

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Основу дистанционного зондирования составляет измерение энергии электромагнитного излучения от различных источников, важнейшим из которых является Солнце. Спектр солнечного излучения содержит все длины волн, и некоторые его части чрезвычайно важны для человека. В частности, к ним относится диапазон видимого света и ультрафиолетовый диапазон, излучение в котором может быть опасно для человеческой кожи. Множество сенсоров, которые используются в дистанционном зондировании, предназначены для измерения параметров отраженного солнечного света. Другие регистрируют собственное излучение Земли либо сами являются источниками излучения. Для понимания принципов работы этих сенсоров необходимо знание физических основ электромагнитного излучения, его характеристик и того, как происходит взаимодействие излучения с веществом. Эти знания важны и для правильной интерпретации данных дистанционного зондирования.

### Характеристики электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение можно представить в виде волн или в виде потока *фотонов* — частиц, каждая из которых несет определенную долю энергии. В волновой модели электромагнитное излучение распространяется в виде синусоидальных волн, которые характеризуются двумя взаимно перпендикулярными векторами: вектором электрического поля  $E$  и вектором магнитного поля  $M$ . Эта двойственность и является причиной того, почему излучение называют электромагнитным. Направления колебаний обоих полей перпендикулярны направлению распространения волны (рис. 1), а скорость их распространения равна скорости света  $c$  и составляет 299 790 000 м/с. Последнее значение можно округлить до  $3 \times 10^8$  м/с. Для понимания физических основ дистанционного зондирования особенно важным является понятие длины волны  $\lambda$ . Эту величину определяют, как расстояние между двумя последовательными волновыми гребнями и измеряют в метрах или долях метра, таких как микрометр (мкм,  $10^{-6}$  м) или нанометр (нм,  $10^{-9}$  м).

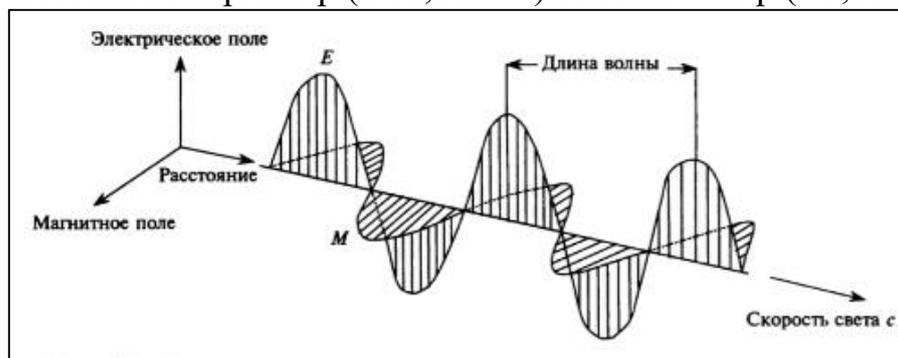


Рис. 1. Волновая модель электромагнитного излучения

Другой важной характеристикой электромагнитных волн является круговая частота  $\nu$  — количество циклов волновых колебаний в фиксированной точке пространства за определенный интервал времени. Частоту обычно измеряют в герцах (Гц). Один герц — это частота, равная

одному циклу колебаний в секунду. Поскольку скорость света — величина постоянная, длина волны и частота обратно пропорциональны друг другу:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Хотя волновая модель описывает большинство свойств электромагнитного излучения, для некоторых задач удобнее использовать корпускулярную теорию, в которой излучение моделируется потоком фотонов. В частности, этот подход полезен при определении количества энергии, измеряемой многозональным сенсором. При заданной длине волны энергия фотона  $Q$  определяется как

$$Q = h\nu$$

или

$$Q = h \frac{c}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $h$  — постоянная Планка ( $6,6262 \times 10^{-34}$  Дж•с). Из формулы (2) следует, что чем больше длина волны, тем меньше энергия фотона. Наибольшей энергией обладает гамма-излучение (длина волны около  $10^{-9}$  м), а наименьшей — радиоволны (длина волны более 1 м). Отметим также, что коротковолновое излучение поддается измерению легче, чем длинноволновое.

#### Электромагнитный спектр и его характеристики

Любое тело, температура которого выше абсолютного нуля (0 К), является источником электромагнитного излучения, поскольку его молекулы находятся в возбужденном состоянии, которое отличается от состояния полного покоя. В частности, такими источниками являются Солнце и Земля. Тело, которое способно полностью поглощать все падающее на него электромагнитное излучение, а затем заново его испускать, называют *абсолютно черным телом*. У абсолютно черного тела излучательная способность  $e$  и поглощательная способность  $a$  равны единице.

