

Academy of Sciences of the USSR

Commission of natural resources studies  
by space means

'Section «Geology from space»

## SPACE INFORMATION FOR GEOLOGY

---

**Космическая информация в геологии / Коллектив авторов. М.: «Наука», 1983. 536 с.**

Коллективная монография обобщает результаты исследований, выполненных институтами Академии наук СССР, академий наук союзных республик и рядом других организаций в области разработки методики применения аэрокосмической информации в геологии, использования ее в исследованиях новейших и современных геологических процессов, линеаментов и кольцевых структур, металлогении и размещения рудных месторождений в рудных районах, при изучении и прогнозировании нефтегазоносных районов. Изложены общая методология исследований, методы инструментального дешифрирования изображений и количественной обработки информации, результаты региональных структурно-геологических и прогнозно-поисковых работ, выявленные геологические закономерности и практические рекомендации.

Табл. 9, ил. 188, библиогр.: с. 506—526 (729 назв.)

Редакционная коллегия:

академик *А. В. Пейве* (главный редактор),  
академик *А. В. Сидоренко* (главный редактор),  
академик *А. Л. Яншин* (главный редактор),  
*В. И. Макаров, В. М. Моралев, Ю. Г. Сафонов,*  
*В. Г. Трифонов, П. Ф. Флоренский*

Ответственные редакторы:

*В. Г. Трифонов, В. И. Макаров, Ю. Г. Сафонов, П. В. Флоренский*

Editorial Board:

Academician *A. V. Peive* (Editor-in-Chief),  
Academician *A. V. Sidorenko* (Editor-in-Chief),  
Academician *A. L. Yanschin* (Editor-in-Chief),  
*V. I. Makarov, V. M. Moraleov, Yu. G. Safonov,*  
*V. G. Trifonov, P. V. Florensky*

Responsible editors:

*V. G. Trifonov, V. I. Makarov, Yu. G. Safonov, P. V. Florensky*

от ее разрешающей способности выполняет роль фильтра для структурных элементов различных рангов. При этом ухудшение разрешающей способности аэрокосмических снимков дает информацию о структурных элементах все более низкого ранга. Это обстоятельство является причиной принципиальной невозможности получения информации о структурных элементах низкого ранга путем монтажа и уменьшения снимков с высокой разрешающей способностью.

Необходимо строго различать реальные объекты и их дистанционные изображения. Такой подход предполагает, что на стадии собственно дешифрирования выделяются лишь классы дистанционных изображений (линеаменты, блоки и т. д.). Вопрос же о соответствии того или иного изображения конкретному классу реальных объектов решается количественно (например, путем использования методики, содержащейся в настоящей главе).

Результаты дешифрирования дистанционных материалов (т. е. данные о классах изображений) могут быть непосредственно включены в прогнозные программы распознавания образов. Таким образом, дистанционное зондирование должно основываться на математических методах, и в первую очередь на методах распознавания образов.

## **МЕТОДИКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Количество аэрокосмических изображений после вывода на орбиты автоматических станций «Метеор» и «Ландсэт», пилотируемых орбитальных станций «Скайлаб» и «Салют» возросло настолько, что даже выбор оптимального для решения поставленной задачи аэрокосмического изображения требует значительных затрат времени, не говоря уже о самом процессе получения с этого изображения необходимой геологической информации.

Повысить эффективность использования аэрокосмической информации в геологии можно только при условии создания автоматизированных комплексов сбора и обработки аэрокосмической информации, т. е. комплексов, которые могли бы получать и хранить информацию о поверхности Земли, доставляемую с помощью дистанционных средств, проводить с ней ряд преобразований, необходимых для корреляции данных дистанционного зондирования с данными, полученными наземными средствами наблюдения, и выдавать результаты этих преобразований в виде информации, необходимой для решения поставленной геологической задачи [Афанасьев, Теосьев, 1976; Геологическое..., 1978; Методические..., 1979; Космическая..., 1979].

В настоящее время достаточно успешно решаются проблемы сбора, хранения и тиражирования информации, например, ГосНИИЦИПРОм в нашей стране и центром в Сью-Фолсе в США. Первый из них обрабатывает данные, поступающие с автоматических станций серии «Метеор», второй — серии «Ландсэт». Кроме того, в принципе решены, совершенствуются и внедряются в практику машинные способы координатной привязки и трансформирования аэрокосмических изображений в картографические проекции, а также автоматизированные методы составления по данным космических съемок топографических фотокарт [Космическая..., 1975; Космическая..., 1979].

Наибольшую сложность среди проблем автоматизированного дешифрирования аэрокосмических изображений представляет рассматриваемая ниже проблема автоматизации в целях геологического дешифрирования.

Под инструментальным дешифрированием аэрокосмических изображений понимают выделение и распознавание фотообразов искомых объектов с помощью любых инструментов или приборов, облегчающих или обеспечивающих проведение этих операций. Соответственно методика инструментального дешифрирования есть методика выделения и распознавания на аэрокосмических изображениях заданных фотообразов с помощью любых инструментов или приборов. Ее конечная цель — автоматизация процесса дешифрирования.

Базу всякого дешифрирования, его первую часть, образуют основы техники воспроизведения образов реальных объектов (техника получения и тиражирования снимков), основы фотограмметрии, т. е. оптико-геометрических измерений параметров изображе-

ния, и, наконец, приобретающие в последнее время все большее значение основы теорий математической статистики и информации. Вторая часть теоретических основ дешифрирования базируется на знании процессов взаимодействия атмосферы, гидросферы и биосферы с поверхностью и корой Земли, в результате которых формируется внешний, ландшафтный, или физиономический, вид земной поверхности, копию которого и представляет собой изображение [Богомолов, 1976]. Эта часть основ дешифрирования и представляет главное затруднение при автоматизации.

