

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Введение

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.

В этой главе объясняется, что такое электромагнитное излучение, каковы его источники и из каких частей состоит его спектр. Здесь также обсуждается взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой и земной поверхностью.

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. 2.1), а скорость их распространения равна скорости света c и составляет 299 790 000 м/с. Последнее значение можно округлить до 3×10^8 м/с. Для понимания физических основ дистанционного зондирования особенно важным является понятие длины волны λ . Эту величину определяют как расстояние между двумя последовательными волновыми гребнями

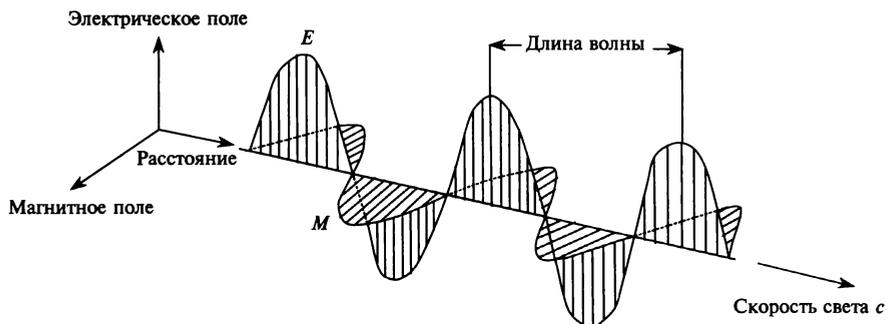


Рис. 2.1. Волновая модель электромагнитного излучения

и измеряют в метрах или долях метра, таких как микрометр (мкм, 10^{-6} м) или нанометр (нм, 10^{-9} м).

Другой важной характеристикой электромагнитных волн является круговая частота ν — 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:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

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

$$Q = h \frac{c}{\lambda}, \quad (2.2)$$

где h — постоянная Планка ($6,6262 \times 10^{34}$ Дж · с). Из формулы (2.2) 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 пол-

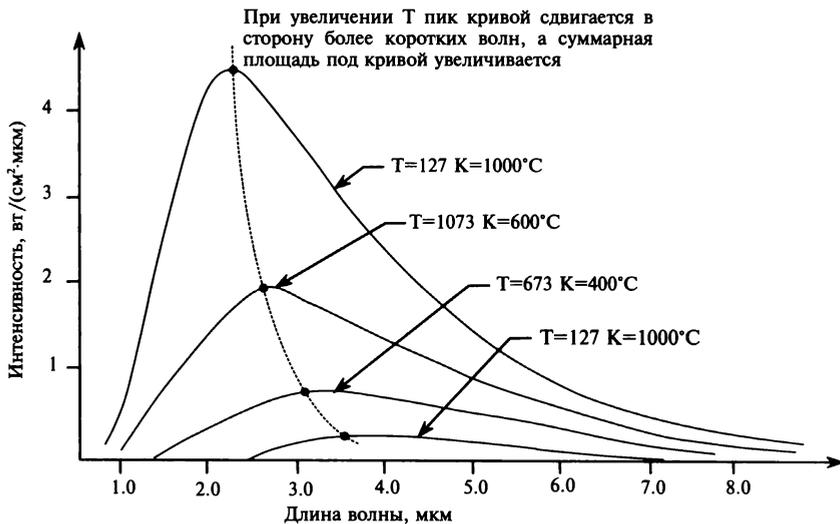


Рис. 2.2. Интенсивность излучения абсолютно черного тела

ного 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.

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°C соответствует длине волны 4 мкм , а при температуре 1000°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 $80\text{—}98\%$) 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. 2.3).

При дистанционном зондировании используют несколько диапазонов электромагнитного спектра. Ту его часть, в которой применимы законы