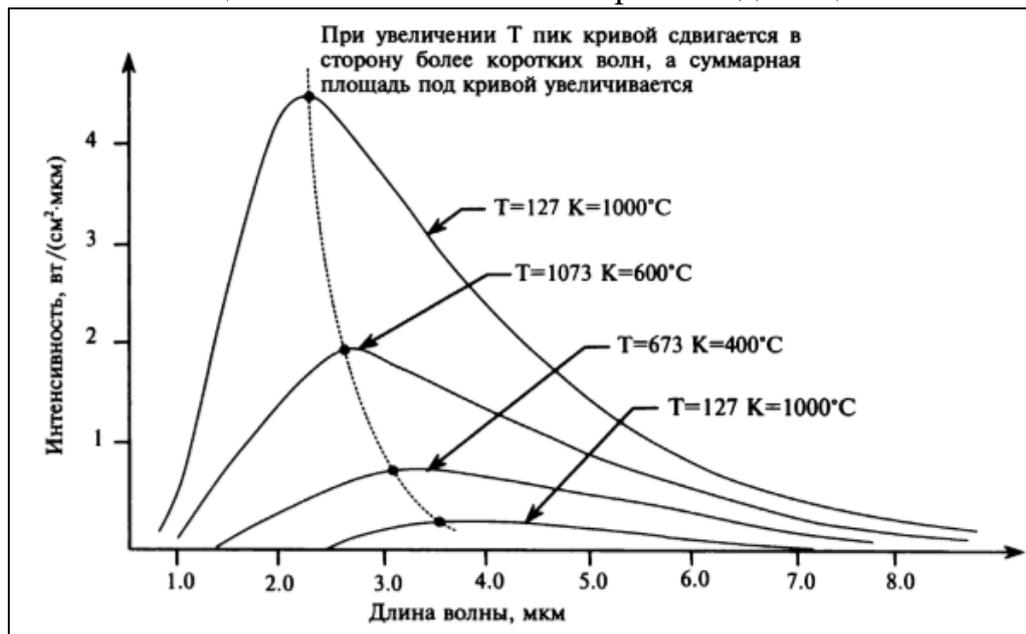


Рис. 2. Интенсивность излучения абсолютно черного тела

Количество излучаемой объектом энергии зависит от его абсолютной температуры и излучательной способности и является функцией длины волны. На рис. 2.2 показана интенсивность излучения абсолютно черного тела при разных значениях температуры. Площадь под каждой кривой характеризует суммарную энергию излучения. Из рисунка видно, что при высоких значениях температуры возрастает вклад коротковолнового излучения. Так, пик излучения при температуре  $400^{\circ}\text{C}$  соответствует длине волны  $4\text{ мкм}$ , а при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  — длине волны  $2,5\text{ мкм}$ . Излучательные свойства реальных тел по отношению к таковым абсолютно черного тела характеризуют величиной, которую называют *излучательной способностью*. Поскольку абсолютно черных тел в природе не существует, излучательная способность природных объектов меньше единицы. Это означает, что только часть полученной энергии (обычно около 80—98%) возвращается такими объектами в виде излучения, а остальная ее часть полностью ими поглощается.

### Электромагнитный спектр

Все тела при температуре выше абсолютного нуля излучают электромагнитные волны, которые могут иметь разную длину волны. Диапазон длин волн от гамма-излучения до радиоволн принято называть *электромагнитным спектром* (рис. 3). При дистанционном зондировании используют несколько диапазонов электромагнитного спектра. Ту его часть, в которой применимы законы оптики, называют оптическим диапазоном. Законы оптики описывают такие явления, как отражение и преломление, которые можно использовать для фокусировки излучения. К оптическому диапазону относится рентгеновское излучение ( $0,002\text{ мкм}$ ), видимый свет и инфракрасное излучение вплоть до дальней зоны ( $1000\text{ мкм}$ ). Наименьшие длины волн, которые используют при дистанционном зондировании, относятся к ультрафиолетовой части спектра, расположенной непосредственно за фиолетовой зоной видимого диапазона. Некоторые породы земной поверхности, в частности основные породы и минералы, испускают под действием ультрафиолетового излучения видимый свет. Диапазон длин волн от  $1\text{ мм}$  до  $1\text{ м}$  называют микроволновым или СВЧ-диапазоном.