Из этих двух основных частей складывается общая теория дешифрирования, которая в наиболее полном виде используется при так называемом общем, или комплексном, топографическом дешифрировании. Основные моменты общей теории дешифрирования образуют ядро методик специального или отраслевого дешифрирования. Последние различаются предметным, целенаправленным видением одного и того же объекта изображения поверхности Земли как копии существующей системы природных объектов. Отраслевые методики могут расчленяться на более частные, специфические. Например, в методике геологического дешифрирования могут быть выделены методы изучения глубинного строения территорий с помощью аэрокосмических изображений (табл. 1).

Физико-математические основы дешифрирования, а также специфические особенности отраслевых видов дешифрирования, в том числе и геологического, изложены в многочисленной учебной и специальной литературе, где имеются описания приборов, используемых при разных видах камеральных работ с аэрофотоснимками и в меньшей мере с изображениями Земли из космоса [Богомолов, 1976; Петрусевиц, 1962; Аэрометоды..., 1971; Космическая..., 1975; и др.].

Дешифрирование аэрокосмических изображений опирается на более чем полувековой опыт дешифрирования аэрофотоснимков, на сформулированные при этом теоретические основы и аппаратные разработки. Значительный вклад в общую теорию дешифрирования был внесен практическим использованием аэрокосмических изображений в различных отраслях науки и народного хозяйства. Изображения Земли из космоса позволили подойти к дешифрированию как к процессу построения моделей изображения, а само изображение представить не в виде суммы объектов, запечатленных на снимке, а в виде копии системы объектов, взаимосвязи и структура которой обуславливают фотообраз каждого из объектов. Из последних складывается сложная интегральная система взаимообусловленных фотообразов аэрокосмического изображения — копия реальной ситуации на поверхности Земли [Афанасьев, Теосьев, 1976; Космическая..., 1979].

Космическое изображение в этом случае можно рассматривать как некоторую ограниченную односвязанную область ( $D$ ) на плоскости. Если на этой плоскости задать некоторую систему координат, допустим Декартову, то для любой точки  $(x, y) \in D$  справедливо выражение

$$|x| + |y| \leq M, \quad (3.1)$$

где  $M$  — некоторое ограничивающее положительное значение. Кроме того,  $D$  является измеримым в смысле Жордана множеством.

Предположим, что область представляет собой некоторый прямоугольник и является замкнутой, т. е. содержит свое замыкание:

$$X_1 \leq x \leq X_2, \quad Y_1 \leq y \leq Y_2.$$

В этой ограниченной области черно-белое изображение можно представить как действительную функцию поля оптической плотности  $F(x, y)$  в точке  $(x, y) \in D$ , удовлетворяющую условиям

$$0 \leq F(x, y) \leq K, \quad (3.2)$$

где  $K > 0$  для любой точки  $(x, y) \in D$ , и

$$F(x, y) \in C^{-1}, \quad (3.3)$$

т. е. классу кусочно-непрерывных функций в области  $D$ . Точки разрыва функции  $F(x, y)$  образуют многосвязанное подмножество для  $D$ , измеряемое по Жордану, с общей плоской мерой «нуль». Отмеченные условия определяются в основном физико-химическими процессами формирования фотоизображения.

Оптическая плотность космических снимков, используемая при автоматизированной обработке, в силу ограниченной разрешающей способности измерительных приборов,

Носитель	Высота съемки	Тип аппаратуры	Диапазоны, мкм	Полоса обзора, км	Пространственное разрешение, м	Приближенные значения абсолютной информативности (бит) для изображения 18 x 18 см
Метеор 1-17	670	Т - кадровая с видеооконом	0,35-0,76	1000-1400	1250	$3 \cdot 10^7$
Метеор-18	670	Сканер малого разрешения	0,7-0,8 0,8-1,0	3000		
Метеор-28	670	Сканер малого разрешения	0,5-0,6 0,6-0,7	3000	750	
		Сканер среднего разрешения	0,7-0,8 0,8-1,0 8-12	3000 9600-17000	350	
Ландсэт-1, 2, 3	500-1000	Мультиспектральная Т-камера, использующая видеокон с обратным лучом Оптико-электронный сканер	0,475-0,575	185	40	$1 \cdot 10^9$
			0,580-0,680			
			0,690-0,830			
			0,5-0,6 0,6-0,7 0,7-0,8 0,8-1,1			
			7 спектральных диапазонов			
Ландсэт (проектируемая)		Т - кадровая сканер			30	
Союз-12	260	ЛКСА-3	0,58-0,66 0,68-0,47 0,54-0,64 0,43-0,80 0,82-1,00	150	20-300	$1 \cdot 10^{10}$
Союз-22	260	МКФ-6	0,46-0,50 0,52-0,56 0,58-0,62 0,64-0,68 0,70-0,74 0,78-0,88	160	20-90	$7,2 \cdot 10^9$

а также техники получения сканерных изображений представляет собой квантованное изображение, и функция  $F(x, y)$  является ступенчатой. Кроме того, предел квантования  $\epsilon$  и топологические искажения по площади  $\delta$  приводят к тому, что  $F(x, y)$  представляет собой копию  $\epsilon$ - $\delta$  неотличимую от реального изображения.

Следуя А Розенфельду [1972], можно говорить, что функция  $F(x, y)$  и  $G(x, y)$   $\epsilon$ - $\delta$  неотличимы в области  $D$ , если для всех  $(x, y) \in D$ , за исключением подмножества меры, меньшей  $\delta$ , при  $\epsilon > 0, \delta > 0$  выполняется условие

$$|F(x, y) - G(x, y)| < \epsilon. \tag{3.4}$$

В настоящее время эвристическое дешифрирование аэрокосмических изображений специалистом-дешифровщиком является преобладающим способом получения информации как в комплексном, топографическом дешифрировании, так и в специальных, отраслевых его видах. Автоматизированное выделение и распознавание фотообразов находятся на стадии экспериментальных разработок технических устройств, методов и алгоритмов, направленных на решение частных задач, в основном на облегчение выделения фотообраза специалистом-дешифровщиком. Известные успехи имеются при решении некоторых задач геологического картирования, изучения глубинного строения территорий и структурно-литологического прогноза полезных ископаемых [Геологическое..., 1978; Тезисы..., 1978; Космическая..., 1979].

