ГЛАВА 1

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

1.1. Введение

Дистанционное зондирование (ДЗ) определяют как процесс или метод получения информации об объекте, участке поверхности или явлении путем анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом [13]. Суть метода заключается в интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удаленной от него точке пространства [54]. С помощью дистанционного зондирования изучают физические и химические свойства объектов. Примерами естественных форм ДЗ являются зрение, обоняние и слух человека. К методам дистанционного зондирования относят и фотографическую съемку, существенным ограничением которой является то, что эмульсионный слой фотопленки чувствителен только к излучению в видимой либо близкой к ней части электромагнитного спектра.

Методы ДЗ, обсуждаемые в этой книге, основаны на использовании сенсоров, которые размещаются на космических аппаратах и регистрируют электромагнитное излучение в форматах, существенно более приспособленных для цифровой обработки, и в существенно более широком диа-

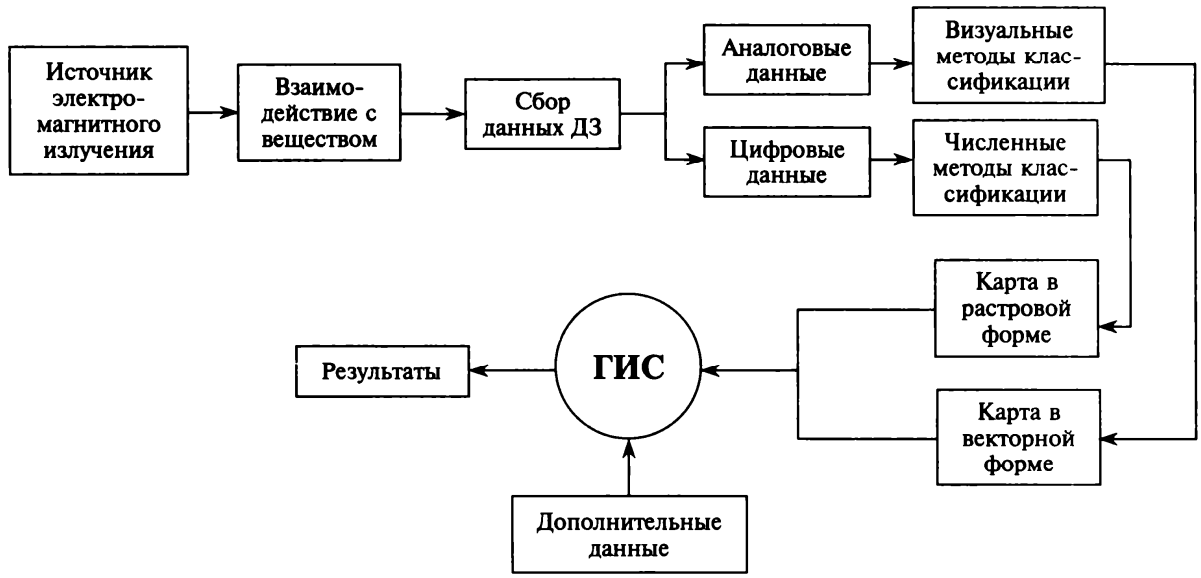

Рис. 1.1. Интеграция данных дистанционного зондирования в ГИС

пазоне электромагнитного спектра. В большинстве методов ДЗ используют инфракрасный диапазон отраженного излучения, тепловой инфракрасный и радиодиапазон электромагнитного спектра.

Процесс сбора данных дистанционного зондирования и их использование в географических информационных системах (ГИС) схематически представлены на рис. 1.1.

1.2. Схема дистанционного зондирования

Идеальная схема дистанционного зондирования показана на рис. 1.2. Ее составляющими являются источник электромагнитного излучения, процесс распространения излучения и его взаимодействие с веществом объекта, ответный сигнал, регистрация данных и предоставление их потребителям [13]. В этой модели источник генерирует электромагнитное излучение с высоким уровнем энергии во всем диапазоне длин волн, причем интенсивность излучения является известной величиной, которая не зависит от длины волны. Излучение не взаимодействует с атмосферой и распространяется через нее без потери энергии. Падающее излучение взаимодействует с веществом объекта, в результате чего возникает отраженное либо собственное вторичное излучение, однородное во всем диапазоне длин волн.