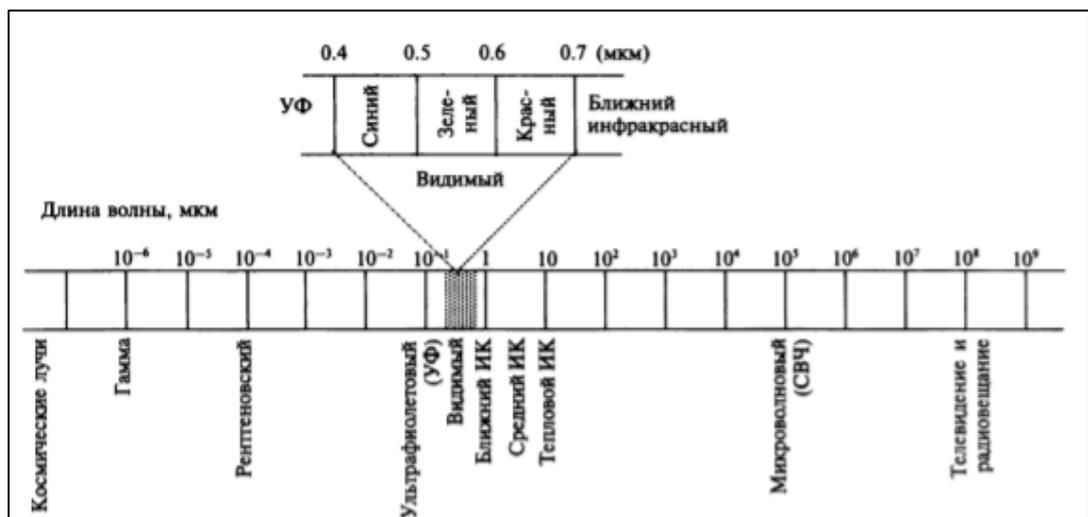


Рис. 3. Диапазоны электромагнитного спектра

Видимый диапазон, который часто называют *световым*, занимает относительно небольшую часть электромагнитного спектра. Важно, что это единственный диапазон, в котором применимо понятие цвета. Основными цветами принято считать синий, зеленый и красный. Это относится и к соответствующим диапазонам видимого спектра.

Наибольшие длины волн, которые используют при дистанционном зондировании, принадлежат тепловому инфракрасному и микроволновому диапазонам. Тепловое инфракрасное излучение содержит информацию о температуре поверхности, которая может быть связана, например, с минеральным составом пород или с определенной растительностью. Микроволновый диапазон используют для получения информации о шероховатости и других свойствах поверхности, в частности о содержании влаги.

### Взаимодействие излучения с атмосферой

Основным источником электромагнитного излучения является Солнце. Прежде чем солнечное излучение достигнет Земли, оно должно пройти через атмосферу. Выделяют три основных типа взаимодействия излучения с атмосферой: поглощение, перенос и рассеивание. Излучение, прошедшее через атмосферу, затем отражается или поглощается земной поверхностью (рис. 4).