Действия специалиста-дешифровщика можно разбить на ряд операций, которые образуют три следующих главных цикла:

1) общий анализ изображений, выделение гомологических участков изображения и наиболее характерных фотообразов. Последние имеют, как правило, относительно априорный, т. е. независимый от опыта дешифрирования данного снимка, но зависящий от ранее полученного опыта (квалификации), характер; эти фотообразы помогают дешифровщику оценить ситуацию и наметить программу дешифрирования;

2) выделение фотообразов; на этой стадии действия дешифровщика направлены

на получение необходимой информации — топографической, геологической и т. п.; при этом он стремится максимально использовать фотообразы тех объектов, которые ему известны; по аналогии выделяются образы других, подобных известным или же существенно отличных объектов, которые требуют для своего распознавания дополнительной, не содержащейся в памяти исследователя информации;

3) классификация фотообразов по внешним признакам и опознание их внутри выделенных классов; на этой стадии дешифровщик сравнивает фотообразы с другой информацией о них, как об образах реальных объектов, — картами, таблицами, описаниями и пр — и строит вероятностную модель, выполняющую функцию изображения, — схему дешифрирования. На ней реальные объекты, составляющие предмет исследования, и их фотообразы заменены условными обозначениями, которые позволяют специалисту, знакомому с принятой системой обозначений, определить класс объекта и получить о нем возможный объем стандартной информации, относящейся ко всем объектам данного класса

Л. Е. Смирнов [1975] выделяет три различные ситуации перед дешифрированием: 1) адекватного осмысливания, когда дешифровщик не располагает никакой информацией об объекте; 2) узнавания в условиях выбора, когда дешифровщик знает объекты по описаниям, личному опыту, но не знаком с их фотообразами, 3) узнавания известного объекта, когда дешифровщик знает объект и его фотообраз по личному опыту.

Первая ситуация возможна лишь теоретически, так как жизненный опыт любого человека, а тем более специалиста будет играть роль предпрограммы дешифрирования. Иначе говоря, процесс дешифрирования в этой ситуации сведется ко второй — вероятностной ситуации. Третья ситуация также тождественна второй, но здесь личный опыт дешифровщика позволяет ему ограничить выбор эталона в пределах определенной группы или класса объектов. Поскольку природные объекты в большинстве своем единичны, их фотообразы будут отличаться друг от друга, сохраняя для тождественных объектов общие черты. Эти общие признаки и позволяют опытному специалисту быстро и с большой долей вероятности отнести тот или иной фотообраз к определенному классу природных объектов.

Таким образом, дешифрирование аэрокосмических изображений является вероятностным процессом, т. е. процессом построения модели реальной ситуации по ее копии (изображению). Для оценки истинности или правильности полученной модели (схемы дешифрирования) камеральное дешифрирование всегда дополняется полевым дешифрированием или проверкой результата, особенно в тех местах, где предполагается наименьшая вероятность достоверности<sup>1</sup> дешифрирования изображения.

При дешифрировании специалистом совершается разумная работа, которая «всегда предполагает сбор необходимого количества информации (или непосредственно после того, как задана проблема, или заранее, в виде программы) и достаточно эффективную ее обработку, которая обеспечивает подходящий отбор, т. е. достижение заданной цели» [Эшби, 1979, с. 43].

В табл. 2 приведены данные упрощенного подсчета абсолютной информации, содержащейся в разного вида изображениях. На современных фотоснимках Земли из космоса, сделанных, например, камерой МКФ-6, число двоичных единиц информации колеблется от  $1 \cdot 10^8$  до  $1 \cdot 10^{10}$  бит. Примерно такой же объем информации содержат и изображения, которые получают с помощью сканеров высокого разрешения [Чесноков, Ведешин, 1975]. Технические характеристики бортовой съемочной аппаратуры приведены в табл. 3 и 4. Получение нефотографических изображений сканерными и телевизионными системами имеет тенденцию к повышению разрешающей способности аппаратуры и приближению ее по разрешению на местности к фотографическим системам. Однако специалисты НАСА считают, что полученные в настоящее время с «Ландсэт-3» изображения с информативностью примерно на два порядка ниже, чем у фотографических снимков того же масштаба, удовлетворительны для решения большинства природо-ведческих задач, в том числе геологических, и что увеличение их информативности несколько преждевременно.

Количество информации, которое обрабатывает дешифровщик, в первую очередь ограничивается возможностями зрения. Как установлено в результате многих опытов,

<sup>1</sup> Под достоверностью дешифрирования понимает отношение правильно распознанных объектов к числу всех выделенных на изображении фотообразов. Она равна единице, если все выделяемые на фотоизображении образы отождествляются с соответствующими им природными объектами непосредственно на местности. При камеральном дешифрировании достоверность всегда будет меньше единицы [Богомолов, 1976]

Приближенное значение информативности для фотоизображений размером  $180 \times 180$  мм (по Л. А. Богомолу [1976], с дополнениями)

Разрешение на пленке, лин/мм	Информативность			
	2	5	10	15
8	$8,5 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^7$
12	$1,9 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^7$
16	$3,0 \cdot 10^8$	$6,0 \cdot 10^8$	$9,0 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^9$
56	$1,7 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^9$	$5,1 \cdot 10^9$	$7,2 \cdot 10^9$
160	$3,2 \cdot 10^{10}$	$6,4 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{11}$

Примечание Информативность  $I = n \lg m$ , где  $n$  и  $m$  — соответственно, числа дискретных точек и тоновых контрастов