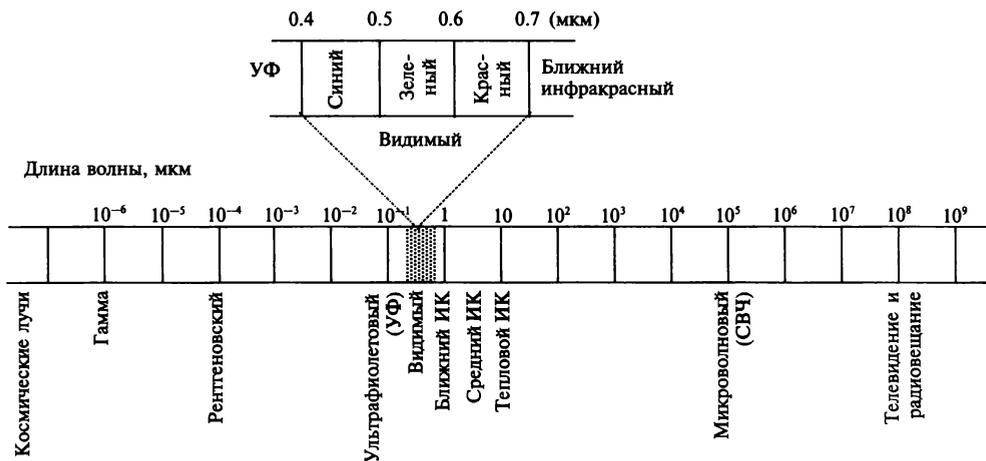


Рис. 2.3. Диапазоны электромагнитного спектра

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 мкм), видимый свет и инфракрасное излучение вплоть до дальней зоны (1000 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 мм до 1 м называют микроволновым или СВЧ-диапазоном.

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. 2.4).

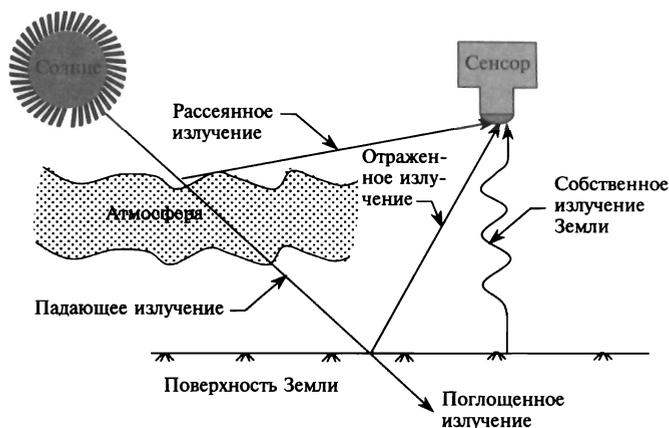


Рис. 2.4. Взаимодействие излучения с веществом

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. 2.5 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 диапа-

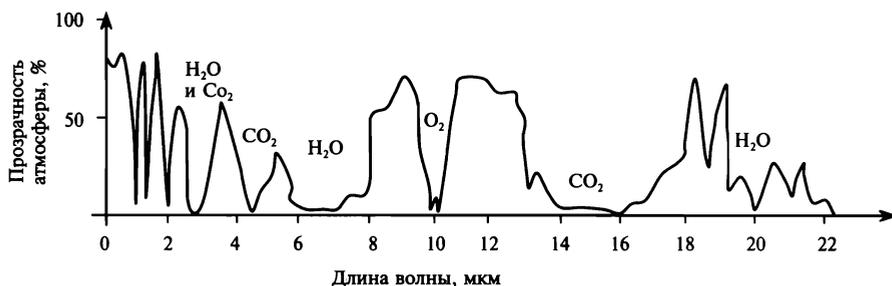


Рис. 2.5. Окна прозрачности атмосферы [48]