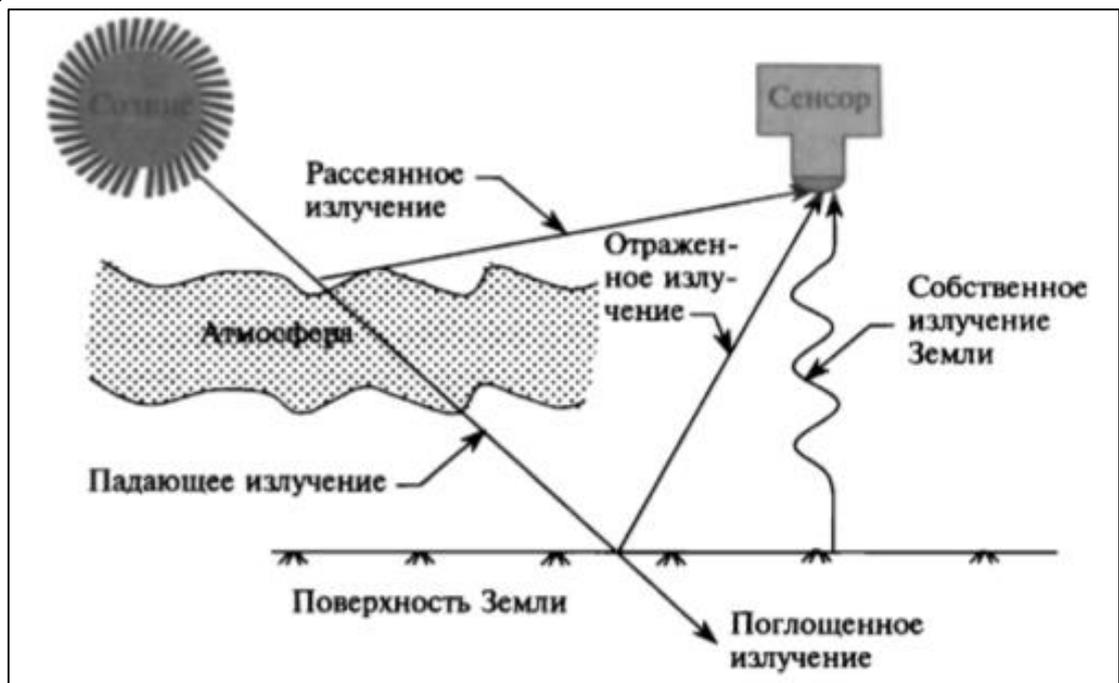


Рис. 4. Взаимодействие излучения с веществом  
Поглощение и перенос излучения в атмосфере

При распространении электромагнитного излучения через атмосферу оно частично поглощается молекулами различных газов. Наибольшей способностью к поглощению солнечного излучения обладают озон ( $O_3$ ), пары воды ( $H_2O$ ) и углекислый газ ( $CO_2$ ). На рис. 5 показана кривая прозрачности атмосферы в диапазоне длин волн от 0 до 22 мкм. Видно, что примерно половина этого спектрального диапазона является совершенно бесполезной с точки зрения дистанционного зондирования земной поверхности, просто

потому, что соответствующее излучение не может пройти через атмосферу. Для дистанционного зондирования используют только те диапазоны длин волн, которые лежат вне основных интервалов поглощения. Такие диапазоны называются *окнами прозрачности атмосферы*. К ним относятся окно прозрачности в видимом и инфракрасном диапазоне от 0,4 до 2,0 мкм, в котором «работают» оптические сенсоры и человеческое зрение, а также три окна прозрачности в тепловом инфракрасном диапазоне: два узких окна вблизи 3 и 5 мкм и одно относительно широкое в интервале приблизительно от 8 до 14 мкм. Из-за молекул воды в атмосфере наиболее сильное поглощение наблюдается при длинах волн в диапазоне от 33 мкм до 1 мм. Атмосфера почти не пропускает излучения. Еще одним более или менее прозрачным диапазоном является микроволновый диапазон, соответствующий длинам волн больше 1 мм.

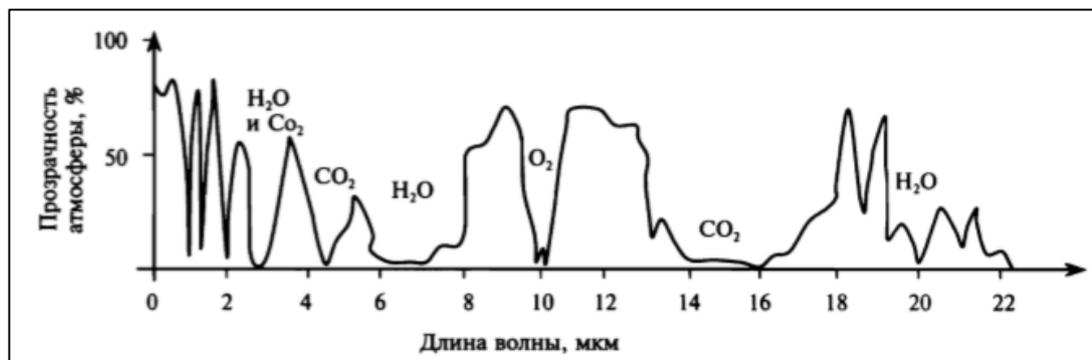


Рис. 5. Окна прозрачности атмосферы

Спектр солнечного излучения до и после его прохождения через атмосферу Земли показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что кривая интенсивности солнечного излучения до его прохождения через атмосферу хорошо соответствует кривой интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 6000 К. Сравнивая первую кривую с кривой, полученной вблизи поверхности Земли, можно выделить области относительно низких значений, соответствующие окнам поглощения различных атмосферных газов.

