдения можно пренебречь.

пространстве. Эта величина численно равна отношению светового потока $d\Phi_v$ к телесному углу $d\Omega$, в пределах которого световой поток распространяется. $I_v = d\Phi_v/d\Omega$. Единица измерения — кд (канделла). *Сила света* в системе редуцированных фотометрических величин является аналогом *силы излучения* (I_e) в системе энергетических фотометрических величин.

Освещённость, E_v — это поверхностная плотность *светового потока*, т. е. величина, характеризующая распространение плотности светового потока на поверхности. Она численно равна отношению светового потока $d\Phi_v$ к площади освещаемой поверхности dS . $E_v = d\Phi_v/dS$. Единица измерения — лк (люкс). *Освещённость* в системе редуцированных фотометрических величин является аналогом *облучённости* (E_e) в системе энергетических фотометрических величин.

Таблица 1. Сравнительная таблица объективных и субъективных фотометрических величин.

Объективные		Субъективные	
Наименование	Формула	Наименование	Формула
Энергия излучения, Дж	W_e	Световая энергия, лм·с	W_v
Поток излучения, Вт = Дж/с	$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt}$	Световой поток, лм = Дж/с	$\Phi_v = \frac{dW_v}{dt}$
Сила излучения, Вт/ср	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Сила света, кд = лм/ср	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$
Облучённость, Вт/м ²	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	Освещённость, лк = лм/м ²	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$

Фотосинтетически активное излучение (фотосинтетически активная радиация, ФАР) — поток излучения в диапазоне² от 380 до 710 нм, энергия которого наиболее эффективно воздействует на физиологические процессы фототрофов (фотосинтез, синтез пигментов, фотопериодизм, фототаксис, фототропизм) [4]. ФАР является частью потока *физиологически активного излучения*, который, кроме ФАР, включает ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучение. УФ и ИК, так же как и ФАР, воздействуют на процессы роста и развития клеток, но для нормального существования многих фототрофов энергия ФАР, в отличие от энергии УФ и ИК, является необходимой

²В зарубежной литературе к ФАР (photosynthetic photon flux density, PPF) относят поток излучения в диапазоне от 400 до 700 нм. С энергетической точки зрения для большинства источников излучения отличие составляет не более 1%.

и достаточной. Уровень ФАР на рабочей поверхности фотобиореактора для культивирования низших фототрофов выражается в единицах *облучённости* Вт/м².

Пиранометр — прибор для измерения рассеянной радиации (собственно пиранометр), суммарной радиации (соляриметр) или отражённой радиации (альбедометр) [5]. В СССР в микробиологической практике для измерения уровня *облучённости* поверхности (*поверхностной плотности потока излучения*) фотобиореактора наибольшее распространение получил пиранометр Ю. Д. Янишевского [3]. Пиранометр даёт показания в Вт/м².

Фитопиранометр — прибор для измерения фотосинтетически активной радиации, суммарной, рассеянной или отражённой [5]. В СССР наиболее удобной моделью являлся фитопиранометр системы Б. П. Козырева, который выпускался Ленинградским электротехническим институтом (ЛЭТИ) [3].

Спектрорадиометр — фотометр для измерения спектральных фотометрических характеристик источников оптического излучения. Спектрорадиометр даёт показания в относительных единицах, в долях от максимального значения.

Люксметр — фотометр для измерения уровня *освещённости* поверхности³. В СССР в микробиологической практике для измерения уровня *освещённости* поверхности фотобиореактора наибольшее распространение получил люксметр Ю-116. Люксметр даёт показания в люксах.

Теоретическое введение

Энергия различных длин волн электромагнитного излучения по разному воздействует на живые организмы. Например, УФ-излучение в диапазоне от 205 до 315 нм губительно воздействует на клетки, воздействие энергии ФАР на фотосинтетические пигменты приводит к её поглощению и запуску процесса фотосинтеза, воздействие света на зрительные пигменты является первым этапом фотохимических превращений, определяющих световые ощущения у человека, животных, пресмыкающихся, насекомых и т. д. Избирательная чувствительность к излучению разного диапазона обусловлена физиологическими особенностями «приёмника» излучения у различных организмов. Например, микроводоросли различных систематических групп обладают раз-

³При длительном воздействии излучения на селективный фотоэлемент люксметра его чувствительность падает (утомляется), поэтому при длительных измерениях освещённости люксметр периодически на несколько минут помещают в темноту.

личным набором фотосинтетических пигментов — «приёмников» излучения (хлорофиллов, каротиноидов и фикобилипротеинов), поэтому спектры поглощения таких культур микроводорослей, как красные, зелёные, синезелёные, диатомовые, значительно отличаются друг от друга. У млекопитающих (за исключением приматов) «приёмником» света являются два зрительных пигмента, поэтому они дихроматы (не отличают красного цвета от зелёного). Рыбы являются тетрахроматами, поскольку имеют четыре зрительных пигмента — УФ-, сине-, зелёно-, красно-чувствительные колбочки сетчатки глаза (см. рис. 1). У человека, как и у обезьян, восприимчивость глаза к свету обусловлена тремя светочувствительными белками (йодопсинами), благодаря которым человек обладает цветным зрением, т. е. является трихроматом (см. рис. 2).

Ввиду того что у каждого биологического приёмника света свой спектр чувствительности, т. е. сила воздействия излучения (эффективность) одного и того же диапазона неодинакова, для эффективного воздействия на организмы светом необходимо учитывать особенности приёмника. Например, для эффективного освещения растений в тепличных хозяйствах, оранжереях и аквариумах используют специальные лампы (фитолампы), спектр излучения которых близок к спектру поглощения энергии излучения растениями. Бактерицидные лампы для обеззараживания поверхностей проектируют со спектральным диапазоном 253–255 нм, поскольку именно в этом диапазоне излучение в наибольшей степени вызывает гибель микроорганизмов. Приборы для учёта количества освещения в помещениях (люксметры) разрабатывают таким образом, чтобы спектр светочувствительного элемента был близок к спектру чувствительности человеческого глаза. Т. е. люксметр предназначен для измерения только той части энергии излучения, которая видна человеческому глазу (см. рис. 6).

При количественном учёте потока излучения, воздействующего на организмы, для удобства используют так называемые *эффективные системы величин*. Суть этих систем заключается в использовании светотехнических величин, характеризующих не весь поток излучения, а только ту его часть, которая воздействует на приёмник. Чтобы подчеркнуть неполноту оценки потока излучения эффективные величины называют *редуцированными*. Например, такие величины, как *световой поток*, *освещённость*, *сила света*, являются редуцированными, поскольку они характеризуют только ту часть потока излучения, которая вызывает у человека световые ощущения.

В силу исторических причин система световых величин была разработана одной из первых. Все величины этой системы являются субъективными, поскольку ориентированы на чувствительность человеческого глаза. В дальней-

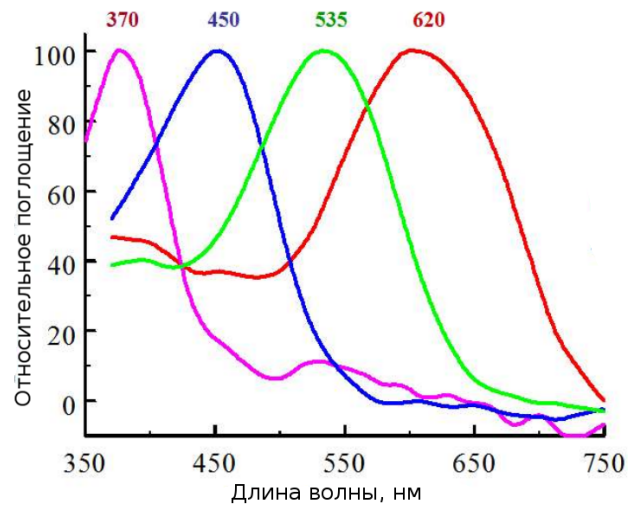


Рис. 1. Спектральная чувствительность четырёх зрительных пигментов УФ-, сине-, зелёно-, красно-чувствительных колбочек сетчатки глаза у рыб.

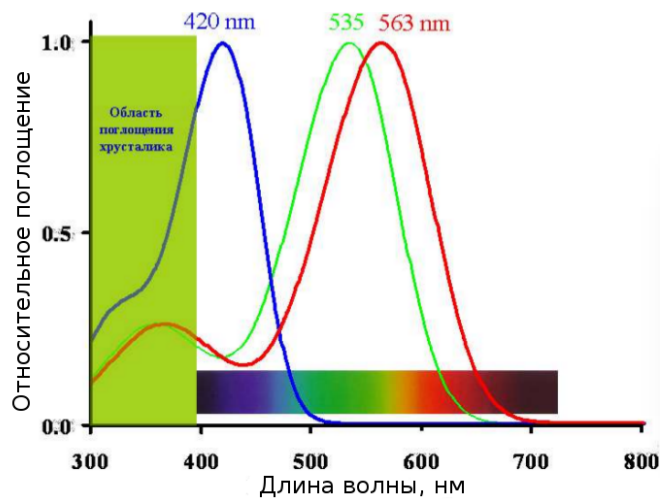


Рис. 2. Спектральная чувствительность трёх зрительных пигментов колбочек сетчатки глаза у человека.

шем, с развитием представлений о природе электромагнитного излучения, была разработана так называемая *объективная система фотометрических величин*, независимая от какого-либо приёмника. Фотометрические величины этой системы характеризуют поток излучения в целом. В связи с кардинальным отличием объективных и субъективных фотометрических систем, для их согласования потребовалось экспериментальное определение спектральной чувствительности соответствующего приёмника. Например, для определения чувствительности человеческого глаза к потоку излучения было проведено множество параллельных измерений энергии излучения и энергии светового потока, вызывающего зрительные ощущения. При проведении экспериментов в узком диапазоне спектра с большим числом наблюдателей было установлено, что «средний глаз» по-разному реагирует на различные участки спектра. Чувствительность глаза, начиная от самых коротких волн (380–400 нм), растёт и достигает максимума при 554–555 нм, затем убывает и в длинноволновом диапазоне (750–780 нм) достигает нулевых значений (см. рис. 3).

Для количественного учёта доли энергии светового потока в потоке излучения используют понятие *спектральной световой эффективности*, с. с. э. (устар. назв. — *видность*):

$$V_{abs}(\lambda) = \frac{\Phi_v(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}, \quad \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] \quad (1)$$

где λ — длина световой волны, нм; $\Phi_v(\lambda)$ — световой поток, лм; $\Phi_e(\lambda)$ — поток излучения, Вт.

С. с. э. является специфической величиной, позволяющей переходить от субъективных световых величин к объективным энергетическим величинам. Величина с. с. э. по сути является долей (безразмерная величина), но для согласования двух систем у с. с. э. используется особая размерность лм/Вт.

На рисунке 3 показано, что величина с. с. э. $V_{abs}(\lambda)$ в отдельных участках спектра различна. Её максимальное значение (K_m) достигается на длине волны 555 нм, причём поток излучения в 1 Вт соответствует световому потоку⁴ в 683 лм.

$$V_{abs}(555) = K_m = 683 \text{ лм/Вт.}$$

Если значения $V_{abs}(\lambda)$ для каждой длины волны разделить на максимум K_m , то такую величину можно назвать *относительной с. с. э. (относительной видностью*, см. рис. 4):

$$V(\lambda) = \frac{V_{abs}(\lambda)}{V_{abs}(555)} = \frac{V_{abs}(\lambda)}{K_m}. \quad (2)$$

⁴В некоторых литературных источниках приведено устаревшее значение 680 лм/Вт.

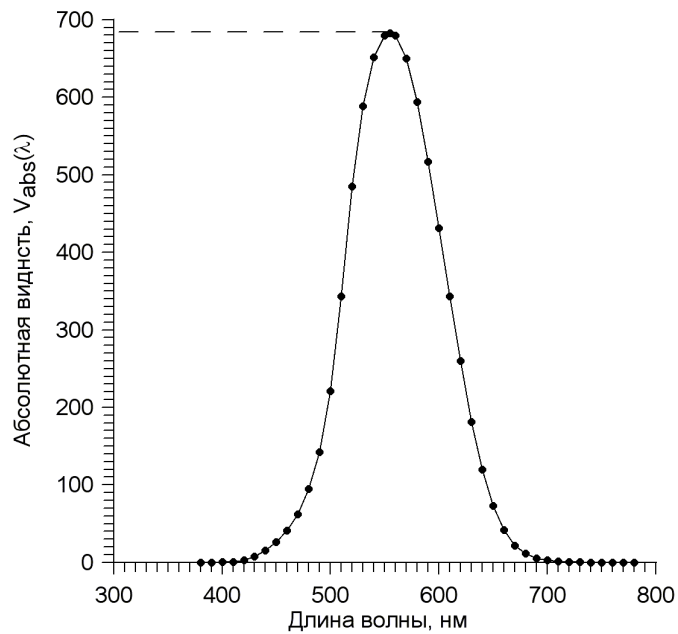


Рис. 3. Спектральная чувствительность человеческого глаза в абсолютных значениях. Пунктиром обозначено максимальное значение $V_{abs}(555) = K_m = 683$ лм/Вт.