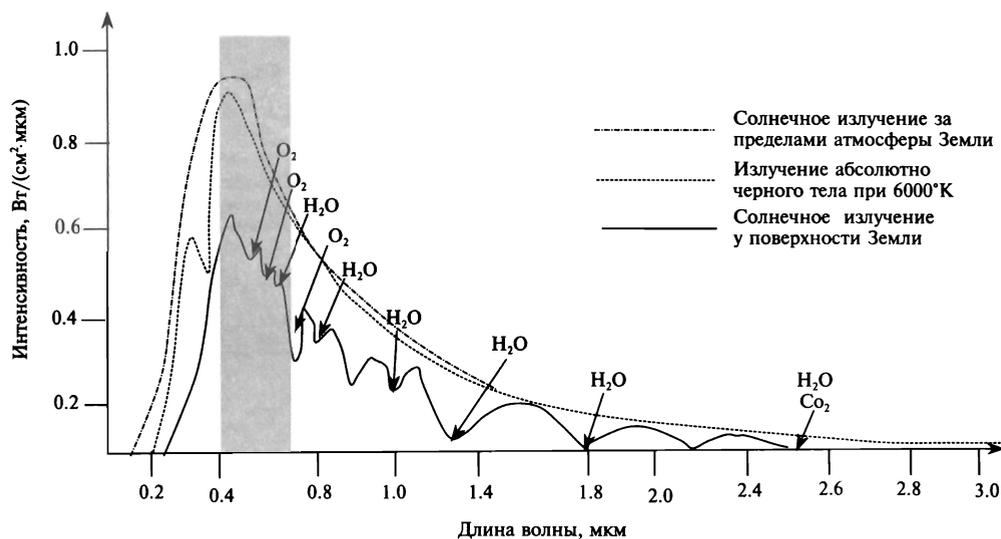


Рис. 2.6. Спектр солнечного излучения [48]

зоном является микроволновый диапазон, соответствующий длинам волн больше 1 мм.

Спектр солнечного излучения до и после его прохождения через атмосферу Земли показаны на рис. 2.6. 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.

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 рас-

сеивания 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, поглоще-

ние и пропускание (см. рис. 2.4). 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:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda), \quad (2.3)$$

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 (2.3) полезно записать в виде соотношения (2.4), в котором энергия отраженного излучения полагается равной энергии падающего излучения за вычетом либо поглощенной энергии, либо энергии пропущенного излучения:

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)]. \quad (2.4)$$

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. 2.7, 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 длинновол-

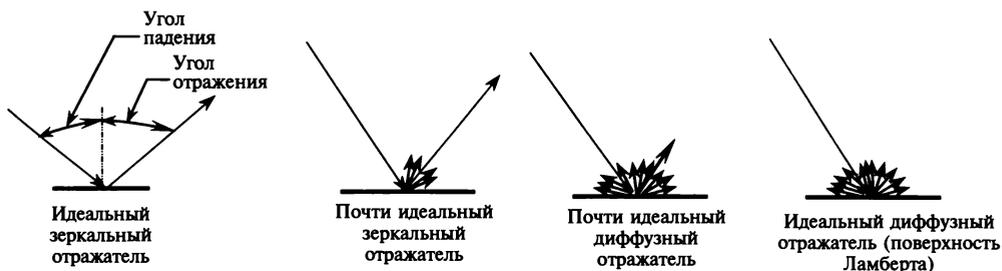


Рис. 2.7. Зеркальное и диффузное отражение [48]

новой 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.

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* (ρ_λ) и определяется как

$$\rho_\lambda = \frac{\text{Энергия отраженного излучения с длиной волны } \lambda}{\text{Энергия падающего излучения с длиной волны } \lambda} \times 100 = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \times 100. \quad (2.5)$$

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. 2.8 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.

Кривые спектральной отражательной способности

Энергия падающего излучения характеризует *освещенность* объекта, а энергия отраженного излучения — его *яркость*. Каждый объект обладает собственной кривой спектральной отражательной способности, которая определяется как отношение энергий отраженного и падающего излучения

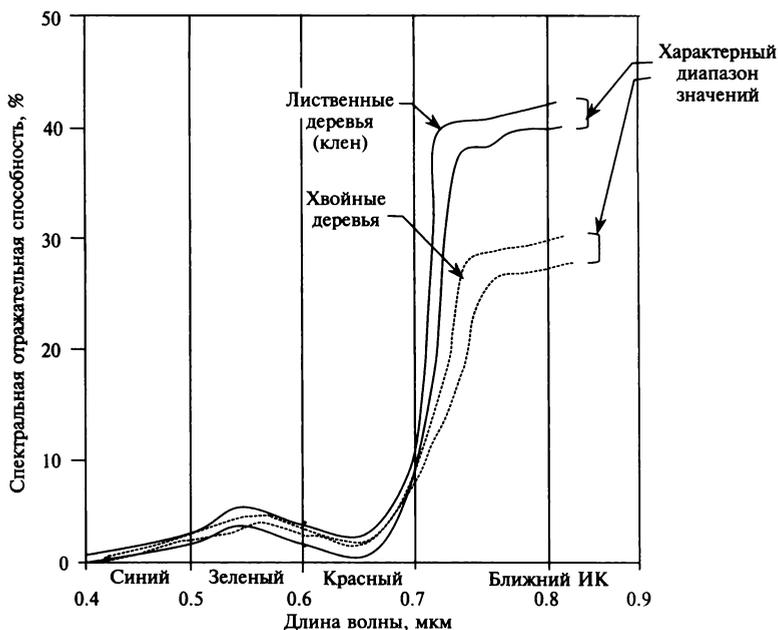


Рис. 2.8. Кривые спектральной отражательной способности древесной растительности [48]

и является функцией длины волны. В частности, с помощью такой кривой можно получить общую оценку спектральной отражательной способности объекта в некотором относительно широком диапазоне (например, от 400 до 480 нм), повышая надежность измерений. Кривые спектральной отражательной способности строят для оптической части электромагнитного спектра (до 2,5 мкм).