Таблица 3

Некоторые характеристики автоматических камер для аэро- и космических съемок

Камера	Объектив	Фокусное расстояние, мм	Размер кадра, мм	Разрешение, лин/мм		Количество синхронных кадров
				в центре	по краю	
АФА-39М	Уран-27	100	70×80	44	10	1
ЛКСА-3	Индустар-80	43,6	24×32	35		9
МКФ-6	Цейс	125	55×80	160—60		6

человеческий глаз способен различать пять пар линий на миллиметре [Космическая..., 1975]. В табл. 5 приведены некоторые данные о возможностях различения деталей на аэрофотоснимках. Увеличение порога зрительного разрешения достигается применением приборов типа стереоскопов, интерпретоскопов и других, посредством которых исходное изображение увеличивается в несколько раз. Применение цветной спектрозональной съемки также увеличивает зрительное восприятие информации со снимков (табл. 6), так как глаз воспринимает цветовых контрастов около 100, тогда как черно-белых — около 20 [Богомолу, 1976].

Большинство фотограмметрических приборов основано на принципе изменения зрительного восприятия масштаба аэрофотоснимков, т. е. повышения информативности изображения за счет увеличения зрительного порога восприятия. При этом, однако, уменьшается общая информативность изображения, так как при увеличении изображения ограничивается общее поле обзора, что связано со свойствами применяемых для этих целей объективов. Длиннофокусные объективы дают большое увеличение при малом угле зрения, тогда как короткофокусные — малое при большом угле зрения. Основанные на этих принципах универсальные фотограмметрические приборы, которые позволяют одновременно осуществлять и механический перенос данных дешифрирования на топографические или другие карты, в целом повышают относительную вероятность достоверности дешифрирования при наиболее полном использовании общей информативности снимков. Но достигается это путем ограничения поля зрения дешифровщика, сосредоточением его внимания на деталях некоторого участка изображения и последовательным рассмотрением таких участков.

Работы по дешифрированию изображений Земли из космоса редко проводятся с использованием сложных, так называемых прецезионных стереофотограмметрических приборов типа компараторов «Сантони» или «Топокарт», что связано в первую очередь с масштабами изображений, не позволяющими для многих территорий, кроме высокогорных, получать эффективные стереомодели местности. Поэтому дешифрируются, как правило, лишь отдельные, одиночные изображения. Увеличение зрительного восприятия информации с космического изображения достигается в этих случаях применением простейших увеличивающих изображение приборов, а также рядом специальных приемов, основанных на сознательном ограничении принимаемого со снимка сообщения, т. е. на выделении некоторых деталей изображения при снижении проработки остальных деталей, сглаживании контрастов между ними. Обычно для этих целей используются приемы фотохимической обработки [Геологическое..., 1978], методы фотографической и оптико-механической фильтрации изображений [Комаров и др., 1976]. Кроме того, применяются различные способы оптико-электронных преобразований исходного

## Некоторые характеристики бортовой съемочной аппаратуры

Носитель	Высота съемки, км	Тип аппаратуры	Диапазон, мкм	Полоса обзора, км	Пространственное разрешение, м	Приближенные значения абсолютной информативности для изображения 18 × 18 см, бит
«Метеор-1-17»	670	TV-кадровая с видеоконом	0,35—0,76	1000—1400	1250	3 · 10 <sup>7</sup>
«Метеор-25»	670	Сканер малого разрешения	0,7—0,8 0,8—1,0	3000		
«Метеор-27»	670	Сканер малого разрешения	0,5—0,6 0,6—0,7	3000	750	3 · 10 <sup>7</sup>
		Сканер среднего разрешения	0,7—0,8 0,8—1,0 8—12	3000	350	
«Ландсэт-1»	500—1000	Мультиспектральная TV-камера, использующая видеокон с обратным лучом	0,475—0,575 0,580—0,680 0,690—0,830	185	9600—17000 90—250	
«Ландсэт-2»	500—1000	Оптико-электронный сканер	0,5—0,6 0,6—0,7 0,7—0,8 0,8—1,1		76 40	1 · 10 <sup>9</sup>
«Ландсэт-3» «Ландсэт-Стереосайб» (проект)	500—1000	TV-кадровая, сканер	Семь спектральных диапазонов		15—30	
«Союз-12»	260	ЛКСА-3	0,58—0,66 0,68—0,47 0,54—0,64 0,43—0,80 0,82—1,00	150	100	1 · 10 <sup>10</sup>
«Союз-22»	260	МКФ-6	0,46—0,50	160	20—40	7,2 · 10 <sup>9</sup>
			0,52—0,56			
			0,58—0,62			
			0,64—0,68			
			0,70—0,74			
0,78—0,88	80					

Влияние размытости и контрастности изображения на величину наименьшей различимой детали аэрофотоснимка (по Л. А. Богомолову [1976])

Ширина полосы размытости изображения, мм	Контрастность					
	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
0,03	0,10	0,13	0,15	0,20	0,23	0,35
0,05	0,18	0,20	0,25	0,32	0,40	0,55
0,07	0,25	0,28	0,35	0,45	0,55	0,78

Таблица 6

Характеристики некоторых видов аэрофотопленок (по Ю. С. Точельникову [1974])

Тип пленки	Зона эффективной спектральной чувствительности, нм	Общая светочувствительность, ед ГОСТа	Средний коэффициент контрастности	Разрешение, лин/мм
Изопанхром Т-18 И-740-3	510—700	100	2,0—3,0	250
	640—760	300—400	1,6—2,6	68
Цветная ЦН-3	400—480	80	0,8—1,2	58
	500—580			
	600—680			
Спектрозональная СН-23	670—800	200	1,5—2,0	68—72
	580—680			
	500—600			
СН-2М	670—800	200—300	1,7—2,6	58
	510—670			

изображения с помощью ЭВМ или аналоговых устройств типа МСП-4 [Тезисы..., 1978; Космическая..., 1979]. Таким образом, при дешифрировании аэрокосмических изображений дешифровщик сознательно или неосознанно стремится ограничить объем воспринимаемого им сообщения, которое содержится в изображении. Ограничение объема информации получается вследствие несовершенства технических устройств и зрения человека.