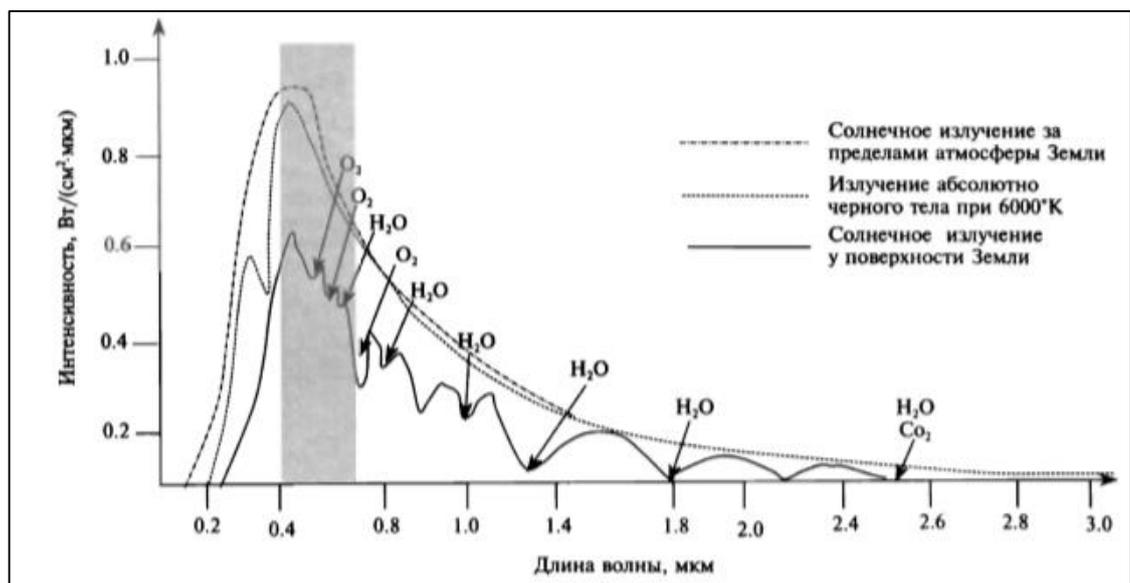


Рис. 6. Спектр солнечного излучения

### Рассеивание излучения

Причиной рассеивания является изменение направления распространения электромагнитных волн из-за их взаимодействия с молекулами газов и присутствующих в атмосфере частиц. Величина рассеивания зависит от длины волны электромагнитного излучения, количества частиц и концентрации атмосферных газов, а также длины пути распространения излучения через атмосферу. В диапазоне видимого света доля рассеянного излучения при регистрации сенсором составляет от 100% при сплошной облачности до 5% при абсолютно ясном небе. Выделяют три типа рассеивания в атмосфере.

#### Рассеивание Релея

Релеевское рассеивание доминирует при условии, что электромагнитное излучение взаимодействует с частицами, размер которых меньше длины волны падающего света. Примерами таких объектов могут служить частицы пыли, молекулы азота ( $N_2$ ) и кислорода ( $O_2$ ). Величина релеевского рассеивания обратно пропорциональна длине волны, т. е. чем меньше длина волны, тем сильнее рассеивание.

В отсутствие рассеивания небо было бы черным. В дневное время солнечные лучи проходят через атмосферу по кратчайшему пути. В этой ситуации релеевское рассеивание приводит к тому, что человек видит небо синим, поскольку синий свет обладает наименьшей длиной волны, которую может наблюдать человеческий глаз. На закате и восходе солнечные лучи проходят более длинный путь через атмосферу. Коротковолновая часть излучения успевает рассеяться, и поверхности Земли достигают только волны с относительно большой длиной волны. В результате небо окрашивается в оранжевый или красный цвет.

В условиях дистанционного зондирования с помощью спутников основным видом рассеивания является именно релеевское. Вызванное им искажение спектральных характеристик отраженного света по сравнению с измерениями вблизи земной поверхности приводит к тому, что интенсивность регистрируемого коротковолнового излучения оказывается завышенной. Релеевское рассеивание является причиной снижения контрастности снимков и отрицательно влияет на возможность их дешифрирования. При работе с цифровыми снимками, полученными с помощью сканирующих систем, искажение спектральных характеристик земной поверхности может существенно ограничить возможности классификации объектов.