Отражательную способность можно измерить в лабораторных либо в полевых условиях с помощью спектрометра. В последующих разделах обсуждаются отражательные свойства наиболее типичных земных покровов.

Растительный покров

Кривая спектральной отражательной способности зеленой растительности имеет весьма характерный вид, ее поведение сильно изменяется в зависимости от длины волны (рис. 2.9). Из рисунка видно, что отражательная способность растительного покрова мала в синем и красном диапазоне видимого спектра. Причина этого заключается в существовании окна поглощения, связанного с присутствием в зеленой листве хлорофилла, который поглощает большую часть излучения. Центр этого окна соответствует длине волны 450 мкм. При увеличении экологической нагрузки содержание хлорофилла в растительности снижается, а отражательная способность увеличивается, особенно в красном диапазоне, из-за чего растительность приобретает желтый или хлоротичный оттенок.

Важную роль играют и другие пигменты, в частности каротин, ксантофил (желтый пигмент) и антоциан (красный пигмент). Каротин и ксан-

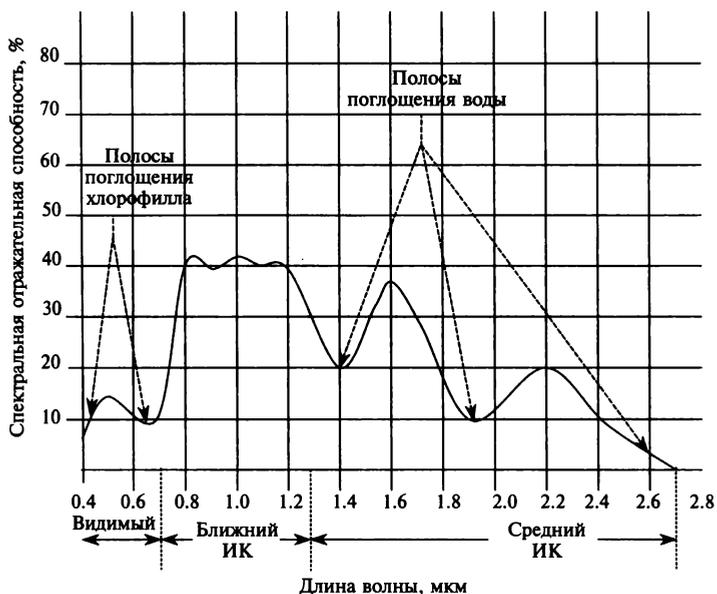


Рис. 2.9. Кривая спектральной отражательной способности зеленого растительного покрова

тофил часто встречаются в листьях, однако их окна поглощения находятся в синем диапазоне (0,45 мкм), где доминирующим является влияние хлорофилла, поэтому влияние этих пигментов проявляется только в его отсутствие. Некоторые виды деревьев вырабатывают в больших количествах антоциан и из-за этого имеют красный цвет. При внимательном изучении влияния различных пигментов на отражательную способность растительного покрова оказывается, что в отличие от видимого диапазона, в котором наблюдаются значительные различия, в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах этих различий почти не существует.

В ближней инфракрасной части спектра наблюдается существенное увеличение отражательной способности при переходе через пороговое значение 0,7 мкм из видимой в инфракрасную часть спектра. В этом диапазоне не зеленый растительный покров характеризуется высокой отражательной способностью, высокой прозрачностью и низким поглощением. Значения коэффициентов отражения и прозрачности достигают величины порядка 45–50%, а доля поглощенного излучения составляет всего около 5%. Важную роль играет также структура листы.

Замечено, что разница в отражательной способности одноярусной и многоярусной древесной растительности может достигать 85%. Причина этого проста: дополнительное излучение, прошедшее через первый ярус отражается от второго, а затем, частично, еще раз проходит через первый ярус. Этот эффект особенно заметен при сравнении отражательной способности в центре исследуемого массива и на его краю, где нет многоярусности.