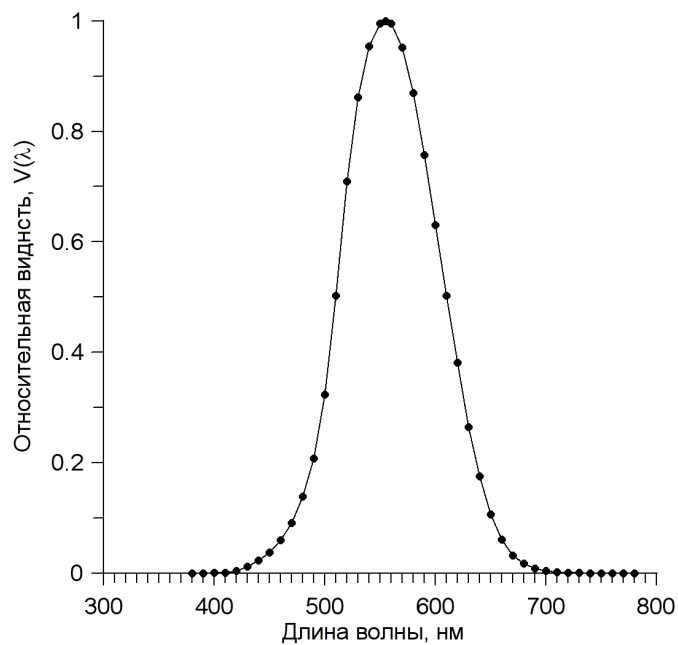


Рис. 4. Относительная спектральная световая эффективность (относительная видимость), $V(\lambda)$.

Таблица 2. Спектральная световая эффективность (видность) для «стандартного» человеческого глаза по ГОСТ 8.332-78 [1]. $V(\lambda)$ — относительная видность, $V_{abs}(\lambda)$ — абсолютная видность.

Длина волны, λ	$V(\lambda)$	$V_{abs}(\lambda)$	Длина волны, λ	$V(\lambda)$	$V_{abs}(\lambda)$
380	0,0000	0,000	580	0,8700	594,210
390	0,0001	0,068	590	0,7570	517,031
400	0,0004	0,273	600	0,6310	430,973
410	0,0012	0,820	610	0,5030	343,549
420	0,0040	2,732	620	0,3810	260,223
430	0,0116	7,923	630	0,2650	180,995
440	0,0230	15,709	640	0,1750	119,525
450	0,0380	25,954	650	0,1070	73,081
460	0,0600	40,980	660	0,0610	41,663
470	0,0910	62,153	670	0,0320	21,856
480	0,1390	94,937	680	0,0170	11,611
490	0,2080	142,064	690	0,0082	5,601
500	0,3230	220,609	700	0,0041	2,800
510	0,5030	343,549	710	0,0021	1,434
520	0,7100	484,930	720	0,0011	0,717
530	0,8620	588,746	730	0,0005	0,355
540	0,9540	651,582	740	0,0003	0,171
550	0,9950	679,585	750	0,0001	0,082
555	1,0000	683,000	760	0,0001	0,041
560	0,9950	679,585	770	0,0000	0,020
570	0,9520	650,216	780	0,0000	0,010

Из соотношений (1) и (2) для светового потока длины волны λ следует:

$$\Phi_v(\lambda) = V_{abs}(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda), \quad \Phi_v(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda), \quad (3)$$

где $\Phi_v(\lambda)$ — световой поток, лм; $K_m = 683$ лм/Вт, $\Phi_e(\lambda)$ — поток излучения на длине волны λ , Вт; $V_{abs}(\lambda)$ и $V(\lambda)$ — абсолютная и *относительная* с. с. э. Аналогично для светового потока сложного спектрального состава в диапазоне от λ_1 до λ_2 записываем:

$$\Phi_v = K_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где λ_1 и λ_2 — границы спектрального диапазона; $\Phi_e(\lambda)$ — энергетический спектр источника излучения.

Для энергетического потока того же источника излучения:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Для наглядности обратимся к рисунку 6, на котором изображён энергетический спектр люминесцентной лампы Philips Daylight-54-765. Графически поток излучения Φ_e в диапазоне от 400 до 800 нм равен площади S_e под кривой относительной спектральной мощности всего потока. Энергия оптического излучения, которая видна человеческому глазу (световой поток, Φ_v), является некоторой долей, численно равной площади S_v (отмечено серым).

Отношение потоков позволяет получить выражение связи Φ_e и Φ_v :

$$\frac{\Phi_e}{\Phi_v} = \frac{1}{K_m} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N, \quad (6)$$

где $\frac{1}{K_m}$ — величина *механического эквивалента света*⁵, Вт/лм; N — отношение величин полной и видимой человеческим глазом световой энергии источника освещения.

⁵В некоторых литературных источниках указано устаревшее значение $1/K_m = 1/680 = 1,47 \cdot 10^{-3}$ [2, 7].

Откуда

$$\Phi_e = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot \Phi_v. \quad (7)$$

Используя выражение (7) и тот факт, что $E_e = d\Phi_e/dS$, а $E_v = d\Phi_v/dS$, запишем соотношения для перехода от освещённости к облучённости:

$$E_e = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot E_v, \quad (8)$$

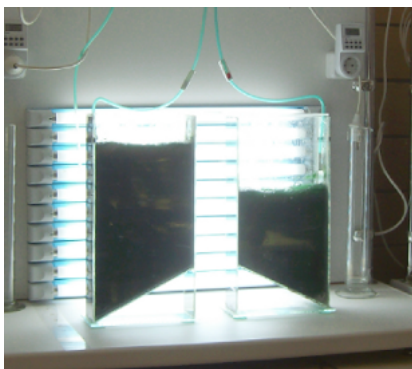
где E_e — облучённость, Вт/м²; E_v — освещённость поверхности, лк (лк = лм/м²).

Примеры расчётов

В нижеследующих примерах приведены расчёты для *дискретного* случая, то есть вместо интегрирования с шагом *бесконечно малой* длины ($d\lambda \rightarrow 0$) предполагается суммирование с шагом *конечной* длины (например, $\Delta\lambda = 1$ нм). Безусловно, в идеальном случае следовало бы пользоваться аналитическими методами умножения, интегрирования и пр. *непрерывных* функций. Однако *любой* сколь угодно точный прибор фактически даёт *дискретные* результаты измерений в виде таблично заданных функций, поэтому при обработке полученных данных следует пользоваться *дискретными* (численными) методами.

Пример 1

Дано: при культивировании микроводорослей в качестве источника света используется система освещения, состоящая из люминесцентных ламп Philips Daylight 54-765, которая на рабочей поверхности плоскопараллельного фотобиореактора $S = 0,059$ м² создаёт освещённость, равную $E_v = 14,6$ клк.



Найти: поток излучения (Вт) в видимом диапазоне (380–780 нм), падающий на рабочую поверхность фотобиореактора.

Решение: для решения задачи необходимо воспользоваться выражением (8). Вначале следует найти значение N для источника освещения (для лампы Daylight 54-765), затем — подставить N и величину освещённости E_v в выражение (8). С учётом площади освещаемой поверхности фотобиореактора получим искомый результат.

Чтобы рассчитать величину N , необходимо:

1. Получить численные значения спектра излучения лампы (сделать оцифровку спектра излучения), т. е. необходимо сделать таблицу с двумя колонками: в первую внести длины волн от 380 до 780 нм; во вторую —

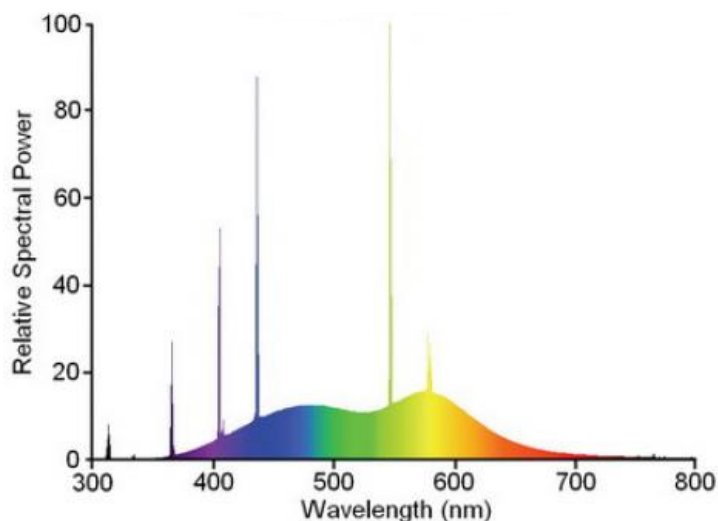


Рис. 5. Энергетический спектр излучения люминесцентной лампы Philips Daylight-54-765.

величины излучаемой энергии, соответствующие этим длинам волн.

Замечание 1. Для удобства расчётов величины излучаемой энергии в спектре лампы представим в нормированном виде. Для этого необходимо все величины излучаемой энергии в спектре лампы разделить на максимальное значение.

Замечание 2. Сетку длин волн при оцифровке следует выбирать таким образом, чтобы её шаг был в 3–5 раз меньше ширины самого узкого пика в спектре излучения лампы. Например, для спектра лампы Philips Daylight 54-765 (рис. 5) шаг должен быть не более 1 нм.

2. Добавить в рабочую таблицу, полученную в п. 1, третью колонку, в которую следует внести из таблицы 2 на странице 11 соответствующие длинам волн значения относительной видности.

В таблице 2 значения относительной видности представлены с шагом в 10 нм, а при наличии узких пиков в спектре излучения лампы шаг сетки длин волн при оцифровке будет значительно меньше. Именно поэтому при внесении в третью колонку значений относительной видности промежуточные значения получают посредством интерполяции (рис. 4).

3. Перемножить значения колонок №2 и 3 рабочей таблицы, чтобы получить спектр видности лампы Philips Daylight-54-765. В итоге будет получена таблица:

λ	$\Phi_e(\lambda)$	$V(\lambda)$	$\Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$
380	1,6084	0,0000	0
381	1,7794	$5,07 \cdot 10^{-6}$	$9,02 \cdot 10^{-6}$
382	1,9176	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$
...
546	12,1594	0,984	11,9646
...
779	0,3559	0,0000	0
$\Sigma =$	3340,7		1486,9

Замечание. Для численного интегрирования используется метод прямоугольников, поэтому граничное значение при 780 нм не учитывается.

4. Найти значение N , суммируя все значения $\Phi_e(\lambda)$ и $\Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$ и подставляя их в (8):

$$N = \frac{\int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{380}^{779} \Phi_e(\lambda_i)(\lambda_{i+1} - \lambda_i)}{\sum_{380}^{779} \Phi_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)(\lambda_{i+1} - \lambda_i)} = \frac{3340,7}{1486,9} = 2,2468.$$

Графически $\Phi_e(\lambda)$ и $\Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$ представлены на рисунке 6.

Далее, подставляя полученное значение N и величину освещённости 14 600 лк рабочей поверхности фотобиореактора в (8), находим E_e :

$$E_e = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot E_v = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2468 \cdot 14\,600 = 48,02 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким образом, *облучённость* составляет 48,02 Вт/м².

Замечание. На самом деле облучённость равна 48,01 Вт/м². Точность вычислений в значительной степени зависит от выбранного шага сетки длины световой волны, от качества оцифровки и интерполяции спектра источника света.

Наконец, учитывая площадь освещаемой поверхности фотобиореактора, получаем:

$$E_e \cdot S = 48,02 \cdot 0,059 = 2,83 \text{ Вт.}$$

Ответ: на рабочую поверхность фотобиореактора падает поток излучения, равный 2,83 Вт.