#### Рассеивание Ми

Рассеивание этого типа возникает, если длина волны падающего излучения сравнима с размерами частиц. Наиболее важной причиной рассеивания Ми являются аэрозоли, представляющие собой смесь газов, паров воды и частиц пыли. Как правило, рассеивание Ми возникает в нижних слоях атмосферы, где крупные частицы встречаются чаще, и доминирует в условиях сплошной облачности. Рассеивание этого типа проявляется в нескольких спектральных диапазонах: от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного.

### Неселективное рассеивание

Неселективное рассеивание возникает при условии, что размер частиц существенно больше длины волны излучения. К таким частицам относятся капли воды и крупные частицы пыли. Неселективное рассеивание не зависит от длины волны и наиболее отчетливо проявляется при наличии облаков, содержащих водные капли. Поскольку излучение с разной длиной волны рассеивается одинаково, облака выглядят белыми. В условиях сплошной облачности излучение в оптическом диапазоне не проникает через атмосферу.

### Взаимодействие излучения с поверхностью Земли

Различают три основных типа взаимодействия падающего электромагнитного излучения с объектами на поверхности Земли: отражение, поглощение и пропускание (см. рис. 4). Соотношение, связывающее между собой три компонента излучения после его взаимодействия с поверхностью, можно получить из закона сохранения энергии. Учитывая, что все компоненты являются функциями длины волны, запишем это соотношение в следующем виде:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda), \quad (3)$$

где  $E_I(\lambda)$  — энергия падающего излучения,  $E_R$  — энергия отраженного излучения,  $E_A$  — поглощенная энергия,  $E_T$  — энергия излучения, прошедшего через вещество.

Свойства отраженного, поглощенного и пропущенного излучения различаются для разных объектов на поверхности Земли и зависят от вещества объекта и физических условий, в которых он находится. Эти различия и позволяют идентифицировать объекты на снимке. Даже у объектов одного типа соотношение между поглощенным, отраженным и пропущенным излучением зависит от длины волны. В результате, два объекта могут оказаться неразличимыми в одном спектральном диапазоне, но хорошо различимыми в другом. В видимой части спектра эти различия воспринимаются как изменения *цвета*. Объекты кажутся синими, когда они отражают большую часть излучения в синей части спектра, и зелеными, когда максимум их отражательной способности приходится на зеленый спектральный диапазон. То же самое относится и к любому другому цвету. Амплитудные вариации спектра отраженного излучения используют для дешифрирования различных объектов на снимке.

Поскольку множество систем дистанционного зондирования работает в тех спектральных диапазонах, где доминирует отраженное излучение, отражательные свойства различных объектов играют очень важную роль при их идентификации. В этой связи равенство (3) полезно записать в виде соотношения (4), в котором энергия отраженного излучения полагается равной энергии падающего излучения за вычетом либо поглощенной энергии, либо энергии пропущенного излучения:

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)], \quad (4)$$

Также важно учитывать геометрические характеристики отражения, которые в основном зависят от неровности поверхности. На плоской

поверхности наблюдается зеркальное отражение, при котором угол отражения равен углу падения. На неровной поверхности возникает диффузное (или ламбертово) отражение, при котором падающее излучение отражается равномерно во всех направлениях. В реальной ситуации отражение носит смешанный характер. Зависимость характеристик отражения от геометрии поверхности показана на рис. 7, на котором представлены различные виды отражения. Категория поверхности зависит от отношения размеров ее неровностей к длине волны падающего излучения. Так, например, в видимом диапазоне песчаный пляж является неровной поверхностью, но в более длинноволновой части электромагнитного спектра он ведет себя как плоская поверхность. Иными словами, если длина волны падающего излучения много меньше вариаций высоты поверхности или размеров слагающих ее частиц, то отражение будет диффузным.