В среднем инфракрасном диапазоне отчетливо заметен эффект, связанный с окнами поглощения воды, центры которых соответствуют длинам

волн 1,4; 1,9 и 2,7 мкм. Существует еще два окна поглощения воды вблизи 0,9 и 1,1 мкм, но эти окна очень узкие и практически не влияют на кривую спектральной отражательной способности.

Пики спектральной отражательной способности в среднем инфракрасном диапазоне приходятся на 1,6 и 2,2 мкм. Отмечают также сильное влияние влажности: чем меньше влажность листы, тем выше ее отражательная способность.

Из всего вышеописанного можно выделить следующие наиболее важные спектральные характеристики зеленого растительного покрова:

1. Отчетливые различия отражательной способности в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах.
2. Доминирующая роль пигментации листы в видимой части спектра.
3. Доминирующая роль структуры растительности в ближнем инфракрасном диапазоне, где половина излучения пропускается, а половина отражается.
4. Доминирующая роль влажности растительного покрова в среднем инфракрасном диапазоне, где большая часть излучения поглощается листовой.

Почвы

Кривые спектральной отражательной способности большинства почв выглядят весьма просто (рис. 2.10). Наиболее заметным свойством излучения, отраженного от сухих почв, является, как правило, возрастание значений коэффициента отражения с увеличением длины волны, особенно в видимом и близком инфракрасном диапазонах. Взаимодействие излучения с почвой сводится к тому, что падающее излучение либо отражается, либо поглощается. В то же время, почва состоит из пород с разными физически-

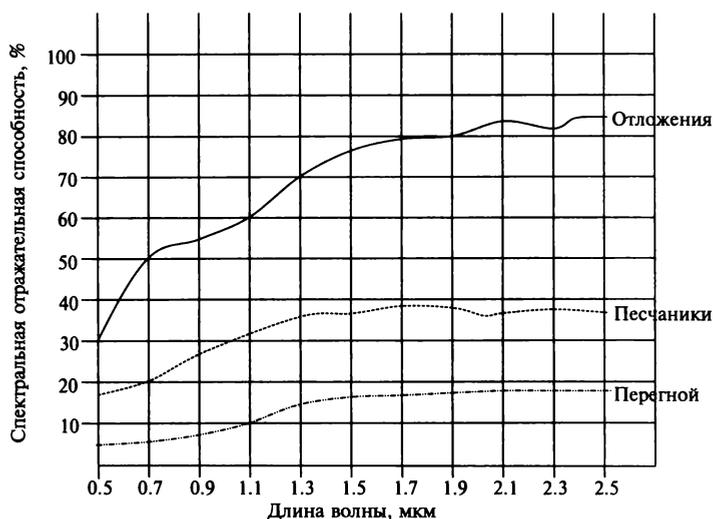


Рис. 2.10. Кривые спектральной отражательной способности некоторых почв

ми и химическими свойствами, которые могут влиять на характеристики отражения и поглощения. Хотя формы кривых спектральной отражательной способности почв схожи между собой, амплитудные характеристики этих кривых могут заметно различаться в зависимости от свойств почвы. На спектральную отражательную способность почвенного покрова могут оказать заметное влияние такие факторы, как влажность, количество органических веществ, окиси железа, относительная доля песчаников и отложений, а также неровность поверхности.

Первая характеристика почвы, требующая изучения, — это ее гранулометрический состав, который определяется относительным содержанием песка, отложений и глины. Характерный диаметр частиц глины — 0,002 мм, отложений — от 0,002 до 0,005 мм, песка — от 0,05 до 2,0 мм. В силу такого распределения глина содержит больше частиц, чем песок. При наличии влаги каждая частица почвы покрыта тонким слоем воды, который занимает некоторое пространство между отдельными частицами. Хотя этот слой очень тонкий, миллионы частиц могут удерживать огромное количество воды. Именно поэтому связь между количеством частиц в почве и ее влажностью имеет такое важное значение.