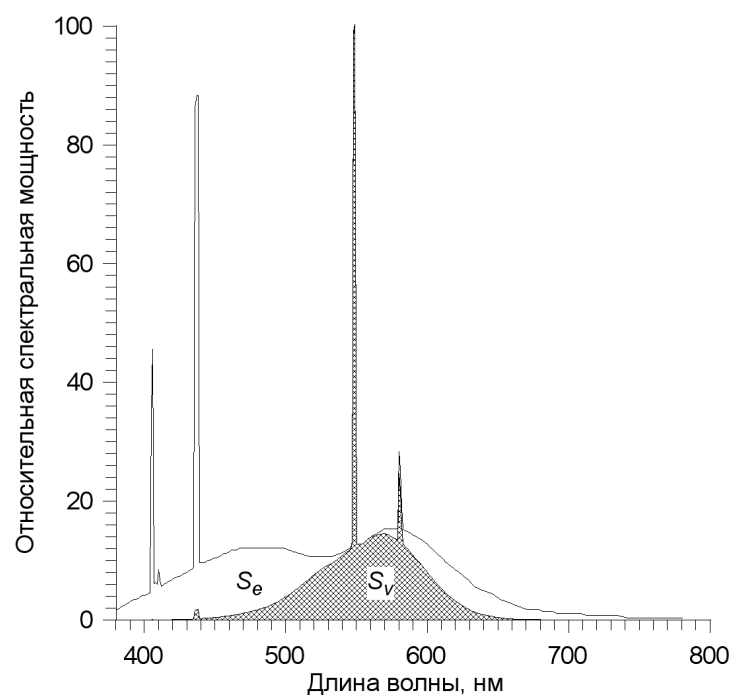


Рис. 6. Распределение энергии в спектре люминесцентной лампы Philips Daylight 54-765. Серым указана видимая человеческим глазом часть энергии оптического излучения.

Дополнения: все расчёты целесообразно проводить на компьютере в каком-либо математическом пакете. Ниже представлен листинг программы для тех, кто использует свободный пакет SciLab⁶.

```
// Пример 1
// Очистка рабочей области
clear;
// Очистка командной строки
clc;

// энергетический (оцифрованный) спектр лампы в диапазоне
// длин волн 380–779 нм с шагом 1 нм
spectrlampу=
[1.6084
1.7794
...
0.3559
0.3559];

// шаг длин волн для значений относительной видности из табл. 1
х=
[380
390
...
779];

// значения спектра относительной видности из табл. 1
у=
[0.0000
0.0001
...
0.0000];

// рассчитываем коэффициент для интерполяции кривой
// спектра относительной видности V
coeff=splin(x,y);

// задаём шаг интерполяции 1 нм в диапазоне от 380 до 779 нм
X=[380:1:779]';

// интерполяция кривой спектра относительной видности V
otnvidnost=interp(X,x,y,coeff);

// вычисление фотометрического спектра
spectrvidnosti=spectrlampу.*otnvidnost;
```

⁶<http://www.scilab.org>

```
// сумма значений энергий спектра
sum1=sum(spectrlampy);

// сумма значений энергий фотометрического спектра
sum2=sum(spectrvidnosti);

// отношение энергетического спектра и видимого
// глазом фотометрического спектра
N=sum1/sum2;

// величина освещённости рабочей поверхности культиватора
lux=14600;

// величина механического эквивалента света
k=1.464*(10^(-3));

// облучённость
Ee=k*N*lux;

// площадь освещаемой (рабочей) поверхности культиватора
S=0.059;

// энергия излучения на рабочей поверхности культиватора
Itog=Ee*S;
```

Пример 2

Дано: условия примера № 1 на странице 14.

Найти: количество энергии излучения, падающей на рабочую поверхность фотобиореактора в области фотосинтетически активной радиации (ФАР). Сделать пересчёт на число молей квантов света (эйнштейн).

Решение: Фотосинтетически активная радиация распределена в диапазоне длин волн⁷ 380–710 нм, поэтому все расчёты, проведённые в примере № 1, следует сделать для диапазона 380–710 нм.

λ	$\Phi_e(\lambda)$	$V(\lambda)$	$\Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$
380	1,6084	0,0000	0
381	1,7794	$5,07 \cdot 10^{-6}$	$9,02 \cdot 10^{-6}$
382	1,9176	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$
...
546	12,1594	0,984	11,9646
...
709	1,0652	0,0022	0,0024
$\Sigma =$	3304,9		1486,9

Замечание. Для численного интегрирования используется метод прямоугольников, поэтому граничное значение при 710 нм не учитывается.

Вычисляем значение N и, используя (8), находим облучённость E_e в области ФАР:

$$N = \frac{\int_{380}^{710} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{710} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{380}^{709} \Phi_e(\lambda_i)(\lambda_{i+1} - \lambda_i)}{\sum_{380}^{709} \Phi_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)(\lambda_{i+1} - \lambda_i)} = \frac{3304,9}{1486,9} = 2,2227.$$

$$E_e = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot E_v = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2227 \cdot 14\,600 = 47,51 \text{ Вт/м}^2.$$

Итак, во всём диапазоне ФАР облучённость составляет 47,51 Вт/м².

Чтобы посчитать число молей квантов света необходимо: 1) рассчитать долю световой энергии, приходящуюся на каждую длину волны из всего диапазона ФАР; 2) умножить 47,51 Вт/м² на долю для каждой длины волны, т. е.

⁷В зарубежной литературе к ФАР относят диапазон 400–700 нм. С энергетической точки зрения для лампы Philips Daylight 54-765 разница незначительна, составляет 0,021%.

рассчитать количество световой энергии, которое приходится на каждую длину световой волны; 3) зная долю энергии для каждой длины волны и энергию одного кванта света соответствующей длины волны, подсчитать число квантов приходящееся на каждую длину волны. Связь энергии одного кванта света с длиной волны имеет вид:

$$E(\lambda) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,9864 \cdot 10^{-25}}{\lambda}, \quad \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}}}{\text{М}} = \text{Дж} \right], \quad (9)$$

где ν — частота излучения, $1/\text{с}$; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ — постоянная Планка, Дж·с; $c = 299\,792\,458$ — скорость света в вакууме, м/с; 4) сложить общее число квантов для всех длин волн и полученную сумму разделить на число Авогадро. Таким образом, будет получено число молей квантов света, падающих на 1 м^2 за 1 с .

1. Доля энергии излучения $\delta(\lambda)$, приходящаяся на длину волны λ , равна:

$$\delta(\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda)}{\int_{380}^{710} \Phi_e(\lambda) d\lambda}.$$

Поскольку мы имеем дело с дискретным случаем, т. е. рассматриваем долю энергии для некоторого диапазона от λ до $\lambda + \Delta\lambda$, формулу связи между дискретным и непрерывным случаем можно записать в виде:

$$\delta(\Delta\lambda) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} \delta(\lambda) d\lambda, \quad \Delta\lambda = \lambda_{i+1} - \lambda_i.$$

Следовательно, доля энергии излучения, приходящаяся на участок энергетического спектра лампы Philips Daylight 54-765 в диапазоне длин волн от λ_i до λ_{i+1} (рис. 5) в области ФАР, равна:

$$\delta(\lambda_i) \approx \frac{\Phi_e(\lambda_i) \cdot (\lambda_{i+1} - \lambda_i)}{\sum_{380}^{709} \Phi_e(\lambda_i) \cdot (\lambda_{i+1} - \lambda_i)}.$$

Например, для интервала $\Delta\lambda = 381 - 380 = 1$ получаем:

$$\delta(380) = \frac{1,6084 \cdot 1}{3304,9} = 4,87 \cdot 10^{-4}.$$

Данные для каждой длины волны заносят в рабочую таблицу (см. ниже).

2. Энергия излучения в спектре лампы для каждой длины волны $E_0(\lambda)$. Долю для каждой длины волны умножают на $47,51 \text{ Вт/м}^2$, таким образом получая количество энергии излучения для каждой длины волны в спектре источника излучения. Например, для длины волны 380 нм произведение равно:

$$E_0(380) = \delta(380) \cdot E_e = 4,87 \cdot 10^{-4} \cdot 47,51 = 0,0231 \text{ Дж.}$$

3. Энергия кванта света $E(\lambda)$. Используя выражение (9), рассчитывают энергию кванта света определённой длины волны и записывают значения в рабочую таблицу.

$$E(380) = \frac{1,9864 \cdot 10^{-25}}{380 \cdot 10^{-9}} = 5,227 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

4. Число квантов света n для каждой длины волны в спектре лампы. Делением величины энергии излучения в спектре лампы для каждой длины волны $E_0(\lambda)$ на энергию кванта $E(\lambda)$ находят число квантов для каждой длины волны. Например, для длины волны 380 нм:

$$n(380) = \frac{E_0(380)}{E(380)} = \frac{0,0231}{5,227 \cdot 10^{-19}} = 4,423 \cdot 10^{16} .$$

λ	$\delta(\lambda)$	$E_0(\lambda)$	$E(\lambda)$	$n(\lambda)$
380	$4,87 \cdot 10^{-4}$	0,0231	$5,2274 \cdot 10^{-19}$	$4,423 \cdot 10^{16}$
381	$5,38 \cdot 10^{-4}$	0,0256	$5,2137 \cdot 10^{-19}$	$4,893 \cdot 10^{16}$
...
546	0,0037	0,1748	$3,6381 \cdot 10^{-19}$	$3,344 \cdot 10^{17}$
...
709	$3,223 \cdot 10^{-4}$	0,0153	$2,8017 \cdot 10^{-19}$	$2,929 \cdot 10^{16}$
$\Sigma =$	1,0000	47,5		$9,0884 \cdot 10^{19}$

5. Число молей квантов света E_n . Чтобы рассчитать количество молей, необходимо сумму всех квантов $n(\lambda)$ разделить на число Авогадро N_A :

$$E_n = \frac{\sum_{380}^{709} n(\lambda_i)}{N_A} = \frac{9,0884 \cdot 10^{19}}{6,02214179 \cdot 10^{23}} = 1,5092 \cdot 10^{-4} \text{ [моль].}$$

Таким образом, $1,5092 \cdot 10^{-4}$ моль световых квантов, падающих на 1 м^2 в 1 с, соответствует величине облучённости $47,51 \text{ Вт/м}^2$.

В итоге число квантов, падающих на рабочую поверхность фотобиореактора, равно:

$$E_n \cdot S = 1,5092 \cdot 10^{-4} \cdot 0,059 = 8,904 \cdot 10^{-6}.$$

Ответ: на рабочую поверхность фотобиореактора падает 8,9 мкмоль световых квантов в области ФАР.

Дополнения: ниже представлен листинг программы для расчётов в математическом пакете программ Scilab.

```
// Пример 2
// Очистка рабочей области
clear;
// Очистка командной строки
clc;

// диапазон ФАР длины волн 380–709 нм с шагом 1 нм
x=
[380
381
...
709];

// энергия спектра излучения по заданным длинам волн
// от 380 до 709 с шагом 1 нм
y=
[1.608397308
1.77936
...
1.0652];

// значения относительной видности по заданным длинам
// волн от 380 до 709 с шагом 1 нм
OtnVidnost=
[0
1.45E-006
5.60E-006
...
0.0022];

// устанавливаем максимальный размер стека памяти
stacksize('max');
```

```
// вычисление фотометрического спектра
SpectrVidnosti=y.*OtnVidnost;

// сумма значений энергий спектра
sum1=sum(y);

// сумма значений энергий фотометрического спектра
sum2=sum(SpectrVidnosti);

// отношение энергетического спектра и видимого
// глазом фотометрического спектра
N=sum1/sum2;

// величина освещённости рабочей поверхности культиватора
lux=14600;

// величина механического эквивалента света
k=1.464*(10^(-3));

// облучённость
Obluchennost=k*N*lux;

// площадь освещаемой (рабочей) поверхности культиватора
S=0.059;

// световая энергия на рабочей поверхности культиватора
ObluchennostPoverhnosti=Obluchennost*S;

// рассчитываем коэффициент для интерполяции кривой спектра излучения
coeff=splin(x,y);

// задаём шаг интерполяции 1 нм в диапазоне от 380 до 709 нм
X=[380:1:709]';

// интерполяция кривой спектра излучения
Y=interp(X,x,y,coeff);

// 1 - доля световой энергии на каждые шаг (нм)
DolyaSvetovoyEnergy=Y*1/sum1;

// 2 - световая энергия для каждой длины волны
SvetovayaEnergyVolny=DolyaSvetovoyEnergy*Obluchennost;

// длина волны в метрах
DlinaVolnynm=X*(10^(-9));

// константа h*c
```



```
const=6.626*(10^(-34))*299792458;  
  
// обратная величина энергии кванта для каждой волны  
EKS1=DlinaVolnynm/const;  
  
// энергия кванта света каждой длины волны  
EKS2=EKS1^(-1);  
  
// число квантов света для каждой длины волны  
n=SvetovayaEnergyVolny/EKS2  
  
// сумма всех квантов  
sum3=sum(n);  
  
// число Авогадро  
NA=6.02214*(10^(23));  
  
// число молей квантов света  
En=sum3/NA;  
  
// число квантов, падающих на рабочую поверхность культиватора  
Itoq=En*S
```

Пример 3

Дано: у культиватора для микроводорослей в качестве источника освещения используется система красных и синих светодиодов, потребляемая мощность которых и коэффициент светоотдачи неизвестны. Сила света светодиодов составляет 1500–2000 мкд, а угол свечения — 120° . Спектры светодиодов представлены на рисунке 7.