Излучение от объекта попадает на сенсор, который регистрирует пространственную информацию. Идеальный сенсор должен иметь простую и компактную конструкцию и обладать высокой точностью. Кроме того, он должен почти не потреблять энергии для своей работы.

Данные, зарегистрированные сенсором, передаются на наземную станцию, где мгновенно преобразуются в интерпретируемую форму, которая позволяет идентифицировать все части изучаемого объекта по их физическим, химическим и биологическим свойствам. В этом виде

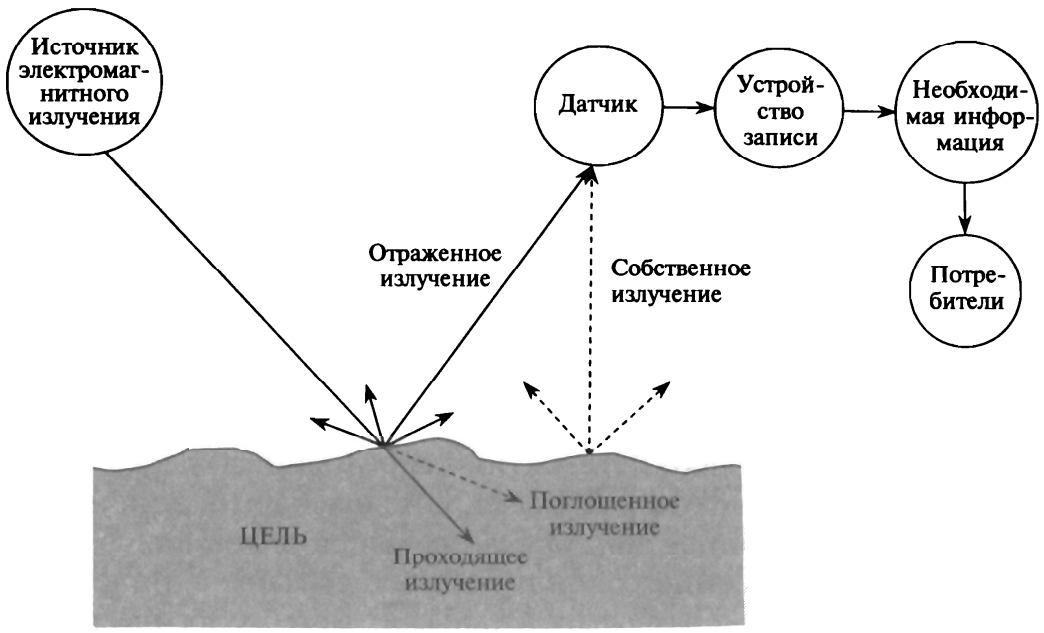

Рис. 1.2. Идеальная схема дистанционного зондирования

данные предоставляются потребителям, которые, тем не менее, должны обладать большим опытом использования материалов ДЗ в своих предметных областях.

Конечно, на практике идеальной системы дистанционного зондирования не существует в силу следующих причин:

1. Ни один источник не способен обеспечить однородность потока излучения как в пространстве, так и во времени.
2. Из-за взаимодействия излучения с газами атмосферы, молекулами водяного пара и атмосферными частицами изменяется интенсивность излучения и его спектр.
3. Одно и то же вещество при разных условиях может иметь разную спектральную чувствительность. В то же время, спектральная чувствительность разных веществ может совпадать.
4. На практике не существует идеального сенсора, с помощью которого можно было бы регистрировать все длины волн электромагнитного спектра.
5. Из-за технических ограничений передача данных и их интерпретация иногда выполняются с задержкой по времени. Формат передаваемых данных также может отличаться от того, который требуется потребителю, и в результате потребитель получает данные в нужном формате лишь спустя некоторое время.
6. Потребители могут не обладать необходимой информацией о параметрах сбора данных ДЗ и не иметь достаточного опыта для их анализа и дешифрирования.