Типичные кривые спектральной отражательной способности песчаников при различных уровнях содержания влаги показаны на рис. 2.11. Из рисунка видно, что отражательная способность сухих песчаников остается почти постоянной, в то время как кривые спектральной отражательной способности влажных песчаников имеют заметные провалы при длинах волн 1,4; 1,9 и 2,3 мкм. В видимой части спектра также наблюдается

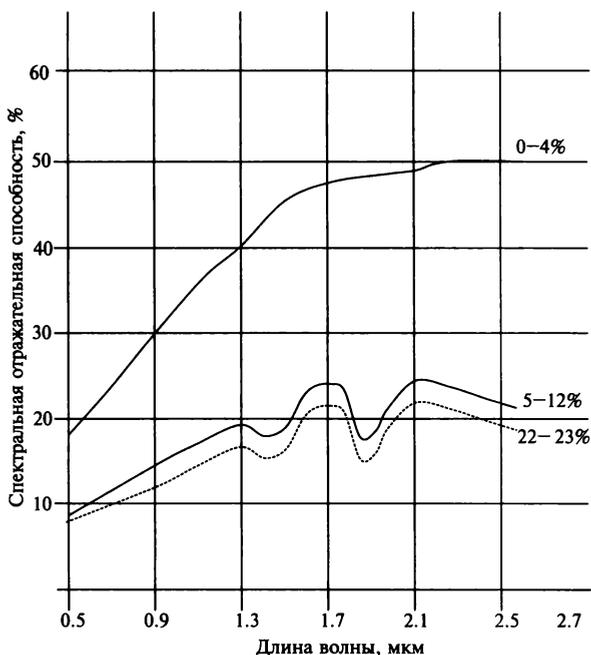


Рис. 2.11. Зависимость спектральной отражательной способности песчаников от уровня влажности

заметное снижение отражательной способности влажных почв по сравнению с сухими. Таким образом, спектральная яркость почв во многом зависит от их состава, определяющего как размер слагающих почву частиц, так и возможный уровень содержания влаги. При прочих равных условиях с уменьшением размера частиц поверхность почвы становится более гладкой, и доля отраженного излучения возрастает. Было показано, что при увеличении размера частиц с 0,22 до 2,66 мм коэффициент поглощения увеличивается на 14%.

Еще одним важным свойством почвы, которое влияет на ее отражательную способность, является содержание органических веществ, которое характеризует количество азота в почве. Показано, что для большинства климатических зон относительное содержание органических веществ в почве колеблется от 0,5 до 5%. При 5%-ном содержании органических веществ почва обычно имеет темно-коричневый или черный цвет, а при меньшем содержании — светло-коричневый или светло-серый. При этом, в видимом диапазоне спектра зависимость отражательной способности почвы от содержания органических веществ является нелинейной.

Замечено, что связь между цветом почвы и содержанием в ней органических веществ зависит от климатической зоны. При высокой температуре почвы с низким содержанием влаги (крупные частицы) содержат больше органических веществ, чем такие же почвы в более холодных зонах. Таким образом, при оценке зависимости спектральной отражательной способности от количества органических веществ необходимо учитывать еще и климатический пояс и условия дренирования.

Спектральная отражательная способность почвы в значительной степени зависит от присутствия в ней оксида железа, который может вызвать существенное снижение отражательной способности, по крайней мере, в видимом диапазоне. Как видно из рис. 2.12, отражательная способность

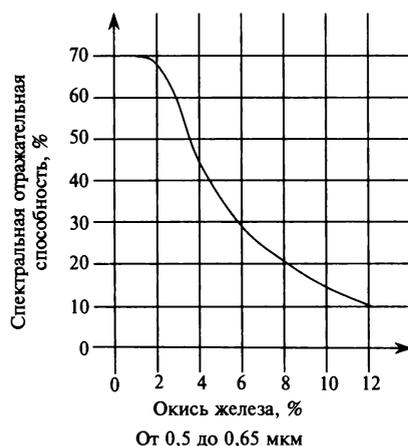


Рис. 2.12. Зависимость спектральной отражательной способности почв от содержания оксида железа

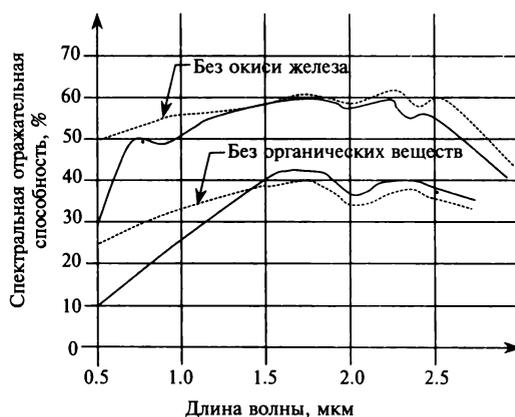


Рис. 2.13. Влияние содержания оксида железа и органических веществ на спектральную отражательную способность почв