В целом аэрокосмическое изображение, используемый для его дешифрирования комплекс данных, полученных независимыми методами, и мозг дешифровщика представляют собой единую систему информационной обработки.

Обычный фотографический снимок Земли из космоса размером 200×200 мм при разрешении 30 лин/мм и 64 фиксируемых при вводе в ЭВМ уровнях оптической плотности содержит  $1,8 \cdot 10^9$  бит информации, а при 60 лин/мм — более  $10^{15}$  бит [Методические..., 1979]. Обработка таких объемов информации представляет существенные трудности даже для современных ЭВМ. Человек, приступая к работе с аэрокосмическим изображением, во-первых, располагает значительным объемом информации, имеющей характер предпрограммирования [Эшби, 1979], во-вторых, он действует в соответствии с заранее намеченной целью и имеет программу ее достижения. Из всего объема информации он отбирает только то ее количество, которое способен осмыслить. Совершая отбор информации и ее обработку, направленную на достижение конечной цели — составление схемы дешифрирования, дешифровщик приводит в систему не только воспринимаемое с аэрокосмического изображения сообщение, но и те данные, которыми он располагает для проверки объективности полученных результатов. Эти данные — картографические материалы, описания местности и т. п. — также налагают определенные ограничения на воспринимаемую со снимков информацию. Суть ограничений заключается в том, что наибольшая достоверность дешифрирования достигается при подтверждении полученных результатов другими данными, в свою очередь тем более достоверными, чем лучше они согласуются между собой. Следовательно, если дешифровщик располагает, например, минимальным объемом информации о глубинном строении территории и максимальным — о ее поверхностной структуре, то, анализируя изображение при изучении тектонической структуры района, он вынужден будет привести в соответствие между собой разные количества информации, ограничиваясь наиболее слабым звеном

в этой информационной цепи, т. е. данными о глубинном строении, с которыми он и будет коррелировать полученные результаты.

Таким образом, аэрокосмическое изображение, как копия системы объектов на поверхности Земли, и данные других независимых методов исследования, также характеризующих с разных сторон совокупность объектов на поверхности и в недрах Земли, представляют собой информационную систему, передающую сообщения об исследуемом регионе, которое перерабатывает дешифровщик. В зависимости от поставленной задачи сведения, получаемые дешифровщиком, интерпретируются в пространстве, определяя взаимодействие объектов, или во времени, определяя историю развития данного региона.

В отличие от большинства принимаемых в кибернетике детерминистских моделей с однозначными связями между элементами системы в моделях геологических ситуаций, получаемых как при дешифрировании, так и при наземных методах наблюдений, взаимосвязи объектов неоднозначны, многовариантны и, следовательно, имеют вероятностный характер (см. гл. 2). Поэтому действия дешифровщика, в сущности, направлены на построение вероятностной модели реальной ситуации по ее копии (изображению). Эти действия осуществляются по аналогии с ранее встреченными ситуациями и поэтому могут быть названы построением модели по аналогии.

Задачи инструментального дешифрирования должны программироваться прежде всего с позиции наиболее эффективного достижения поставленных целей, как промежуточных, так и конечных, а также с позиции их скорейшей и наибольшей практической реализации. Последнее целиком зависит от технических возможностей решения поставленных задач и от их наибольшей экономичности. Автоматизация инструментальных методов дешифрирования, таким образом, зависит от простоты достижения искомых результатов. Применение приборов, простейших и универсальных [Аэрометоды..., 1971; Космическая..., 1975], позволяет облегчить процесс дешифрирования, повысить достоверность получаемых результатов, но не решает проблему в целом, так как человек уступает в быстродействии автоматам. При автоматизации любого процесса «нельзя сохранить его традиционную структуру, ее нужно изменить так, чтобы свести получаемую информацию к минимуму» [Дюкрот, 1974, с. 87]. В принципе это было сделано нами [Геологическое..., 1978] и многими другими исследователями [Космическая..., 1975; Космическая..., 1979; Методические..., 1979; Тезисы..., 1978].

Выше говорилось, что дешифрирование состоит, во-первых, в выделении фотообразов объекта (включая и его распознавание в пределах заданного класса объектов) и, во-вторых, в распознавании фотообраза или в его отождествлении с объектом в пределах заданного класса, иначе говоря — в сопоставлении фотообразов с независимо полученными данными.

Простейший подход к распознаванию образов заключается в сопоставлении распознаваемых объектов с эталонами. Однако в этом случае трудно выбрать эталон подходящего класса объектов и установить критерии соответствия. Наиболее существенные затруднения возникают в том случае, когда фотообразы, относящиеся к одному классу, имеют искажения вследствие индивидуальных различий, т. е. при дешифрировании природных (не антропогенных) объектов.

Более совершенным представляется подход, связанный с классификацией образов на основе замеров некоторого множества признаков, описывающих объект и его фотообраз. Эти признаки должны быть инвариантными или малочувствительными по отношению к типичным искажениям и обладать небольшой избыточностью. При таком подходе задача распознавания фотообразов распадается на две части. В первой рассматривается вопрос о том, что нужно измерять и каково должно быть количество признаков<sup>1</sup>, достаточно полно описывающих фотообраз (копию) и сам объект. Решение этой задачи представляется достаточно субъективным и зависящим от практических возможностей (наличия аппаратуры, качества изображения, его масштаба, стоимости работ и т. п.). При этом следует учитывать то, что подбор множества признаков и их упорядочение в известной мере влияют на точность распознавания [Фу, 1965]. Во второй части проводится собственно классификация. На основании измерений выбранных признаков принимается решение о принадлежности образа к тому или иному классу.

<sup>1</sup> Под признаками объекта понимаются данные, полученные не только непосредственно с изображения или другими дистанционными методами, но и в результате различных наземных исследований.