Найти: поток излучения (Вт), создаваемый красным и синим светодиодом в области ФАР.

Решение: Для решения задачи необходимо вычислить величину светового потока Φ_v для каждого типа светодиодов и подставить её в выражение (7).

Световой поток Φ_v , создаваемый светодиодами. По определению световой поток Φ_v равен:

$$\Phi_v = I_v \cdot \Omega, \quad (10)$$

где I_v — сила света, кд; Ω — телесный угол свечения, ср. Сила света светодиодов дана в условии задачи $\Phi_v = 1,5 \div 2,0$ кд, а телесный угол неизвестен, поэтому сначала требуется его вычислить⁸.

Используя определение телесного угла и формулу для расчёта площади сферической части поверхности шарового сектора, т. е. площади сферического сегмента, можно записать:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{2\pi RH}{R^2},$$

где S — площадь участка, вырезаемого из поверхности сферы телесным углом (конусом) с вершиной в её центре; R — радиус сферы; H — высота сегмента.

Из геометрических соображений (см. рис. 8) справедливо равенство:

$$R \cdot \cos \frac{\theta}{2} = R - H, \quad \text{или} \quad H = R \cdot \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right).$$

То есть

$$\Omega = \frac{2\pi H}{R} = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right).$$

⁸Производители светодиодов в качестве светотехнической характеристики указывают не телесный угол Ω , а двойной угол половинной яркости (угол свечения, плоский угол) θ (см. рис 8).

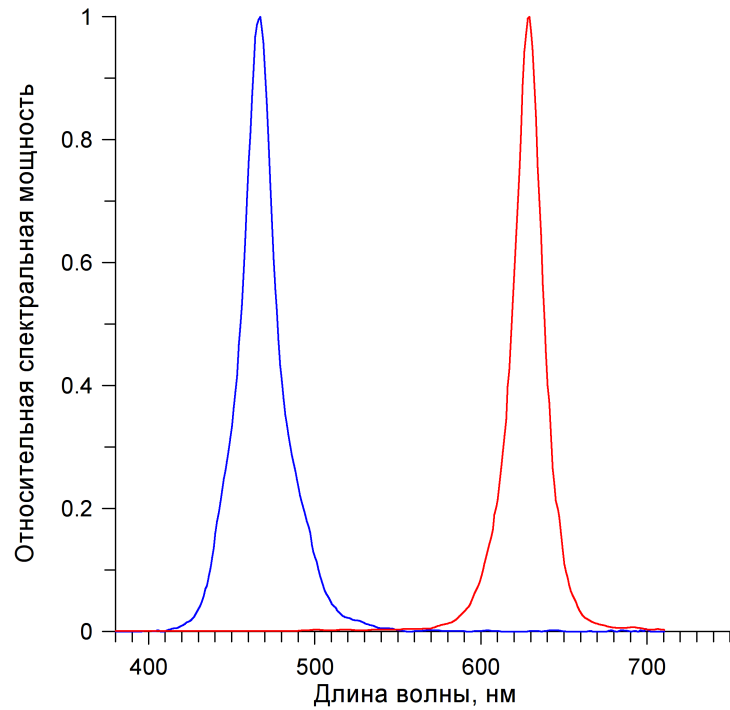


Рис. 7. Распределение энергии в спектре синего ($\Phi_e^{Blue}(\lambda)$) и красного ($\Phi_e^{Red}(\lambda)$) светодиодов.

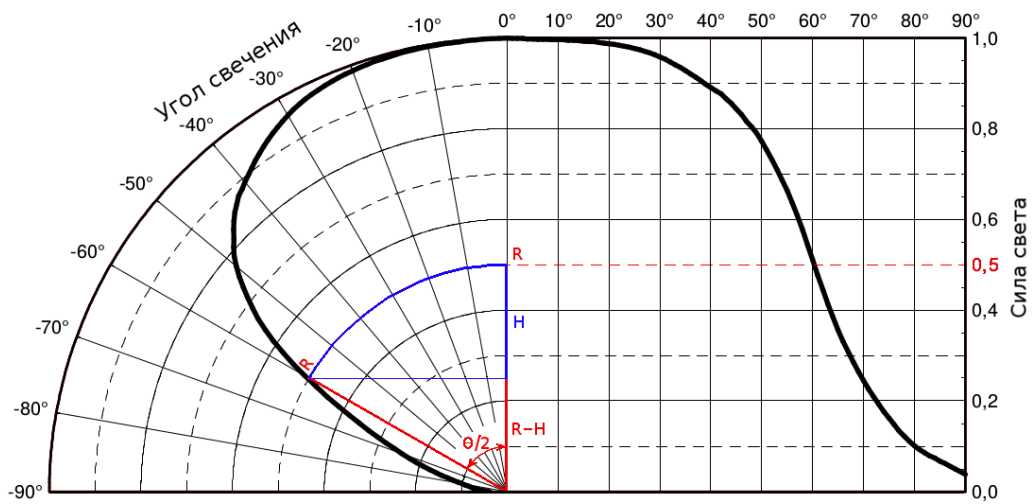


Рис. 8. Ламбертовская диаграмма углового распределения силы света (кривая силы света, КСС) светодиода с углом $\theta = 120^\circ$.

Таким образом, если плоский угол равен $\theta = 120^\circ$, то телесный угол равен $\Omega = 2\pi(1 - 0,5) = \pi$.

Подставляя полученное значение в (10), имеем

$$\Phi_v^{min} = 1,5 \cdot \pi = 4,7124 \text{ лм}; \quad \Phi_v^{max} = 2,0 \cdot \pi = 6,2832 \text{ лм}.$$

Вычисления значения N . В рабочую таблицу для каждого вида светодиодов вносим спектральные характеристики для диапазона 380–710 нм (см. рис. 7) и умножаем на спектр относительной видности.

λ	$\Phi_e^{Blue}(\lambda)$	$\Phi_e^{Red}(\lambda)$	$V(\lambda)$	$\Phi_e^{Blue}(\lambda) \cdot V(\lambda)$	$\Phi_e^{Red}(\lambda) \cdot V(\lambda)$
380	0,0000	0,0010	0,0000	0	0
381	0,0000	0,0010	$5,07 \cdot 10^{-6}$	0,0000	$5,07 \cdot 10^{-9}$
...
546	0,0044	0,0030	0,9840	0,0044	0,0030
...
709	0,0000	0,0030	0,0022	0,0000	$6,73 \cdot 10^{-6}$
$\Sigma =$	30,7018	25,2770		3,5248	7,9164

Замечание. Для численного интегрирования используется метод прямоугольников, поэтому граничное значение при 710 нм не учитывается.

Далее вычисляем значение N для красного и синего светодиодов по алгоритму, описанному на странице 12:

$$N_{Blue} = \frac{\int_{380}^{710} \Phi_e^{Blue}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{710} \Phi_e^{Blue}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{30,7018}{3,5248} = 8,7102.$$

$$N_{Red} = \frac{\int_{380}^{710} \Phi_e^{Red}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{710} \Phi_e^{Red}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{25,2770}{7,9164} = 3,1930.$$

Замечание. В данном случае также уместно замечание о точности вычислений, сделанное на странице 16.

Поток излучения Φ_e . Найденные значения Φ_v и N подставляем в выражение (7). Имеем для синего светодиода:

$$\Phi_e^{min} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N_{Blue} \cdot \Phi_v^{min} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 8,7102 \cdot 4,7124 = 0,0601 \text{ Вт},$$

$$\Phi_e^{max} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N_{Blue} \cdot \Phi_v^{max} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 8,7102 \cdot 6,2832 = 0,0801 \text{ Вт.}$$

Для красного светодиода:

$$\Phi_e^{min} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N_{Red} \cdot \Phi_v^{min} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 3,1930 \cdot 4,7124 = 0,0220 \text{ Вт,}$$

$$\Phi_e^{max} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N_{Red} \cdot \Phi_v^{max} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 3,1930 \cdot 6,2832 = 0,0294 \text{ Вт.}$$

Графически $\Phi_e(\lambda)$ и $\Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$ для красного и синего светодиодов представлены на рисунках 9 и 10.

Ответ: поток излучения, создаваемый синим светодиодом в области ФАР, составляет $60,1 \div 80,1$ мВт, а красным — $22 \div 29,4$ мВт.

Дополнения: ниже представлен листинг программы для расчётов в математическом пакете программ Scilab.

```
// Пример 3
// очистка рабочей области
clear;
// очистка командной строки
clc;

// спектр синего светодиода в диапазоне от 380 нм до 709 нм
// с шагом 1 нм
blue=
[
0
...
1
...
0
];

// спектр красного светодиода в диапазоне от 380 нм до 709 нм
// с шагом 1 нм
red=
[
0.001
...
0.003
];

// спектр относительной видности в диапазоне от 380 нм до 709 нм
// с шагом 1 нм
otnvidnost=
[
```

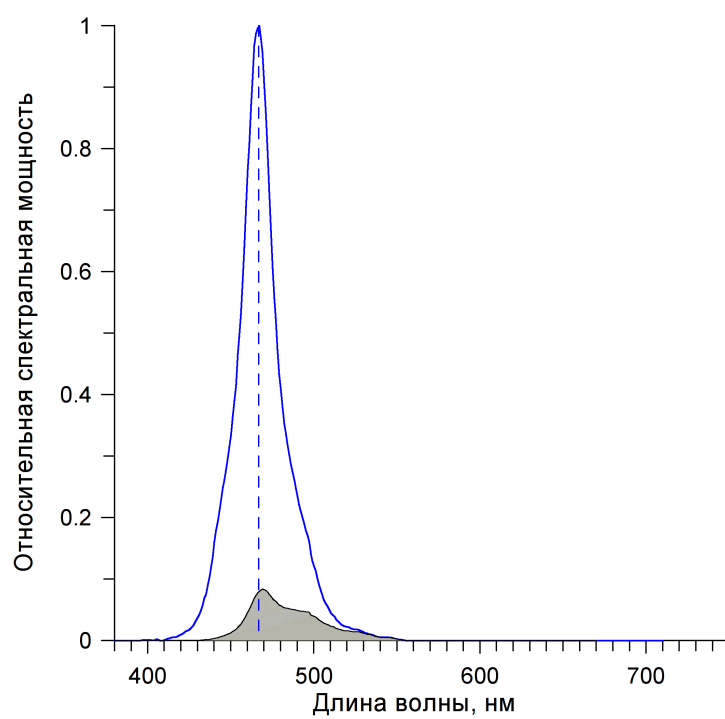


Рис. 9. Распределение энергии в спектре синего светодиода. Серым указана видимая человеческим глазом часть световой энергии.