почвы в видимом диапазоне почти обратно пропорциональна концентрации оксида железа. Показано, что удаление из почвы этого элемента приводит к заметному увеличению отражательной способности в диапазоне от 0,5 до 1,1 мкм, но мало влияет на отражательную способность при длине волны более 1,1 мкм. Следует отметить, что такой же эффект в тех же спектральных диапазонах наблюдается и при удалении из почвы органических веществ (рис. 2.13).

Из приведенного обсуждения можно сделать следующие выводы о спектральных характеристиках почв:

1. Увеличение влажности почвы ведет к снижению ее отражательной способности во всем спектральном диапазоне отраженного излучения.
2. Отражательная способность грунта увеличивается с уменьшением размера слагающих его частиц.
3. Уменьшение неровности поверхности ведет к увеличению ее отражательной способности.
4. Отражательная способность почвы уменьшается с увеличением содержания в ней органических веществ.

Увеличение содержания оксида железа ведет к снижению отражательной способности.

Водные поверхности

По сравнению с растительными покровами и почвами, отражательная способность водных поверхностей относительно низка. Если растительный покров может отражать до 50% падающего излучения, а почвы — до 30—40%, то доля излучения, отраженного водной поверхностью, не превышает 10%. Вода отражает электромагнитное излучение в видимом и близком инфракрасном диапазонах. При длинах волн больше 1200 мкм все падающее излучение поглощается. Несколько кривых для водных поверхностей различного типа приведены на рис. 2.14, из которого видно, что наибольшей отражательной способностью обладает мутная во-

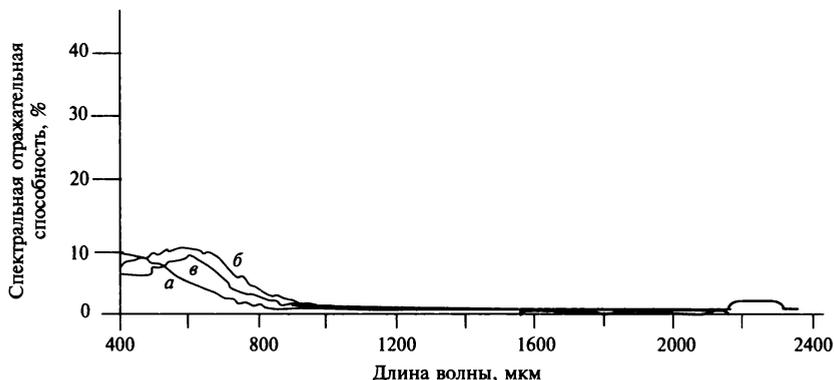


Рис. 2.14. Кривые спектральной отражательной способности водной поверхности

дная поверхность, а пик отражения водоемов с большим количеством растительности, содержащей хлорофилл, приходится на зеленую часть спектра.

Разрешающая способность систем дистанционного зондирования

Пространственная разрешающая способность является одной из важнейших характеристик систем дистанционного зондирования, которая характеризует способность сенсора различать детали в пространственных данных. Пространственное разрешение определяется размером наименьшего объекта, который поддается идентификации. Вообще, разрешающая способность как аналоговых, так и цифровых систем дистанционного зондирования определяется следующими параметрами: а) пространственное разрешение, б) спектральное разрешение, в) радиометрическое разрешение и г) временное разрешение. Понимание этих характеристик чрезвычайно важно для правильного использования данных дистанционного зондирования.

Пространственное разрешение

Пространственное разрешение является аналогом резкости обычного фотоснимка. Пространственное разрешение цифровых снимков, получаемых с помощью электронно-оптических сканирующих систем, определяется размером мгновенного поля обзора — линейной меры угловых величин, измеряемой в мили радианах. Факторами, которые влияют на пространственное разрешение, являются: высота расположения платформы, размер элементов сенсора и фокусное расстояние оптической системы. Для вычисления пространственного разрешения используют следующую формулу [17]:

$$A = H \times B, \quad (2.6)$$

где A — размер проекции элементов сенсора на поверхность в метрах, H — высота расположения платформы в метрах, B — размер мгновенного поля обзора в мили радианах.