1.3. История развития методов дистанционного зондирования

Понятие дистанционного зондирования появилось в XIX веке вслед за изобретением фотографии, а одной из первых областей, в которых стали применять этот метод, стала астрономия. Впоследствии, дистанционное зондирование начали использовать в военной области для сбора информации о противнике и принятия стратегических решений. Во время Гражданской войны в США фотоснимки, полученные с помощью неуправляемых летательных аппаратов, служили для наблюдения за перемещением войск, подвозом припасов, ходом фортификационных работ и для оценки эффекта артиллерийских обстрелов. В результате исследований, которые финансировались различными государствами, были разработаны технологии, позволившие создать сенсоры сначала для военных целей, а затем и для гражданского применения этого метода. После Второй мировой войны метод дистанционного зондирования стали использовать для наблюдения за окружающей средой и оценки развития территорий, а также в гражданской картографии. В 60-х годах XX века, с появлением космических ракет и спутников, дистанционное зондирование вышло в космос.

Новая эра дистанционного зондирования связана с пилотируемыми космическими полетами, разведывательными, метеорологическими и ресурсными спутниками.

Возможности ДЗ в военной области значительно возросли после 1960 года в результате запуска разведывательных спутников в рамках программ CORONA, ARGON и LANYARD, целью которых было получение фотоснимков с низких орбит. Вскоре были получены стереопары снимков с разрешением 2 метра. Первые спутники работали на орбите от семи до восьми дней, но уже следующие поколения этих аппаратов были способны поставлять данные в течение нескольких месяцев.

В результате осуществления программ пилотируемых полетов, которые были начаты в США в 1961 году, человек впервые высадился на поверхность Луны (1969 г.). Следует отметить программу *Mercury*, в рамках которой были получены снимки Земли, систематический сбор данных дистанционного зондирования во время проекта *Gemini* (1965—1966 гг.), программу *Apollo* (1968—1975 гг.), в ходе которой велось дистанционное зондирование земной поверхности (ДЗЗ) и состоялась высадка человека на Луну, запуск космической станции *Skylab* (1973—1974 гг.), на которой проводились исследования земных ресурсов, полеты космических кораблей многоразового использования, которые начались в 1981 году, а также получение многозональных снимков с разрешением 100 метров в видимом и близком инфракрасном диапазоне с использованием девяти спектральных каналов.

В Советском Союзе, а затем в России космические программы развивались параллельно космическим программам США. Полет Юрия Гагарина 12 апреля 1961 года, ставший первым полетом человека в космос, запуски космических кораблей «Восток» (1961—1963 гг.), «Восход» (1964—1965 гг.) и «Союз», работа на орбите космических станций «Салют» (впервые 19 апреля 1971 года), — это лишь небольшая часть того, что следовало бы упомянуть в этой книге.

Первый метеорологический спутник был запущен в США 1 апреля 1960 года. Он использовался для прогноза погоды, наблюдения за перемещением циклонов и других подобных задач. Первым среди спутников, которые применялись для регулярной съемки больших участков земной поверхности, стал TIROS-1 (*Television and Infrared Observation Satellite*).

Первый специализированный спутник был запущен в 1972 году. Он назывался ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*) и использовался, в основном, для целей сельского хозяйства. В настоящее время спутники этой серии носят название *Landsat*. Они предназначены для регулярной многозональной съемки территорий со средним разрешением. Позже, в 1978 году, был запущен первый спутник со сканирующей системой SEASAT, но он передавал данные всего три месяца. Первый французский спутник серии SPOT, с помощью которого можно было получать стереопары снимков, был выведен на орбиту в 1985 году. Запуск первого индийского спутника дистанционного зондирования, названного IRS (*Indian Remote Sensing*), состоялся в 1988 году. Япония также вывела на орбиту свои спутники JERS и MOS. Начиная с 1975 года, Китай периодически запускал собственные спутники, но полученные ими данные до сих пор находятся в закрытом доступе. Европейский космический консорциум вывел на орбиту свои радарные спутники ERS в 1991 и 1995 годах, а Канада — спутник RADARSAT в 1995 году.