Если входной образ описан  $N$  признаками, то это множество признаков можно рассматривать как выбор замеров признаков ( $A$ ):

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_i \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

где  $a_i$  является  $i$ -м замером.

Задача классификации представляет собой распределение всех векторов или точек в признаковом пространстве по соответствующим классам фотообразов. Такое распределение можно рассматривать как разбиение  $N$ -мерного пространства признаков на взаимно пересекающиеся области (классы) с помощью разделяющей функции.

Пусть  $V_1, V_2, \dots, V_k$  описывают  $k$  возможных классов. Согласно (3.5), разделяющая функция  $R_j(a)$ , относящаяся к классу образов  $V_j$  ( $j=1\dots k$ ), должна быть меньше, чем  $R_i(a)$ , принадлежащая к классу  $V_i$ . Полагая  $A \sim V_i$ , можно записать

$$R_i(a) > R_j(a), \quad i, j = 1, \dots, k; \quad i \neq j. \quad (3.6)$$

В этом случае границу разбиения между классами  $V_i$  и  $V_j$  можно выразить уравнением

$$R_i(a) - R_j(a) = 0. \quad (3.7)$$

Существует множество форм для границы разбиения, удовлетворяющих условию (3.6). В литературе рассмотрены линейные, кусочно-линейные, полиномиальные и другие разделяющие функции [Вальд, 1960; Айзерман и др., 1967; Eden, 1961].

Признаки, описывающие распознаваемые фотообразы, как правило, осложнены помехами и претерпевают большие изменения. В этом случае  $z_1, z_2, \dots, z_N$  можно рассматривать как случайные величины, и тогда  $z_i$  представляет собой измерение  $i$ -го признака с учетом помех; правило классификации, которое учитывает риск неверного распознавания и оптимизирует поиск, называется байесовским. Подробно использование байесовского классификатора рассмотрено в гл. 2.

Использование подобных систем классификации предполагает, что все  $N$  признаков участвовали в поиске одновременно, т. е. объем выборки фиксирован. Это приводит к тому, что при недостаточном объеме данных может быть получено недостоверное решение, а излишек признаков значительно удорожит стоимость поиска. Поэтому целесообразно, видимо, использовать последовательную решающую процедуру [Фу, 1977], особенно тогда, когда чрезмерно высока стоимость выполнения измерений.

В простом случае, когда существуют два класса, можно применить последовательный критерий отношений вероятностей [Вальд, 1960]. На некотором  $n$ -м шаге он будет определяться соотношением

$$\lambda_n = \frac{P_n(A/\omega_1)}{P_n(A/\omega_2)}, \quad (3.8)$$

где  $P_n(A/\omega_i)$  при  $i=1,2$  —  $n$ -мерная функция условной плотности вероятностей для  $\omega_i$ -го класса. При сравнении  $\lambda_n$  с останавливающими границами  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  принимается решение  $A \sim \omega_1$ , если  $\lambda_n \geq \Gamma_1$ , или  $A \sim \omega_2$ , если  $\lambda_n \leq \Gamma_2$ . Если  $\Gamma_2 \lambda_n < \Gamma_1$ , процесс поиска должен быть продолжен для  $(n+1)$ -го шага. Останавливающие границы зависят от вероятности ложного распознавания:

$$\Gamma_1 = \frac{1 - l_{21}}{l_{12}}, \quad \Gamma_2 = \frac{l_{21}}{1 - l_{12}}, \quad (3.9)$$

где  $l_{ij}$  при  $i, j = 1, 2$  — вероятность принятия гипотезы  $A \sim \omega_i$ , когда истиной является положение  $A \sim \omega_j$ . Область неопределенности отвечает условиям, когда не может быть принята ни одна из гипотез. Поэтому при последовательной классификации останавливающие границы изменяются с числом замеров признаков  $n$ . Ширина неопределенной области пропорциональна дисперсии и обратно пропорциональна рядности средних.

Когда число классов больше двух, используется обобщенный последовательный критерий отношения вероятностей [Reed, 1960]. После  $n$ -го шага отношение вероятностей определяется как

$$V_n(A/\omega_i) = \frac{P_n(A/\omega_i)}{\left[ \prod_{q=1}^m P_n(A/\omega_q) \right]^{1/m}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.10)$$

Величина  $V_n(A/\omega_i)$  сравнивается с  $\Gamma_1(\omega_i)$  для  $i$ -го класса, и решение состоит в исключении класса образов  $\omega_i$  из дальнейшего рассмотрения (т. е. считают, что  $A$  не принадлежит к классу  $\omega_i$ ), если

$$V_n(A/\omega_i) < \Gamma_1(\omega_i), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.11)$$

Останавливающая граница определяется соотношением

$$\Gamma_1(\omega_i) = \frac{1 - l_i}{\left[ \prod_{q=1}^m (1 - l_{i,q}) \right]^{1/m}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.12)$$

После исключения класса  $\omega_i$  общее число классов уменьшается на единицу. Исключение проводится до тех пор, пока не останется один класс, который относится к опознанному.

Такая процедура классификации может дать неудовлетворительные решения, когда она требует очень большого числа измерений признаков или когда среднее число измерений велико по сравнению с выбранным  $l_{ij}$ . Для получения удовлетворительного решения проводят обычно усечение естественного процесса. В процедуре усечения полагают, что если процесс достигает  $n_k$ -го шага, то входной образ принадлежит к тому классу, для которого обобщенное последовательное отношение вероятностей  $V_n(A/\omega_i)$  имеет наибольшее значение. Весь процесс, таким образом, заканчивается не более чем за  $n_k$  шагов.

Во время работы системы распознавания приобретается новая информация, необходимая для принятия решения, что улучшает систему. Следовательно, процесс распознавания проходит с самообучением.