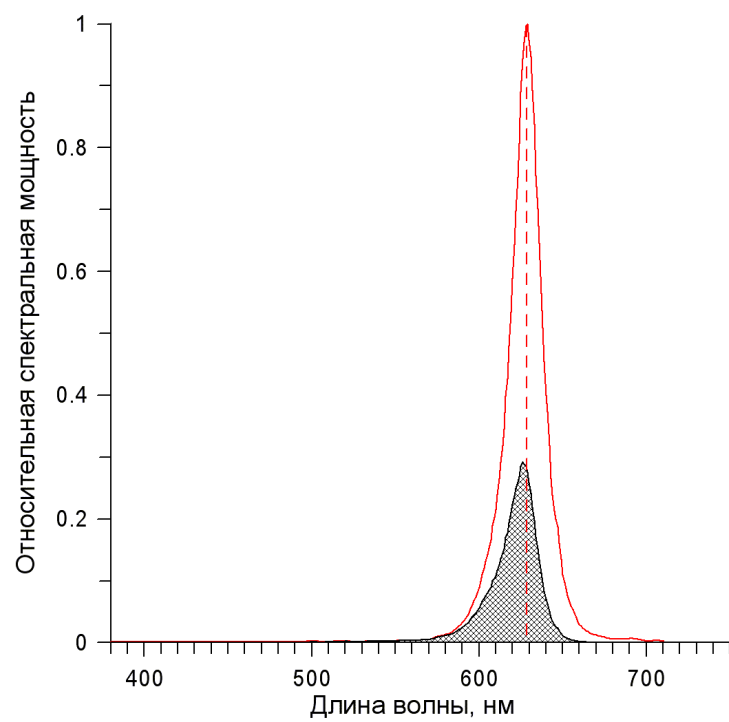


Рис. 10. Распределение энергии в спектре красного светодиода. Серым указана видимая человеческим глазом часть световой энергии.

```
0
5.07E-006
...
0.0022
];

// вычисление фотометрического спектра синего светодиода
vidnostblue=blue.*otnvidnost;

// сумма значений энергий спектра синего светодиода
sum1blue=sum(blue);

// сумма значений энергий фотометрического спектра синего светодиода
sum2blue=sum(vidnostblue);

// отношение энергии спектра синего светодиода к энергии спектра
// видимого глазом (фотометрического)
Nblue=sum1blue/sum2blue;

// вычисление фотометрического спектра красного светодиода
vidnostred=red.*otnvidnost;

// сумма значений энергий спектра красного светодиода
sum1red=sum(red);

// сумма значений энергий фотометрического спектра красного светодиода
sum2red=sum(vidnostred);

// отношение энергетического спектра красного светодиода к энергии
// спектра видимого глазом (фотометрического)
Nred=sum1red/sum2red;

// сила света min
Ivmin=1.5;

// сила света max
Ivmax=2;

// угол свечения (плоский)
teta=120;

// телесный угол
omega=2*pi*(1-cosd(teta/2));

// световой поток СД min
Fvmin=Ivmin*omega;
```



```
// световой поток СД max
Fvmax=Ivmax*omega;

// величина механического эквивалента света
k=1.464*(10^(-3));

// поток излучения синего СД min
FeBluemin=k*Nblue*Fvmin;

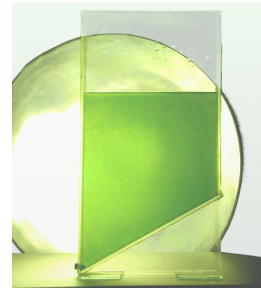
// поток излучения синего СД max
FeBluemax=k*Nblue*Fvmax;

// поток излучения красного СД min
FeRedmin=k*Nred*Fvmin;

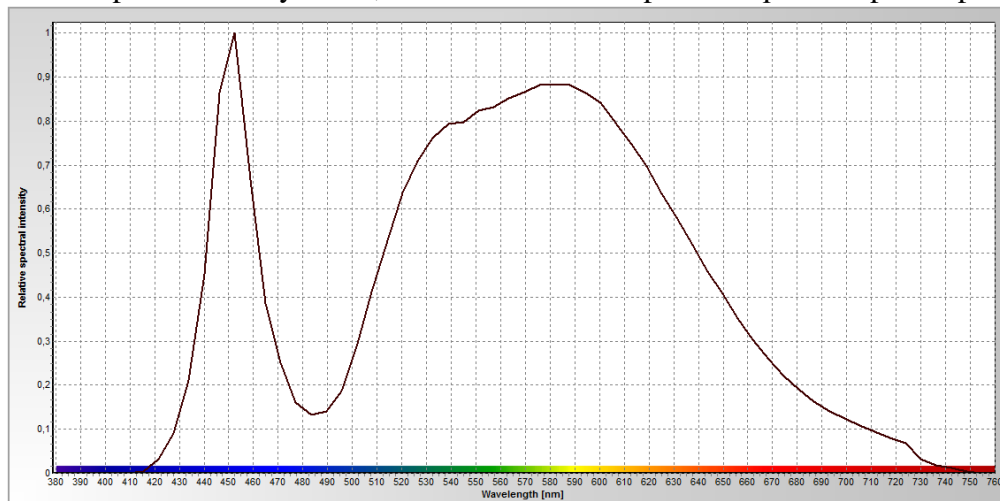
// поток излучения красного СД max
FeRedmax=k*Nred*Fvmax;
```

Пример 4

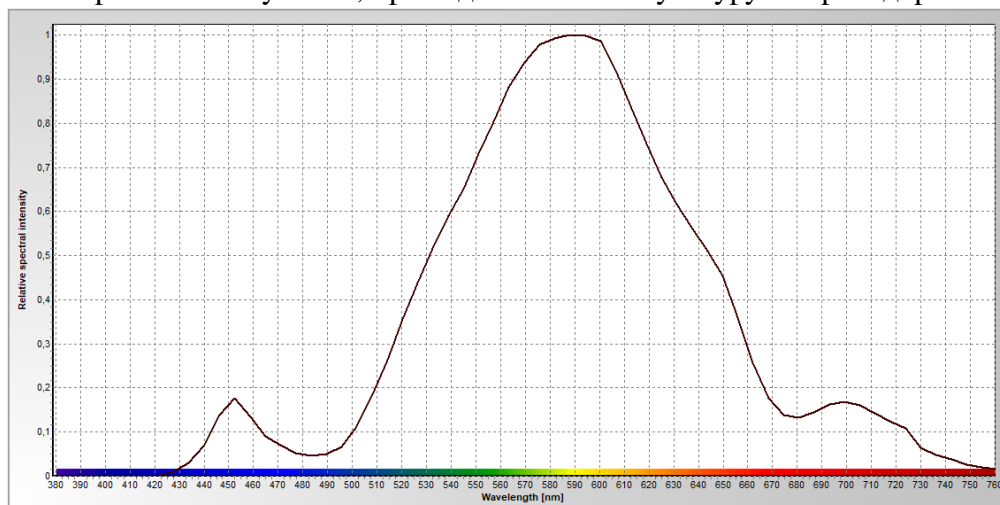
Дано: в плоскопараллельном фотобиореакторе выращивают культуру микроводорослей для оценки КПД фотобиосинтеза. На рабочую поверхность фотобиореактора площадью $0,03 \text{ м}^2$ падает световой поток $E_v^0 = 390 \text{ лм}$ известного спектрального состава. При прохождении сквозь культуру микроводорослей спектр потока изменяется, кроме того, световой поток частично поглощается клетками, уменьшаясь до значения $E_v = 40,41 \text{ лм}$.



Спектр потока излучения, падающего на поверхность фотобиореактора



Спектр потока излучения, прошедшего сквозь культуру микроводорослей



Найти: поглощённую культурой микроводорослей энергию излучения $E_{\text{п}}$.

Решение: для решения задачи необходимо рассчитать энергию излучения, падающую на рабочую поверхность фотобиореактора E_e^0 , а также энергию излучения, прошедшую сквозь культуру микроводорослей E_e . Разница энергий до и после фотобиореактора будет равна искомой поглощённой энергии:

$$E_{\text{п}} = E_e^0 - E_e$$

По условию задачи площадь рабочей поверхности фотобиореактора равна $0,03 \text{ м}^2$, падающий на неё световой поток равен 390 лм , а выходящий — $40,41 \text{ лм}$. Следовательно, освещённость рабочей поверхности равна:

$$E_v^0 = \frac{\Phi_v}{S} = \frac{390}{0,03} = 13\,000 \text{ лк.}$$

Аналогично освещённость на выходе из фотобиореактора равна:

$$E_v = \frac{40,41}{0,03} = 1\,347 \text{ лк.}$$

В результате условия задачи, а также и расчёты падающей на рабочую поверхность E_e^0 и прошедшей сквозь культуру энергии E_e становятся аналогичны таковым из примера № 1 на странице 14.

Результат расчётов $E_{\text{п}} = E_e^0 - E_e = 1,1058 - 0,1020 = 1,0038 \text{ Дж}$.

Ответ: поглощённая энергия равна $E_{\text{п}} = 1,0038 \text{ Дж}$.

Дополнения: ниже представлен листинг программы для расчётов в математическом пакете программ Scilab.

```
// Пример 4
clear;      // Очистка рабочей области
clc;       // Очистка командной строки
// Диапазон ФАР длины волн 380-780 нм с шагом 1 нм
// значения по оси X из таблицы стандартной видности
x0=[380
390
...
780];

// значения по оси Y из таблицы стандартной видности
y0=[0.0000
0.0001
...

```

```
0.0000];

// измеренный спектр излучения источника света до культиватора
x1=[390
...
760];

// измеренный спектр излучения источника света до культиватора
y1=[0
...
0.0007
0];

// измеренный спектр излучения источника света после культиватора
x2=[390
...
760];

// измеренный спектр излучения источника света после культиватора
y2=[0
...
0.016];

coeff0=splin(x0,y0);
X0=[380:1:780]';

// привели видность к одним значениям по x
Y0=interp(X0,x0,y0,coeff0);

coeff1=splin(x1,y1);
X1=[380:1:780]';

// привели спектр источника света к одним значениям по x
Y1=interp(X1,x1,y1,coeff1);

coeff2=splin(x2,y2);
X2=[380:1:780]';

// привели спектр источника света после культиватора к
// одним значениям по x
Y2=interp(X2,x2,y2,coeff2);

// вычисление фотометрического спектра излучения до культиватора
SV1=Y1.*Y0;

// сумма значений энергий спектра до культиватора
sumY1=sum(Y1);
```

```
// сумма значений энергий фотометрического спектра до культиватора
sumSV1=sum(SV1);

// отношение энергетического спектра источника света и видимого глазом
N1=sumY1/sumSV1;

// измеренная прибором освещённость поверхности до культиватора
lux1=13000;

// величина механического эквивалента света
k=1.464*(10^(-3));

// облучённость
Ee1=k*N1*lux1;

// площадь освещаемой (рабочей) поверхности культиватора
S=0.03;

// световая энергия в Вт на рабочей поверхности культиватора
Itog1=Ee1*S;

// вычисление фотометрического спектра излучения после культиватора
SV2=Y2.*Y0;

// сумма значений энергий спектра после культиватора
sumY2=sum(Y2);

// сумма значений энергий фотометрического спектра после культиватора
sumSV2=sum(SV2);

// отношение энергетического спектра источника света после
// культиватора и видимого глазом
N2=sumY2/sumSV2;

// измеренная прибором освещённость поверхности
// после культиватора
lux2=1347;

// облучённость
Ee2=k*N2*lux2;

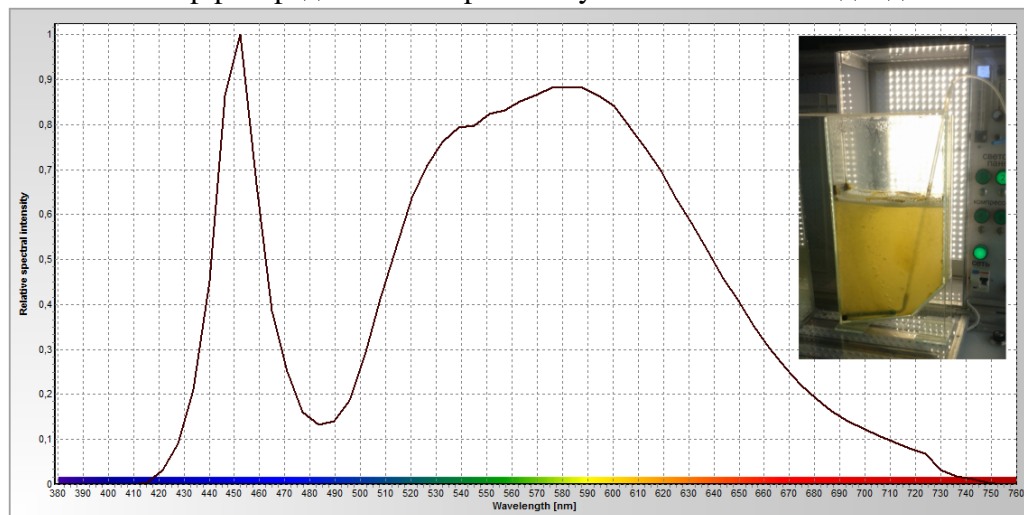
// световая энергия после 5 см культиватора
Itog2=Ee2*S;

// поглощённая энергия
Itog3=Itog1-Itog2;
```

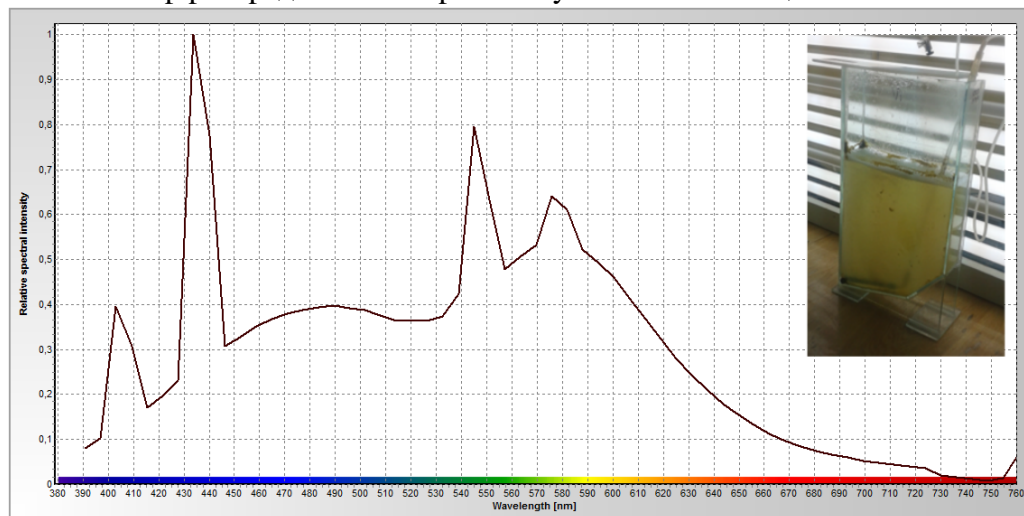
Пример 5

Дано: при культивировании микроводорослей в плоскопараллельном фото-биореакторе была произведена замена источника освещения. Белые светодиоды были заменены на люминесцентные лампы. Спектр распределения энергии излучения от светодиодов и люминесцентных ламп известен. Светодиоды на рабочей поверхности создавали освещённость $E_v = 13$ клк.