Таким образом, разрешающая способность сенсора определяется площадкой на поверхности Земли, соответствующей одной элементарной ячейке сенсора. Снимок имеет *низкое разрешение*, если на нем видны только крупные объекты. На снимках *высокого разрешения* можно различить мелкие детали объектов.

Спектральное разрешение

Спектральное разрешение характеризует способность системы дистанционного зондирования различать определенные интервалы длин волн. Чем выше спектральное разрешение, тем более узкий диапазон длин волн

регистрируется определенным каналом. При оценке спектрального разрешения рассматривают две характеристики: количество диапазонов (каналов) и ширину каждого диапазона. Более высокого спектрального разрешения добиваются за счет увеличения количества диапазонов и уменьшения ширины каждого из них. На практике важно правильно подобрать характеристики спектрального разрешения так, чтобы они соответствовали типу собираемой информации.

Спектральное разрешение панхроматического снимка является крайне низким, поскольку на нем невозможно выделить сигналы с различной длиной волны, и полученное изображение характеризует отражательную способность объекта во всем видимом диапазоне. Более высокое спектральное разрешение цветных снимков объясняется тем, что цветная пленка обладает независимой чувствительностью к излучению в синем, зеленом и красном диапазонах спектра.

Системы дистанционного зондирования, регистрирующие излучение в нескольких независимых спектральных диапазонах, также могут отличаться своей спектральной разрешающей способностью.

Радиометрическое разрешение

Радиометрическое разрешение определяется чувствительностью сенсора к вариациям интенсивности электромагнитного излучения, т. е. наименьшей разницей в уровнях энергии излучения, которую можно зарегистрировать с помощью данной аппаратуры. Эта характеристика указывает на действительное количество полезной информации, содержащейся в изображении. Она применима как к обычным фотографическим, так и к цифровым снимкам. В первом случае радиометрическое разрешение определяется возможностью определения малейших вариаций оттенков серого цвета, а во втором — конечным числом *уровней дискретизации*, на которые делится сигнал при аналогово-цифровом преобразовании.

Временное разрешение

Временное разрешение определяется периодичностью сбора данных. Например, для изучения какого-то природного явления данные могут собираться ежедневно, раз в месяц, раз в три месяца или раз в год. Получение снимков одних и тех же участков земной поверхности с определенной периодичностью является одной из основных областей применения дистанционного зондирования. При этом, от частоты съемки зависит возможность обнаружения тех или иных изменений, которые происходят на изучаемой территории.

Абсолютная временная разрешающая способность системы дистанционного зондирования определяется периодом обращения спутника вокруг Земли, при котором возможна повторная съемка участка земной поверхности под тем же углом обзора. Этот период может составлять несколько суток. Сравнивая снимки объекта, полученные в разное время, можно наблюдать изменения его характеристик.

Пикселы и смешанные пикселы

Снимки, получаемые методами дистанционного зондирования, являются растровыми, т. е. представляют собой матрицу элементов, которые называются *пикселями*. Каждый пиксел на снимке соответствует наименьшему разрешимому элементу земной поверхности. При этом следует понимать, что в отличие от пространственного разрешения, характеризующего сенсор съемочной системы, понятие «пиксел» относится к изображению, которое формируется этим сенсором. Например, если пространственное разрешение сенсора равно 10 м, то в идеальном случае каждому пикселу будет соответствовать участок поверхности размером 10×10 м. Но если изображение уменьшить в четыре раза, то каждому пикселу будет соответствовать участок размером 40×40 м, хотя пространственное разрешение при этом не изменится.

Пикселы можно подразделить на «чистые» и «смешанные». Чистый пиксел содержит только однородную информацию. Если в пикселе содержится разнородная информация, его называют «смешанным». Числовое значение чистого пиксела характеризует усредненное значение яркости близких частей объекта определенного класса. Числовое значение смешанного пиксела может не соответствовать ни одному из классов объектов сцены, поскольку оно является результатом усреднения спектральных откликов объектов разного типа. Иногда это может привести к ошибкам дешифрирования.

Исследования показывают, что количество смешанных пикселов возрастает по мере снижения пространственного разрешения. Вместе с тем, повышение пространственного разрешения за счет увеличения числа пикселов приводит к повышению стоимости цифровых снимков.