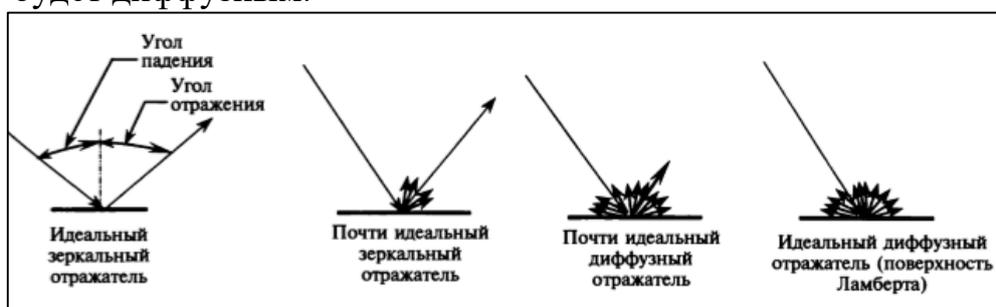


Рис. 7. Зеркальное и диффузное отражение

В отличие от зеркального отражения, спектр излучения, образованного при диффузном отражении, содержит информацию о цвете поверхности. Именно поэтому измерение диффузных отражательных характеристик различных территорий является важной составляющей дистанционного зондирования.

Отражательные свойства земной поверхности можно охарактеризовать, измерив относительную долю энергии отраженного излучения как функцию длины волны. Эта функция называется спектральной отражательной способностью ( $\rho_\lambda$ ) и определяется как

$$\begin{aligned} \rho_\lambda &= \frac{\text{Энергия отраженного излучения с длиной волны } \lambda}{\text{Энергия падающего излучения с длиной волны } \lambda} \times 100 = \\ &= \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \times 100. \end{aligned} \quad (5)$$

График зависимости спектральной отражательной способности объекта от длины волны называется *кривой спектральной отражательной способности*. Вид этого графика позволяет изучить спектральные характеристики объекта и имеет большое значение при выборе спектрального диапазона, в котором будет проводиться сбор данных дистанционного зондирования для определенной исследовательской задачи. На рис. 8 показаны усредненные кривые спектральной отражательной способности лиственных и хвойных деревьев. Каждая из этих кривых представляет собой огибающую некоторого набора значений, поскольку значения спектральной отражательной способности у разных видов лиственных и хвойных деревьев,

так же как и у отдельных деревьев одного и того же вида, никогда полностью не совпадают.

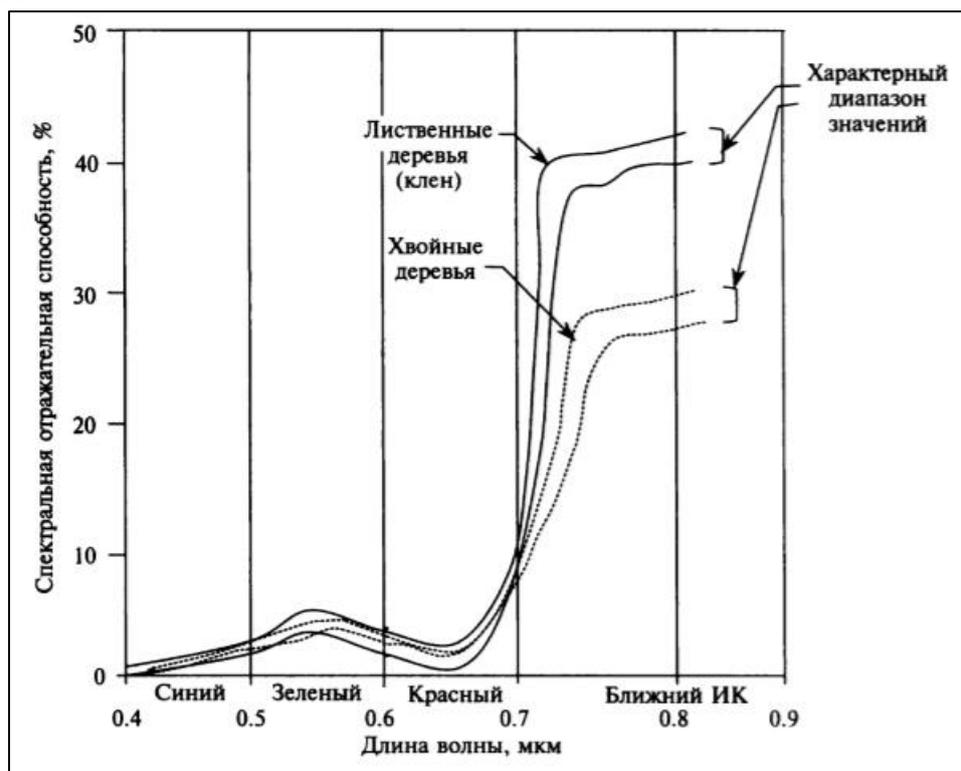


Рис. 8. Кривые спектральной отражательной способности древесной растительности