При последовательной классификации если все останавливающие границы  $\Gamma(\omega_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  не увеличиваются после выполнения каждого измерения признаков, то вероятность ошибок будет уменьшаться с ростом числа измеренных признаков [Фу, 1977]. Таким образом, решая уравнения (3.10) и (3.12) и правильно устанавливая на их основе определяющие границы, можно управлять вероятностью ошибочного распознавания и средним числом испытаний.

Решение задачи распознавания образов можно еще более упростить, если сосредоточить главное внимание на изучении только морфологии объектов (фотообразов) и их контуров как границ раздела. На границе всегда будут сконцентрированы основные противоречивые свойства контактирующих объектов, поскольку граница одновременно принадлежит и тому и другому объекту, но в то же время не является ни тем, ни другим. «Контур несет основную информацию об объекте. Контурный элемент менее вероятен, потому что с ним связан больший объем информации. Не все точки контура информационно равноценны. Большее количество информации связано с теми точками, где изменения направления контура происходят быстрее» [Attneave, 1954, p. 184]. Задача автоматического выделения контура, его поиска и очистки от шумов решена в настоящее время теоретически и практически [Тезисы..., 1978]. Частный случай решения этой задачи представляет автоматический поиск линейных элементов [Геологическое..., 1978].

Все геологические тела в картографической проекции или на изображении могут быть представлены в виде двух больших групп плоских фигур — линейных или площадных (см. гл. 2). Первые условно будут отличаться от вторых длиной на два порядка больше ширины. Среди вторых обособятся брахиформные (изометричные) тела, у которых ширина будет соизмерима с их длиной, и полосовые тела, длина которых будет значительно превышать ширину. Распознавание таких образов по геометрическим или топологическим признакам не вызывает принципиальных затруднений [Космическая..., 1979]. Значительную сложность будет представлять отождествление выделенных образов, проверка их достоверности как геологических объектов.

Аэрокосмическое изображение участка поверхности Земли содержит суммарную

информацию о системе взаимодействующих природных объектов, расположенных на ее поверхности и в толще земной коры, о состоянии атмосферы в момент съемки и о состоянии самой съемочной аппаратуры в тот же момент. Пределы стабильности работы аппаратуры определяются техническим заданием на ее изготовление и существующими стандартами и постоянны, одинаковы для данного вида аппаратуры. Поэтому их можно (и нужно) не учитывать при решении задач дешифрирования. Передаточная функция атмосферы для электромагнитных волн в разных диапазонах известна плохо; пока приходится пренебрегать ею. Характеристика почвенно-растительного покрова в значительной мере зависит от климата региона и, что наиболее существенно при решении геологических задач, от строения геологического субстрата, его структуры и вещественного состава [Фридман, Глазовская, 1979].

Таким образом, аэрокосмическое изображение содержит сообщения в основном о системе геологических объектов определенного участка земной коры. Все без исключения геологические тела развиваются унаследованно и взаимосвязанно, следовательно, и аэрокосмическое изображение должно отразить эту закономерность в виде пространственно взаимосвязанных элементов изображения как копии взаимодействующих объектов на поверхности Земли. Последовательно расшифровывая эти взаимосвязи, разделяя их на существенные (приоритетные) или второстепенные в зависимости от решаемого класса задач, можно с помощью аэрокосмического изображения получить геологическую информацию не только о геологических телах на поверхности Земли, но и о строении ее коры на разных глубинах [Геологическое..., 1978]. Но поскольку построение различных по содержанию карт и схем дешифрирования является пока процессом в значительной мере интуитивным, процессом построения модели по аналогии, то, чем меньше вероятность соответствия истине каждой из моделей, тем больший набор таких моделей необходимо прокоррелировать друг с другом, чтобы повысить достоверность получаемых результатов.

В настоящее время существуют различные методы числовой и аналоговой обработки аэрокосмической информации (см. табл. 1). Взаимодополняя друг друга, эти методы позволяют решать практически любые корректно поставленные геологические задачи. Аналоговые методы в силу объективных особенностей получения геологических данных можно использовать при решении большого круга вопросов геологии, и они могут предшествовать решению числовыми методами, указывая перспективные направления последнего.

Аэрокосмические изображения представляют собой информационные системы, которые отражают состояние системы геологических объектов в момент съемки. Дешифрирование аэрокосмических изображений является поэтому исследованием системы геологических объектов по ее копии. Исследование систем предполагает программно-целевой подход к их изучению, всесторонний анализ связей и структуры системы, выделение приоритетных связей и их изучение. Системный подход не допускает произвольного обособления объектов системы, отрыв их друг от друга. Действия дешифровщика — это моделирование получаемой им информации по аналогии или с его действиями в сходной ситуации, или с моделями, полученными независимыми методами. Результат действия — схема дешифрирования представляет собой модель копии (изображения) реально существующей ситуации на поверхности Земли в момент съемки, которая является одновременно отражением и геологической ситуации данного региона. Моделирование последней является конечной целью при геологическом дешифрировании. Определение истинности полученной модели может быть проведено только соотношением ее с реальной ситуацией или с моделями, полученными другими, независимыми от данной копии методами.

Простейший способ автоматизированного выделения фотообразов — фотометрирование изображения, т. е. разделение его по оптической плотности, являющейся функцией интенсивности поступившего на светочувствительный слой электромагнитного сигнала. Фотометрирование может осуществляться дискретно, с интервалом, ограниченным только техническими возможностями оборудования. Поскольку связь между спектральными характеристиками различных геологических объектов и их копий на аэрокосмическом изображении однозначно не установлена, должна обязательно проводиться корреляция выделенных фотометрированием образов с образами объектов того же класса, но полученными другими независимыми методами, т. е. комплексная проверка истинности модели.

В общих чертах задача сводится к корреляции между собой приведенных к единой плоскости данных, полученных независимо друг от друга, — геологических, гео-

физических и геохимических карт различного содержания — с результатами фотометрирования трансформированного в картографическую проекцию аэрокосмического изображения. Иными словами — к решению не составляющей принципиальных затруднений топологической задачи.