Спектр распределения энергии излучения белых светодиодов



Спектр распределения энергии излучения люминесцентных ламп



Найти: величину *освещённости*, создаваемую люминесцентными лампами, при которой величина *облучённости* рабочей поверхности фотобиореактора остаётся неизменной, т. е. когда при замене источника освещения меняется спектральный состав, но величина облучённости остаётся неизменной.

Решение: используя выражение (8), запишем связь освещённости и облучённости для двух разных источников света:

$$E_{e1} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N_1 \cdot E_{v1}; \quad E_{e2} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N_2 \cdot E_{v2}.$$

По условию задачи, облучённость поверхности фотобиореактора не меняется, т. е. $E_{e1} = E_{e2}$, поэтому:

$$N_1 \cdot E_{v1} = N_2 \cdot E_{v2}; \quad E_{v2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot E_{v1}. \quad (11)$$

Таким образом, отношение N_1/N_2 определяет различие между освещённостью двух источников света.

Используя энергетические спектры светильников из условия задачи, по формуле (6) рассчитываем N_1 и N_2 . Затем полученные значения и величину освещённости рабочей поверхности $E_{v1} = 13$ клк подставляем в выражение (11):

$$E_{v2} = \frac{1,9367}{2,2633} \cdot 13 = 11,124 \text{ клк.}$$

Ответ: освещённость люминесцентных ламп равна 11,124 клк.

Замечание 1. Отметим; если для некоторого диапазона длин волн от λ_1 до λ_2 два источника излучения создают одинаковую облучённость $E_{e1} = E_{e2}$, то потоки излучения от этих источников в том же диапазоне также равны⁹ ($\Phi_{e1} = \Phi_{e2}$). Следовательно, учитывая выражения (4) и (6), можно записать

$$E_{v2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot E_{v1} = \frac{\frac{\Phi_{e1}}{\Phi_{v1}}}{\frac{\Phi_{e2}}{\Phi_{v2}}} \cdot E_{v1} = \frac{\Phi_{v2}}{\Phi_{v1}} \cdot E_{v1} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e2}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e1}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot E_{v1}.$$

Таким образом, различие между освещённостью от двух источников света определяется отношением *световых* потоков Φ_{v2}/Φ_{v1} .

⁹Равны суммарные потоки $\Phi_{e1} = \Phi_{e2}$ для диапазона от λ_1 до λ_2 , но в общем случае потоки излучения для конкретной длины волны λ не равны, $\Phi_{e2}(\lambda) \neq \Phi_{e1}(\lambda)$.

Замечание 2. Большинство современных приборов результаты измерения спектров выдаёт в относительных единицах (в нормированном виде). Поэтому, если в расчётах используются нормированные спектры потоков излучения, т. е.

$$\Phi'_{e1}(\lambda) = \frac{\Phi_{e1}(\lambda)}{m_1}; \quad \Phi'_{e2} = \frac{\Phi_{e2}(\lambda)}{m_2},$$

где m_1 и m_2 — максимальные значения спектров в диапазоне от λ_1 до λ_2 первого и второго источников света соответственно, то

$$E_{v2} = \frac{m_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi'_{e2}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{m_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi'_{e1}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot E_{v1}.$$

Дополнения: ниже представлен листинг программы для расчётов в математическом пакете программ Scilab.

```
// Пример 5
clear; // Очистка рабочей области
clc; // Очистка командной строки

// из таблицы стандартной видности
x0=
[
380
390
...
780
];

// из таблицы стандартной видности
y0=
[
0.0000
0.0001
...
0.0000
];

// измеренный спектр излучения светодиодов
x1=
```



```
[
390.8
...
760.8
];

// измеренный спектр излучения светодиодов
y1=
[
0
...
0.0007
0
];

// измеренный спектр излучения ламп
x2=
[
390.8
...
760.8
];

// измеренный спектр излучения ламп
y2=
[
0.078
...
0.0655
];

// привели видность к одним значениям по x
coeff0=splin(x0,y0);
X0=[380:1:780]';
Y0=interp(X0,x0,y0,coeff0);

// привели спектр первого источника излучения к
// одним значениям по x
coeff1=splin(x1,y1);
X1=[380:1:780]';
Y1=interp(X1,x1,y1,coeff1);

// привели спектр второго источника излучения к
// одним значениям по x
coeff2=splin(x2,y2);
X2=[380:1:780]';
Y2=interp(X2,x2,y2,coeff2);
```

```
// вычисление фотометрического спектра первого источника излучения
SV1=Y1.*Y0;

// сумма значений энергий спектра первого источника излучения
sumY1=sum(Y1);

// сумма значений энергий фотометрического спектра первого
// источника излучения
sumSV1=sum(SV1);

// отношение энергетического спектра и видимого глазом
// фотометрического спектра
N1=sumY1/sumSV1;

// измеренная величина освещённости рабочей поверхности
// культиватора
lux1=13000;

// величина механического эквивалента света
k=1.464*(10^(-3));

// облучённость от первого источника света
Ee=k*N1*lux1;

// площадь освещаемой (рабочей) поверхности культиватора
S=0.3;

// световая энергия от первого источника света
Itog=Ee*S;

// вычисление фотометрического спектра второго источника излучения
SV2=Y2.*Y0;

// сумма значений энергий спектра второго источника излучения
sumY2=sum(Y2);

// сумма значений энергий фотометрического спектра
// второго источника излучения
sumSV2=sum(SV2);

// отношение энергетического спектра и видимого глазом
// фотометрического спектра
N2=sumY2/sumSV2;

// освещённость, которую необходимо получить от
// второго источника
```

света, чтобы энергии были равны
 $lux2=N1*lux1/N2;$

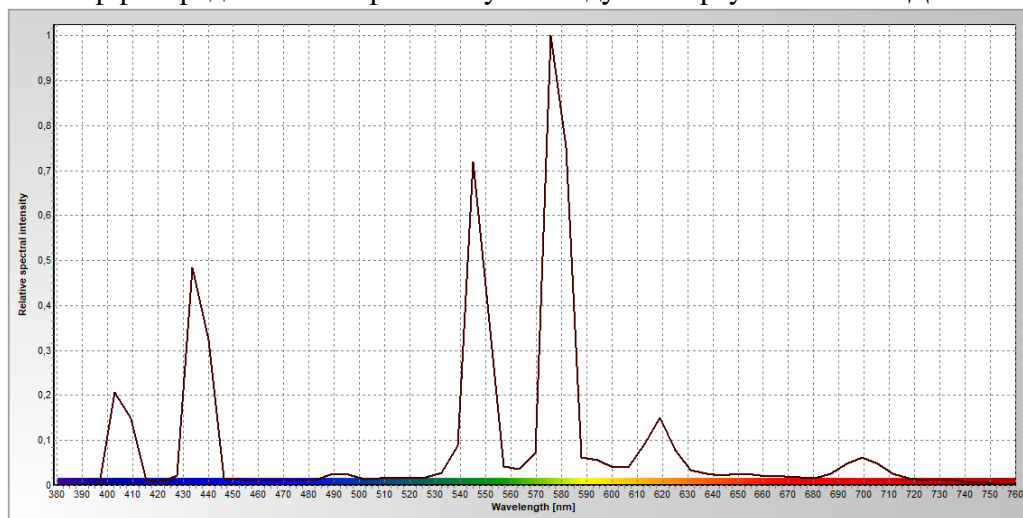
// облучённость от второго источника света
 $Ee2=k*N2*lux2;$

// проверка. Световая энергия от второго источника
// света должна быть равна энергии от первого
 $Itog2=Ee2*S;$

Пример 6

Дано: спектр распределения энергии излучения дуговой ртутной лампы ДРЛ-700 и спектры поглощения культур микроводорослей различных систематических групп (см. рис. 11–17).

Спектр распределения энергии излучения дуговой ртутной лампы ДРЛ-700



Найти: эффективность поглощения культурами микроводорослей потока излучения, создаваемого лампой ДРЛ-700 в области от 400 до 750 нм. Определить ту культуру микроводорослей, которая наиболее эффективно поглощает поток излучения лампы ДРЛ-700.

Решение: все спектры нормируем на максимальное значение (см. рис. 11–17). Затем площадь пересечения спектров культур микроводорослей и лампы ДРЛ-700 (S) делим на площадь спектра ДРЛ-700 (S_0):

$$S = \int_{400}^{750} \Phi_e(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda; \quad S_0 = \int_{400}^{750} \Phi_e(\lambda) d\lambda; \quad \eta = \frac{S}{S_0}, \quad (12)$$

где 400 и 750 — границы спектрального диапазона; $\Phi_e(\lambda)$ — энергетический спектр источника излучения; $\alpha(\lambda)$ — спектр поглощения суспензии микроводорослей в границах спектрального диапазона 400 и 750; η — эффективность поглощения света культурой микроводорослей (см. рис. 18–24).

Ответ: наиболее эффективно поток излучения, создаваемый лампой ДРЛ-700 в области от 400 до 750 нм, поглощает морская диатомея *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & Lewin ($\eta = 84,2\%$).

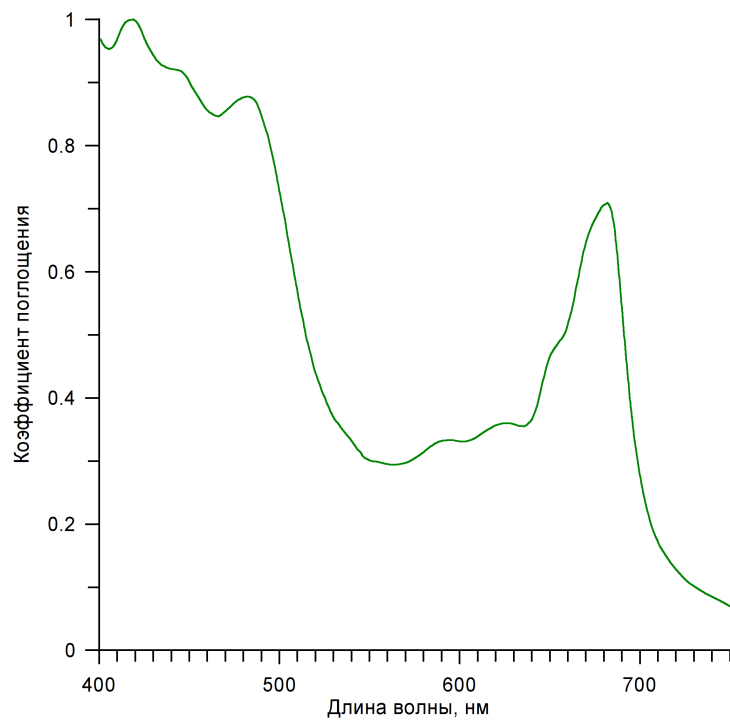


Рис. 11. Нормированный спектр поглощения культуры зелёных микроводорослей *Dunaliella salina* Teod.

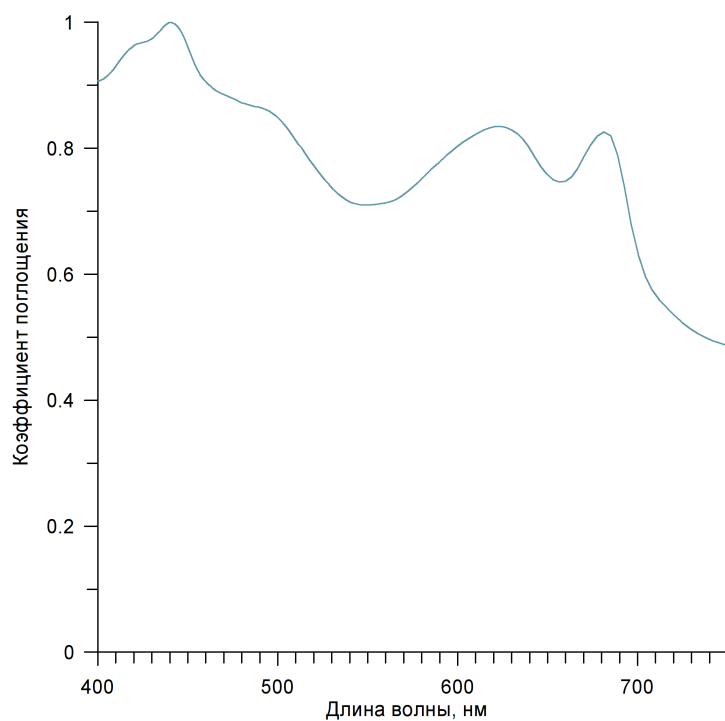


Рис. 12. Нормированный спектр поглощения культуры синезелёных водорослей *Spirulina (Arthrospira) platensis* Gomont.