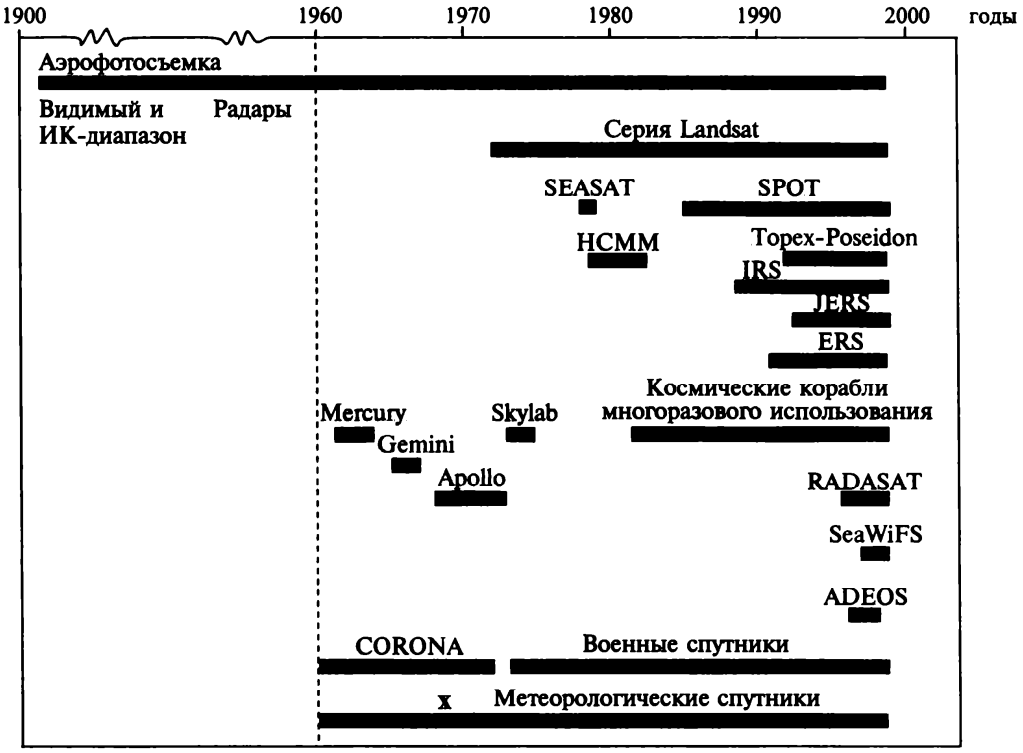

Рис. 1.3. Время работы различных платформ дистанционного зондирования [31]

Интервалы работы различных космических комплексов ДЗ на орбите показаны на рис. 1.3.

1.4. Этапы дистанционного зондирования и анализа данных

Дистанционное зондирование можно рассматривать как составную часть информационной системы. Во многих областях данные ДЗ являются ключевым компонентом в процессе принятия решений. Простая замкнутая схема такого процесса без обратных связей показана на рис. 1.4. Начальная точка, которая одновременно является и конечной точкой всего процесса, — информационные запросы групп специалистов. По существу, потребитель, а точнее, его нужды — это самое главное звено любой системы управления информацией. На схеме представлены различные дисциплины, связанные с Землей и ее ресурсами. Глобус на заднем плане символизирует глобальный масштаб такой системы. Информационные запросы логически связаны с требованиями заказчиков и потребителей продукции к материалам ДЗ.

Оптимальный способ использования данных наблюдения поверхности Земли со спутников заключается в том, чтобы анализировать их совместно с информацией из других источников, — в этом случае они становятся необходимой составляющей процесса принятия решений и моделирования в любой предметной области. Еще один важный принцип дистанционного зондирования — многокомпонентность — реализуется в виде различных методов съемки и анализа данных.

Рис. 1.4. Процесс получения и анализа данных дистанционного зондирования

Стереосъемка. Получение снимков с перекрытием из нескольких последовательных точек орбиты позволяет получить более точное представление о трехмерных объектах и повысить отношение сигнал/шум.

Многозональная съемка. Использование многозональных снимков основано на уникальности тоновых характеристик различных объектов. Объединение яркостных данных из снимков в различных спектральных диапазонах позволяет безошибочно выделять определенные пространственные структуры.

Многовременная съемка. Плановая съемка в заранее определенные даты позволяет выполнять сравнительный анализ снимков тех объектов, характеристики которых изменяются во времени.

Многоуровневая съемка. Съемку с различными уровнями дискретизации используют для получения все более подробной информации об изучаемой территории. Как правило, весь процесс сбора данных подразделяют на три уровня: космическая съемка, аэросъемка и наземные исследования.