Инструментальные методы дешифрирования аэрокосмических изображений должны развиваться в перспективе автоматизации процесса дешифрирования, процесса построения моделей. Автоматы, являясь функциональной моделью дешифровщика, должны быть просты и эффективны. Автоматизация процессов дешифрирования позволит на качественно ином уровне рассмотреть некоторые геологические процессы и дать их количественную и качественную характеристику.

## КОРРЕЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ И ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Изучение глубоко погруженных горизонтов осадочного чехла и фундамента различных территорий является в первую очередь задачей нефтяной геологии, поскольку нефть и газ пока единственные полезные ископаемые, добываемые с глубин более 1 км. Поэтому естественно, что именно в нефтяной геологии разработаны и продолжают совершенствоваться методы геофизического изучения недр, которые дополняются пока немногочисленными данными глубокого бурения. В то же время одним из эффективных методов изучения глубинного строения разных областей является дешифрирование космических изображений поверхности Земли. Обширный комплекс геологических задач, решаемых с помощью этого метода, требует привлечения большого объема геолого-геофизической информации.

Визуальное сопоставление космических изображений, несущих разнообразную информацию, с геологическими и особенно геофизическими данными, которые в настоящее время успешно интерпретируются, открывает новые возможности для оценки перспектив нефтегазоносности новых геологических регионов. Тем не менее визуальное сопоставление большого объема информации трудоемко, вносит элемент субъективности и порой просто физически невыполнимо. Поэтому наиболее целесообразна разработка комплекса программ, объединенных в системе совместной обработки космической, геофизической и геологической информации на ЭВМ. В настоящей главе рассмотрены этапы такой обработки и методика интерпретации полученных результатов на примере двух районов — Нижнего Поволжья и Средней Азии. Эти районы представляют интерес не только с геологической точки зрения, но и как полигоны для разработки методики комплексной обработки и интерпретации космических изображений.

Цель работы — оценка информативности изображения участка Земли из космоса для изучения глубинной структуры древних и молодых платформ, поиск критериев сопоставления космической, геологической и геоморфологической информации.

В процессе исследования были использованы телевизионные и сканерные изображения районов, полученные с 18-го и 25-го советских автоматических спутников «Метеор» (разрешение около 1,2 км) и с более ранних спутников этой серии (разрешение 0,8—1 км), а также среднемасштабные фотографии, сделанные с орбитальной станции «Салют-4» и с космического корабля «Союз-22» (разрешение 0,1—0,2 км). Кроме того, использовались сканерные изображения со спутников «Ландсэт-1» и «Ландсэт-2» (разрешение около 0,1 км). Космические данные сопоставлялись с геологической, геоморфологической и геофизической информацией, представленной в виде геологических, структурных и геоморфологических карт, сейсмических профилей, гравитационных и магнитных карт, а также с результатами бурения.

При работе с космическими снимками возникает необходимость корреляции дешифровочных свойств снимков. Способы преобразования снимков различны. Это, например, деление изображения по степени оптической плотности. В этом случае обработанное изображение может быть представлено в виде изолиний плотности (эквиденсит).

# О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение (А. В. Пейве, В. Г. Трифонов, А. Л. Яншин) . . . . . 3

## Часть первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ . . . . . 7

Глава 1. Методология и методические основы геологического дешифрирования космических снимков (В. И. Макаров) . . . . . 7

Глава 2. Использование математических методов в дистанционном зондировании для решения геологических задач (В. К. Кучай, Д. Н. Чучадаев) . . . . . 14

Глава 3. Методика инструментального дешифрирования аэрокосмических изображений (С. Ф. Скобелев, А. С. Петренко) . . . . . 20

Глава 4. Корреляция космической и геолого-геофизической информации (А. С. Петренко, П. В. Флоренский) . . . . . 31

Глава 5. Структурно-геологические исследования и геологическое картирование с помощью материалов космических съемок . . . . . 45

Принципы составления космотектонических и космофотогеологических карт (В. А. Буш) . . . . . 45

Проблемы улучшения традиционных геологических карт (С. С. Шульц мл.) . . . . . 50

Применение мнгозональных космических снимков при структурно-геологических исследованиях (С. Ф. Скобелев) . . . . . 52

Выявление и картирование массивов плутонических пород и их петрохимическая диагностика (С. С. Шульц мл.) . . . . . 58

Металлогеническое значение структурно-геологической интерпретации космических снимков на примере Алтая (В. Д. Баранов, М. И. Диденко) . . . . . 64

Структурно-геологическое изучение горно-складчатых областей (С. Ф. Скобелев, И. И. Войтович, В. Н. Смирнов, С. В. Левашова) . . . . . 68

Глава 6. Методические основы, особенности и перспективы использования специальных видов дистанционной съемки . . . . . 76

Тепловая съемка (В. И. Лялько, М. М. Митник, с дополнениями Л. Д. Вульфсона) . . . . . 76

Радиолокационная съемка (А. В. Доливо-Добровольский) . . . . . 90

Спектротрирование горных пород (Н. Кацков, Х. Спиридонов, М. Червенышка) . . . . . 98

Лидарная спектрометрическая съемка (В. И. Лялько) . . . . . 101

Глава 7. Комплексное применение дистанционных методов при геологических исследованиях (В. Г. Трифонов) . . . . . 105

## Часть вторая

ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ И НОВЕЙШИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ . . . . . 108

Глава 8. Современные и новейшие эндогенные процессы . . . . . 108

Молодая тектоника и прогноз землетрясений (В. Г. Трифонов, В. И. Макаров) . . . . . 108

Соотношения между механизмами очагов землетрясений и проявлениями сейсмических зон на космических снимках (И. В. Ананьин) . . . . . 117

Современные вулканические явления и структуры (Н. А. Гусев) . . . . . 122