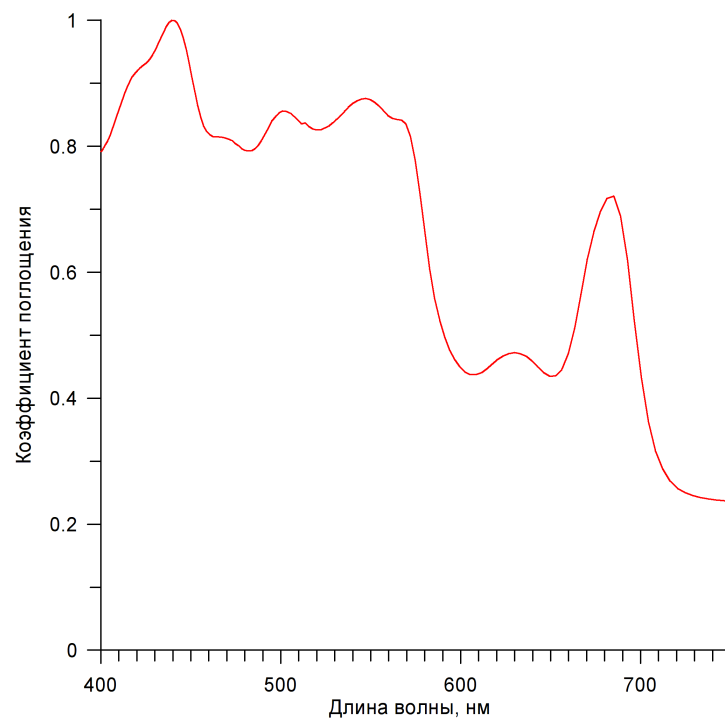


Рис. 13. Нормированный спектр поглощения культуры красных микроводорослей *Porphyridium cruentum* Näg.

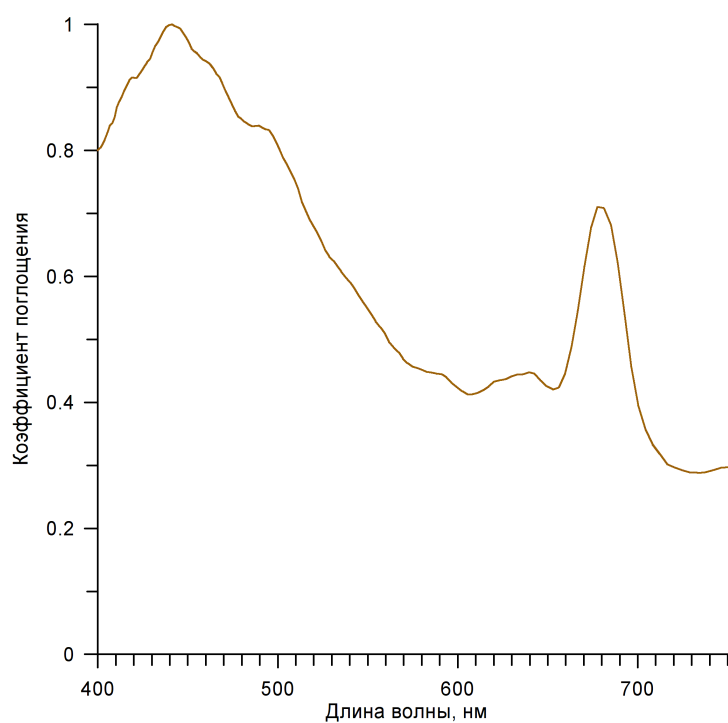


Рис. 14. Нормированный спектр поглощения культуры диатомовых водорослей *Thalassiosira pseudonana* Hasle & Heimdal.

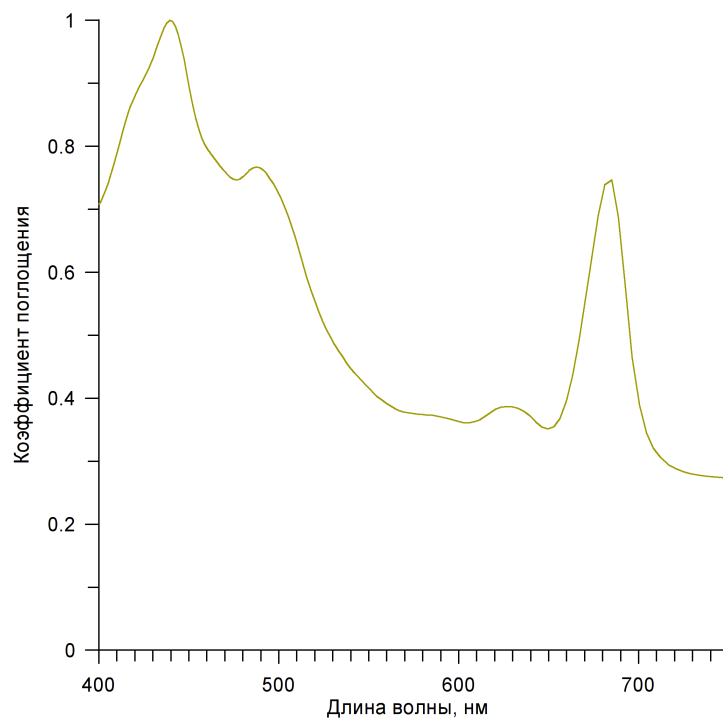


Рис. 15. Нормированный спектр поглощения культуры золотистых микроводорослей *Monochrysis lutheri* Parke.

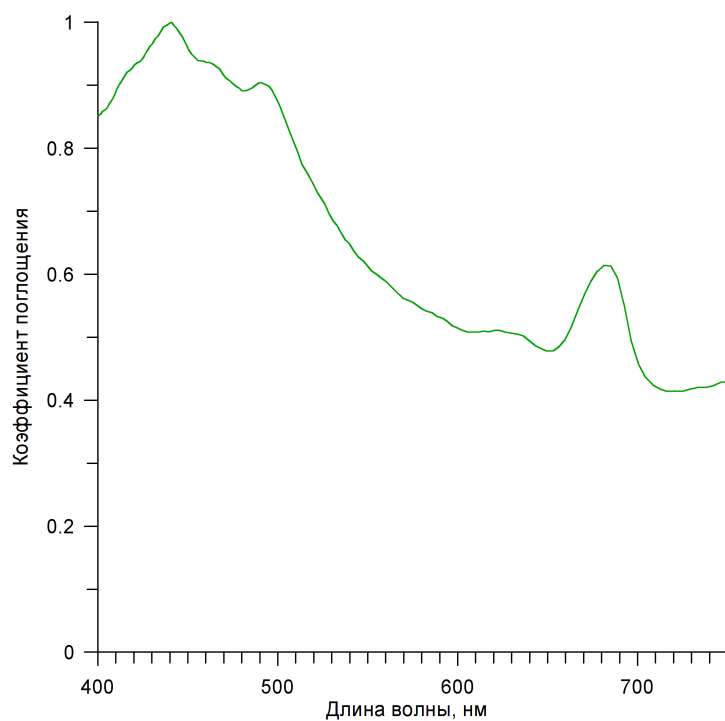


Рис. 16. Нормированный спектр поглощения культуры жёлто-зелёных микроводорослей *Nephrochloris salina* Cart.

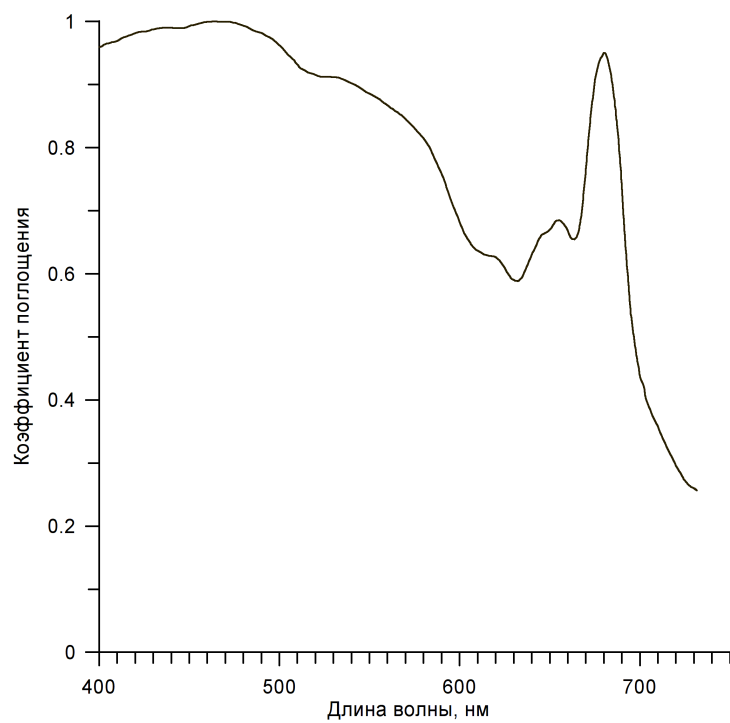


Рис. 17. Нормированный спектр поглощения культуры бентосно-планктонных диатомовых водорослей *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. Lewin.

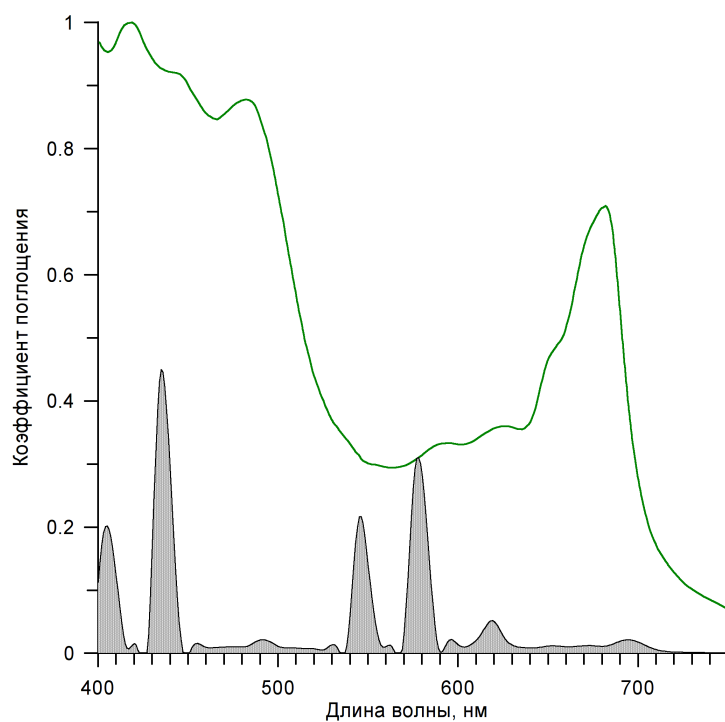


Рис. 18. Нормированный спектр поглощения культуры зелёных микроводорослей *Dunaliella salina* Teod. Серым указано распределение поглощённой культурой *D. salina* энергии излучения в спектре лампы ДРЛ-700. Эффективность поглощения $\eta = 47,3\%$.

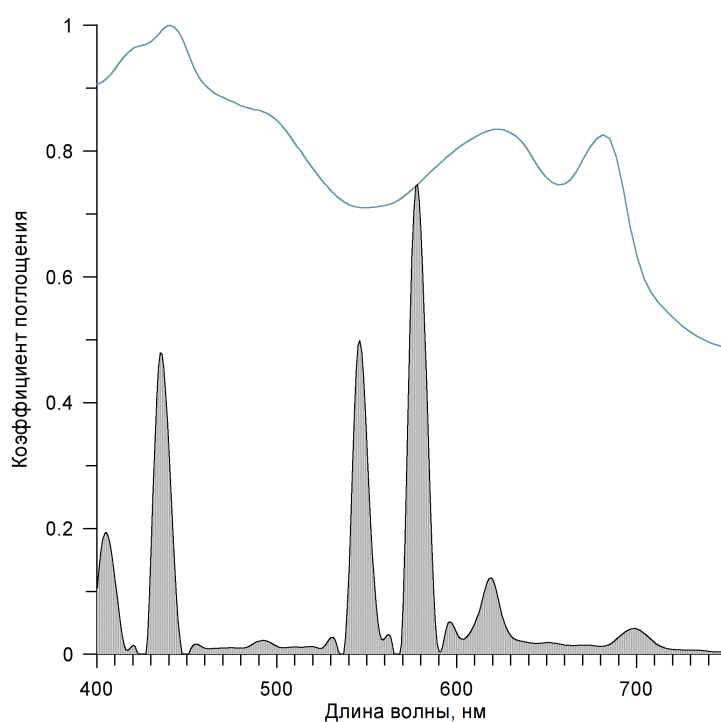


Рис. 19. Нормированный спектр поглощения культуры синезелёных водорослей *Spirulina (Arthrospira) platensis* Gomont. Серым указано распределение поглощённой культурой *S. (A.) platensis* энергии излучения в спектре лампы ДРЛ-700. Эффективность поглощения $\eta = 79,3 \%$.