Многополяризационная съемка. Снимки, полученные этим методом, используют для проведения границ между объектами на основе различий в поляризационных свойствах отраженного излучения. Так, например, отраженное излучение от водной поверхности обычно более сильно поляризовано, чем отраженное излучение от растительного покрова.

Комбинированный метод. Заключается в использовании многовременной, многозональной и многополяризационной съемки.

Междисциплинарный анализ. Обработку и дешифрирование данных выполняют несколько человек, специализирующихся в разных предметных областях. Это позволяет получить более полную и достоверную информацию о состоянии природных ресурсов. Результаты такого анализа обычно представляют в виде набора тематических карт.

Подавляющее большинство данных дистанционного зондирования имеет географическую привязку. Поскольку такие данные изучают, как правило, во взаимосвязи друг с другом, для каждодневной работы и принятия решений необходимо иметь эффективное средство манипулирования данными. Таким автоматизированным средством является географическая информационная система — инструмент единого подхода к управлению и обработке пространственной информации, включая и материалы дистанционного зондирования.

1.5. Преимущества и недостатки данных дистанционного зондирования

Данные спутниковой съемки содержат полезную информацию, полученную в различных спектральных диапазонах, и, кроме того, сохраняются в цифровом виде. Поскольку космические снимки охватывают большие области, их можно использовать для тематических региональных исследований и идентификации крупных пространственных объектов, в частности, структур рельефа. Регулярная съемка территорий позволяет проводить мониторинг водных ресурсов, агротехнического состояния сельскохозяйственных культур, эродированности почв, развития инфраструктуры городов и других процессов, объектов и явлений, которые изменяются под воздействием природных и антропогенных факторов. С помощью космической съемки достаточно просто получить данные о труднодоступных областях. Еще одним преимуществом ДЗ является возможность получения снимков разного разрешения, что позволяет применять данные ДЗ для решения различных задач в разных предметных областях. Поскольку анализ материалов ДЗ выполняется камерально, требуется меньше полевых исследований, что окупает затраты на приобретение данных. Экономически эффективным является и применение космических снимков для оперативного обновления средне- и мелкомасштабных карт. Цветные изображения, формируемые на основе данных ДЗ в трех спектральных каналах, несут больше информации, чем отдельные наземные или аэрофотоснимки, а стереопары снимков дают возможность проводить трехмерный анализ пространственных объектов. И, наконец, цифровой формат материалов ДЗ и использование компьютеров для их обработки и анализа обеспечивают быстрое получение результатов.

Помимо преимуществ у данных дистанционного зондирования есть, конечно же, и недостатки. Для их обработки и анализа требуются очень высокая квалификация и большой практический опыт. Использование таких данных становится экономически неэффективным при единичных исследованиях небольших территорий. Космические снимки нельзя использовать для создания планов в инженерных целях. Программное обеспечение, которое применяется для обработки цифровых снимков, также имеет высокую стоимость. Кроме того, если результаты дешифрирования материалов ДЗ не подтверждены полевыми исследованиями, к ним надо относиться с большой осторожностью.

1.6. Области применения данных дистанционного зондирования

Области применения космических снимков можно разделить на пять общих категорий:

1. Использование снимка в качестве простейшей карты или, точнее, основы, на которую можно наносить данные из других источников в отсутствие более точных карт, отображающих современную обстановку.
2. Определение пространственных границ и структуры объектов для определения их размеров и измерения соответствующих площадей. При этом очень важно предварительно провести геометрическую коррекцию снимка.
3. Инвентаризация пространственных объектов на определенной территории.
4. Оценка состояния территории.
5. Количественная оценка некоторых свойств земной поверхности.

Дистанционное зондирование является перспективным методом формирования баз данных, пространственное, спектральное и временное разрешение которых будет достаточным для решения задач рационального использования природных ресурсов. Ресурсы Земли не бесконечны, и поскольку их эксплуатация увеличивается по мере роста количества и уровня жизни населения, все более насущной становится задача их разумного и бережливого использования. В этом отношении дистанционное зондирование является эффективным методом инвентаризации природных ресурсов и мониторинга их состояния.

Поскольку дистанционное зондирование позволяет получать информацию о любых областях Земли, включая поверхность морей и океанов, сферы применения этого метода действительно безграничны. Сельское и лесное хозяйство, география, геология, археология, метеорология и климатология, исследования морской среды, оценка состояния и использования водных ресурсов — вот неполный перечень сфер применения данных ДЗ.