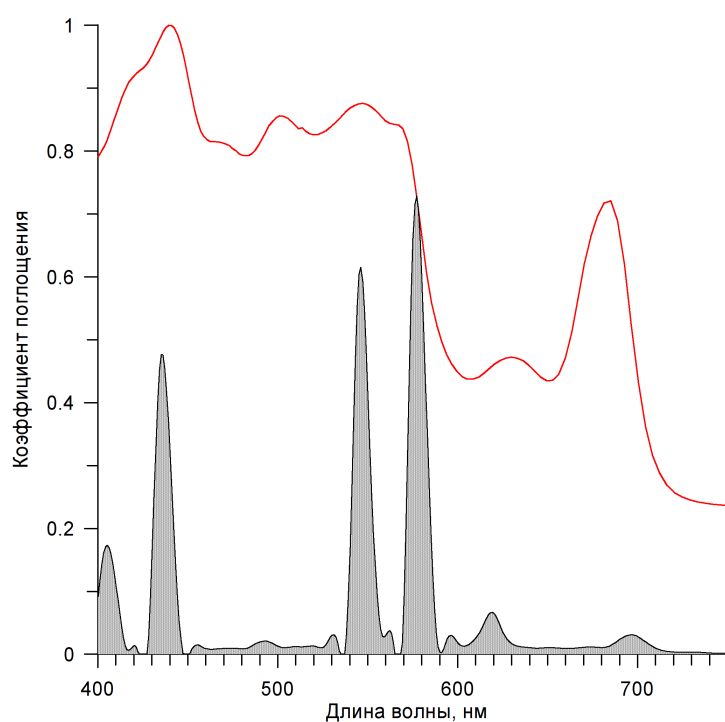


Рис. 20. Нормированный спектр поглощения культуры красных микроводорослей *Porphyridium cruentum* Näg. Серым указано распределение поглощённой культурой *P. cruentum* энергии излучения в спектре лампы ДРЛ-700. Эффективность поглощения $\eta = 75,4$ %.

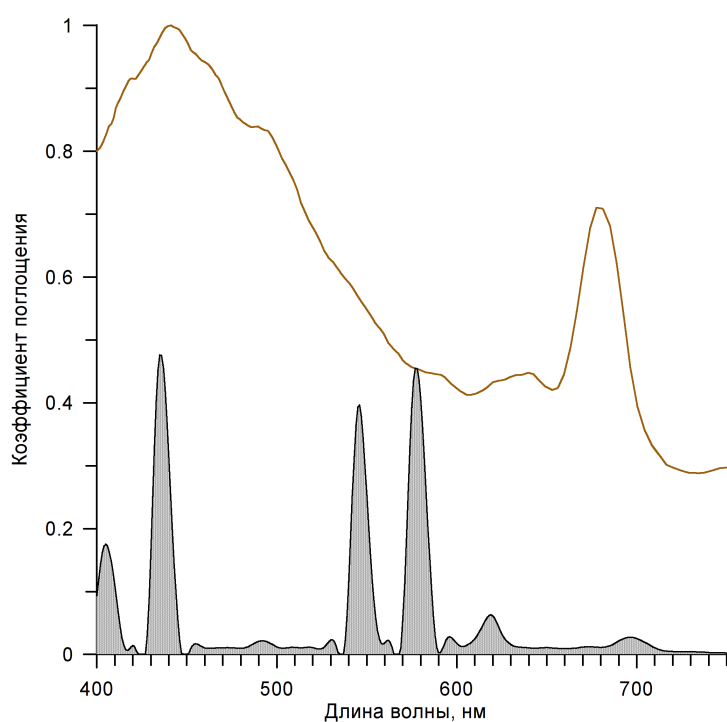


Рис. 21. Нормированный спектр поглощения культуры диатомовых водорослей *Thalassiosira pseudonana* Hasle & Heimdal. Серым указано распределение поглощённой культурой *T. pseudonana* энергии излучения в спектре лампы ДРЛ-700. Эффективность поглощения $\eta = 59,6 \%$.

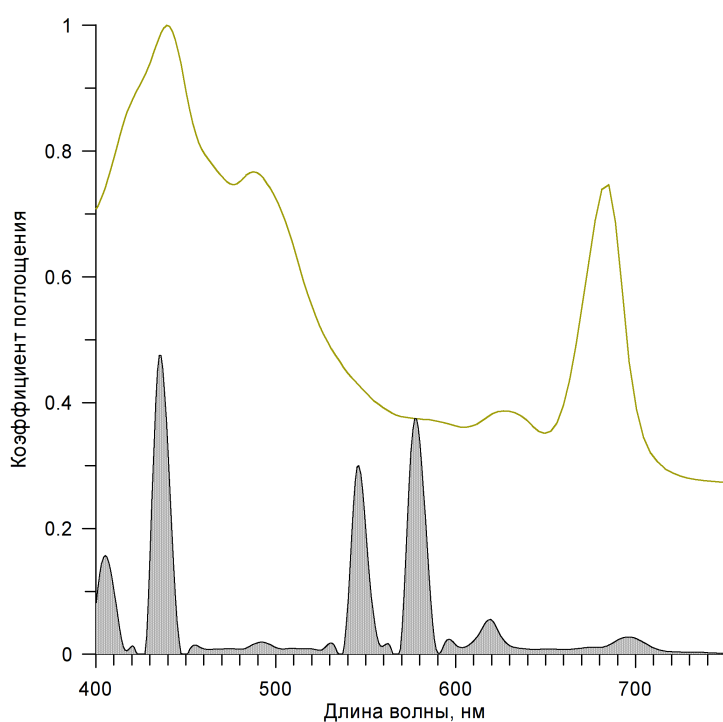


Рис. 22. Нормированный спектр поглощения культуры золотистых микроводорослей *Monochrysis lutheri* Parke. Серым указано распределение поглощённой культурой *M. lutheri* энергии излучения в спектре лампы ДРЛ-700. Эффективность поглощения $\eta = 52,2\%$.

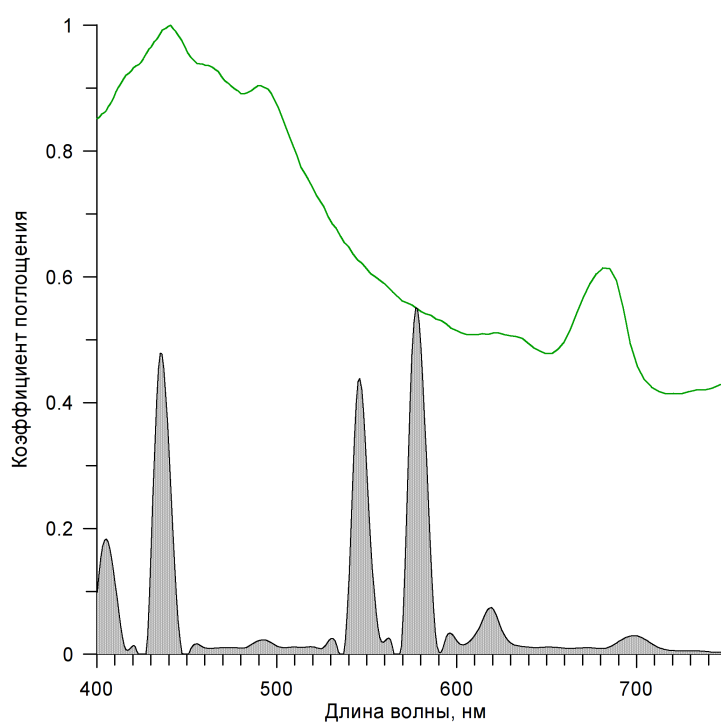


Рис. 23. Нормированный спектр поглощения культуры жёлто-зелёных микроводорослей *Nephrochloris salina* Cart. Серым указано распределение поглощённой культурой *N. salina* энергии излучения в спектре лампы ДРЛ-700. Эффективность поглощения $\eta = 65,9$ %.

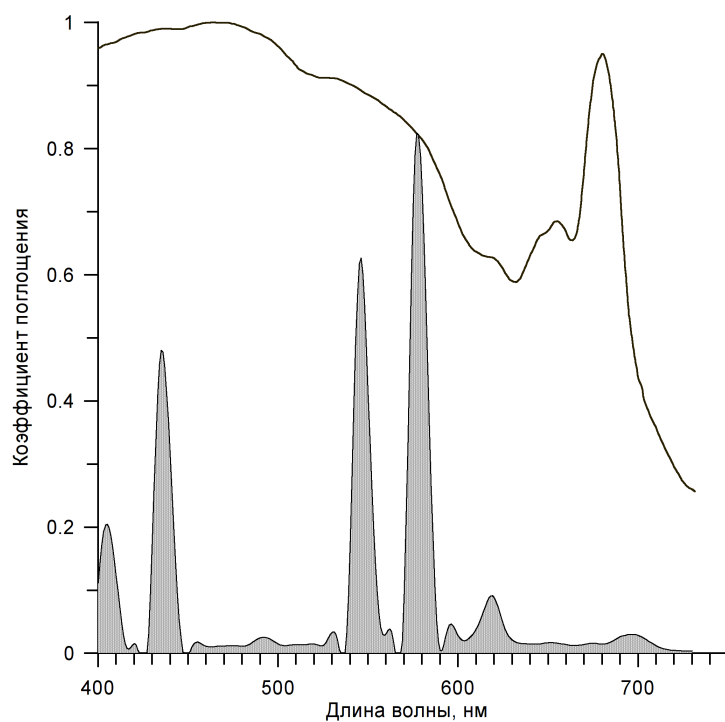


Рис. 24. Нормированный спектр поглощения культуры бентосно-планктонных диатомовых водорослей *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. Lewin. Серым указано распределение поглощённой культурой *C. closterium* энергии излучения в спектре лампы ДРЛ-700. Эффективность поглощения $\eta = 84,2\%$.

Список литературы

1. ГОСТ 8-332-78. Световые изменения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного света. — Взамен ГОСТ 11093-64; введ. 01.01.1981. — Москва : Изд-во стандартов, 1979. — 8 с.
2. Клешнин А. Ф. Растения и свет. — Москва : АН СССР, 1954. — 456 с.
3. Леман В. М. Курс светокультуры растений : учеб. пос. для с.-х. вузов / 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 1976. — 271 с.
4. Ничипорович А. А. Рабочее совещание по вопросам измерения оптического излучения для целей агрометеорологии, физиологии и экологии растений // Физиология растений. — 1969. — Т. 7, вып. 6. — С. 332–350.
5. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / под ред. А. И. Бедрицкого. — Санкт-Петербург ; Москва : Летний сад, 2009. — Т. 2: К–П. — 312 с.
6. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга; 3-е изд., перераб и доп. — Москва : Знак, 2006. — 972 с.
7. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. — Москва : Энергоатомиздат, 1983. — 472 с.
8. Томинг Х. Г., Гуляев Б. И. Методика измерения фотосинтетически активной радиации. — Москва : Наука, 1967. — 144 с.

Геворгиз Руслан Георгиевич
e-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

Малахов Александр Степанович
e-mail: mac89@mail.ru

R. G. Gevorgiz, A. S. Malakhov

Conversion of the illumination quantity of photobioreactor into the irradiance quantity: educational methodology manual / RAS, Kovalevsky Institute of Marine Biological Research. — Sevastopol, 2018. — 60 p.

This educational methodology manual presents the detailed instruction on conversion of the reduced photometric quantity of illumination (lux) into the energy photometric quantity of irradiance (W/m^2). The training aid provides terms and definitions and also gives examples of the calculations of surface irradiance of microalgae cultures.

The training aid is addressed to students and postgraduates of all specialties.

Подписано в печать 15.06.2018 г.
Заказ № 33. Тираж 100 экз.

ООО «Колорит»
ОГРН 1169204061454 от 18.11.2016
299011, г.Севастополь, ул. Ленина, 28
Тел. (8692) 54-31-46
e-mail: colorit.ooo2016@yandex.ru