Основой для эксплуатации природных ресурсов служит анализ информации о землепользовании и состоянии земных покровов. Помимо сбора такой информации дистанционное зондирование используют также для изучения таких природных катастроф, как землетрясения, наводнения, оползни и оседания почвы. Краткая сводка областей применения данных ДЗ представлена в табл. 1.1.

Табл. 1.1. Некоторые области применения данных дистанционного зондирования

Сельское и лесное хозяйство	Землепользование	Геология	Водные ресурсы	Океанография	Изучение окружающей среды
Определение типов растительности	Классификация землепользования	Определение типа горной породы	Картографирование границ водных поверхностей	Исследование живых организмов	Мониторинг мест разработки месторождений

Табл. 1.1. Некоторые области применения данных дистанционного зондирования *(продолжение)*

Сельское и лесное хозяйство	Землепользование	Геология	Водные ресурсы	Океанография	Изучение окружающей среды
Прогноз урожайности и контроль состояния посевов	Картографирование и обновление карт	Картографирование основных геологических структур	Картографирование мест затопления	Исследование течений и мутности воды	Картографирование и мониторинг загрязнения водной среды
Инвентаризация лесов	Оценка пригодности земель	Обновление геологических карт	Определение границ и толщины снежного покрова	Картографирование изменений береговой линии	Мониторинг загрязнения воздушной среды
Оценка состояния пастбищ и определение растительной биомассы	Разделение городских и сельских территорий	Определение границ рыхлых отложений	Гляциология	Картографирование рельефа мелководного шельфа	Определение последствий природных катастроф
Исследование состояния растительного покрова	Региональное планирование	Картографирование вулканических интрузий	Изучение «цветения воды», переноса и осаждения наносов	Слежение за ледовой обстановкой	Мониторинг антропогенного влияния на окружающую среду
Определение нагрузки на растительный покров	Эксплуатация транспортных сетей	Картографирование новейших вулканогенных отложений	Инвентаризация озер	Изучение волн и океанических вихрей	
Определение состояния почвенного покрова	Картографирование границ водных объектов	Картографирование форм рельефа	Определение границ ирригационных полей		
Определение состава почв		Выявление региональных структур			
Оценка распространения лесных пожаров		Выявление линеаментов			

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

2.1. 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.

2.2. 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

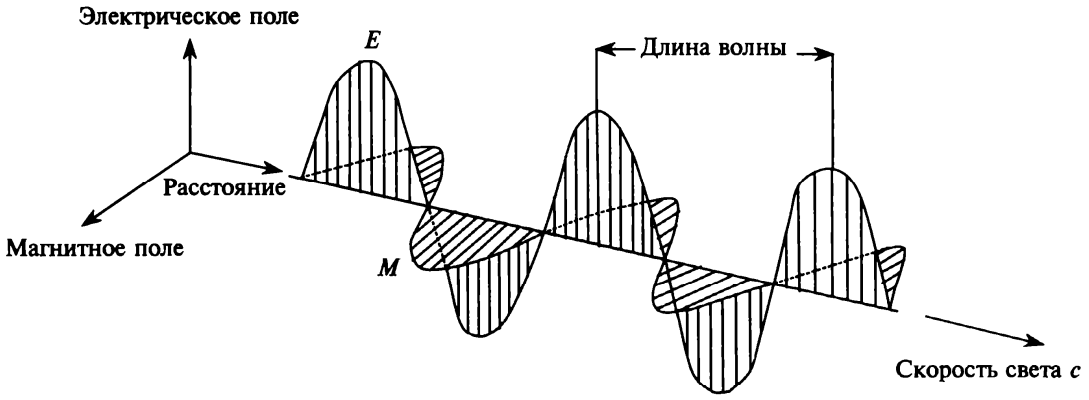

Рис. 2.1. Волновая модель электромагнитного излучения

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:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \tag{2.1}$$

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

$$Q = h\frac{c}{\lambda}, \tag{2.2}$$

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 K), является источником электромагнитного излучения, поскольку его молекулы находятся в возбужденном состоянии, которое отличается от состояния пол-