КОСМИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ В ГЕОЛОГИИ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОМИССИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Секция «Космическая геология»

КОСМИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ В ГЕОЛОГИИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» Москва 1963 by space means

Academy of Sciences of the USSR Commission of natural resources studies

'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 децифрирования 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. Sajonov, P. V. Florensky

 $\mathsf{K} = \frac{1904010000-604}{042(02)\cdot83} = 185-83-\mathsf{IV}$

🕲 Издательство «Наука», 1983 г.

введение

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981— 1985 годы и на период до 1990 года», принятых XXVI съездом КПСС, подчеркивается необходимость направить усилия научных организаций на «дальнейшее изучение и освоение космического пространства в интересах развития науки, техники и народного хозяйства; изучение строения, состава и эволюции Земли... с целью рационального использования ресурсов, совершенствования методов прогнозирования ... явлений природы»¹. Именно на стыке двух указанных направлений возникла проблема применения данных, получаемых с помощью космических средств, для решения геологических задач: исследования строения земной коры, прогноза и поиска ее сырьевых энергетических ресурсов и прогноза стихийных геологических явлений. Методике и важнейшим результатам разработки этой проблемы посвящена предлагаемая коллективная монография.

Первые космические изображения Земли получил в 1962 г. Г. С. Титов. Вскоре они нашли широкое применение в геологии. Это было закономерно, ибо предопределялось тем подходом к геологическим процессам, который утвердился к 60-м годам нашего столетия на основе идей В. И. Вернадского, К. Э. Циолковского, А. Л. Чижевского и заключается в изучении взаимосвязей геологических явлений и структур на фоне развития Земли как планеты. Материалы космических съемок и измерений оказались мощным новым инструментом таких исследований.

Современная геологическая наука и практика используют данные широкого комплекса аэрокосмических съемок и измерений в разных диапазонах спектра: у-съемку, съемки и измерения в видимой и ближней инфракрасной областях, тепловом (ИК) диапазоне и области сверхвысоких радиочастот (СВЧ), радиолокацию, а также данные дистанционной гравиметрии и магнитометрии. Но главным источником используемой в геологии аэрокосмической информации были и остаются материалы съемок в видимой и ближней инфракрасной частях спектра.

Общие принципы геологического дешифрования и интерпретации космических изображений Земли и возможные области их применения охарактеризованы в ряде обобщающих статей и монографий [Исследования..., 1972; Сидоренко, 1973; Трифонов и др., 1973; Космическая..., 1975; Виноградов, 1976; Кац и др., 1976; Хаин и др., 1976; Геологическое..., 1978; Еремин и др., 1978; Брюханов и др., 1979]. Многие конкретные вопросы методики применения космических изображений для решения тех или иных геологических задач рассмотрены в серии специальных и региональных статей [Артамонов и др., 1971; Башилова и др., 1972, 1973; Богородский и др., 1973, 1978; Еремин, Кац, 1973; Макаров, 1973, 1980; Рябухин 1973; Сахатов и др., 1973; Скарятин, 1973; Трифонов, 1973, 1976а, б; Флоренский, 1973; Абросимов и др., 1974; Астахов, Ероменко, 1974; Макаров и др., 1974; Макаров, Трифонов, Щукин, 1974; Макаров, Соловьева, 1975, 1976; Сонин, Трофимов, 1975; Ананьин, Трифонов, 1976; Доливо-Добровольский, Стрельников, 1976; Иванова, Трифонов, 1976; Кац, Копп, 1976; Копп, Расцветаев, 1976; Кочнева, Томсон, 1976; Рябухин и др., 1976; Соловьева и др., 1976; Трофимов, Кац, Сонин, 1976; Флоренский и др., 1976; Шульц, 1975, 1976, 1977; Брюханов, 1977; Кац и др., 1978; Махин и др., 1978; Комаров, Можаев, 1980; Трифонов и др., 1980; Щеглов и др., 1980]. Указанные публикации не исчерпывают всего опыта работ по рассматриваемой проблеме

¹ Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981, с. 146-147.

в СССР, но и они свидетельствуют о широком фронте исследований и больших достижениях в этой области.

Исторически, по опыту использования аэрофотоснимков, космическая информация прежде всего стала применяться при структурно-геологических исследованиях, тектоническом и геологическом картировании. С помощью космических снимков уточняются протяженность и строение зон крупных разломов, разрывно-складчатых нарушений и деформаций, их соотношения друг с другом и прочими элементами структуры. Новым шагом в картировании литолого-стратиграфических комплексов горных пород, четвертичных отложений, вулканических и плутонических формаций, в расшифровке структуры складчатых областей явилось применение материалов многозональных съемок. Использование космических снимков для улучшения и обновления геологических карт, удешевления геологосъемочных работ вылилось в особое направление практической геологаи.

Но космические снимки позволяют не только улучшить существующие карты и уточнять форму известных структур. Анализ снимков заставил обратить внимание на некоторые тектонические образования, которые прежде недооценивались или вовсе не замечались. Появились специальные карты, космотектонические и космогеологические, на которых показаны такие образования. К их числу относятся прежде всего линеаменты и кольцевые, круговые или дуговые структуры.

Сопоставление результатов дешифрирования космических снимков с данными наземных геологических и геофизических исследований показало, что линеаменты далеко не всегда соответствуют наблюдаемым на поверхности разломам земной коры. Как правило, линеаменты представлены на поверхности линейно вытяпутыми формами рельефа, их границами, элементами гидрографической сети, геологически обусловленными зонами почвенного и растительного контраста. Линеаментам соответствуют аномалии структурного рисунка поверхности, структурно-фациальных зон, полосы повышенной однообразно ориентированной трещиноватости и новейших деформаций рельефа. Нередко линеаменты совпадают с зонами повышенной сейсмической активности, аномального поглощения сейсмических волн, гравитационных и магнитных аномалий, а также с границами, разделяющими области с разными сейсмическими скоростными разрезами, различным характером гравитационного и магнитного полей.

Выделяемые на космических снимках кольца, круги, овалы и дуги, подобно линеаментам, отражаются в орогидрографии и других элементах ландшафта. Круговым и овальным образованиям, обычно сравнительно мелким, могут отвечать вулканические, плутонические, вулкано-плутонические комплексы пород, слагающие депрессии, купола и иные структуры с элементами овального, кругового или концентрического строения. Однако часто подобных соотношений не наблюдается, но намечается сходство контуров круга или овала с границами тех или иных неоднородностей строения литосферы, выявляемых геофизическими методами.

Указанные особенности линеаментов и кольцевых образований позволяют рассматривать их как проявления глубинных зон нарушений, деформаций и магматической проницаемости, блоковости и горизонтальной неоднородности земной коры и верхней мантии. Поэтому второе главное направление геологического использования аэрокосмической информации — это изучение глубинной тектоники.

На космических снимках разных масштабов и различной разрешающей способности земная поверхность изображается с разной степенью генерализации. Сопоставление результатов дешифрирования снимков разных масштабов показало, что, как правило, чем хуже разрешение, т. е. выше уровень генерализации, тем более глубинные структуры проявляются на снимке. Чаще всего это структуры новейшие, сохраняющие активность и в настоящее время. Сравнение структуры разной глубины заложения обнаружило во многих областях новейшей тектонической активности дисгармонию, автономность современного строения и развития отдельных слоев и пластии литосферы, что, вероятно, связано с дифференцированностью их неотектонических горизонтальных перемещений.

Поскольку на космических снимках лучше всего выражены именно новейшие структурные элементы, они являются важным источником информации о современных тектонических процессах. Морфологическая диагностика активных структур, выяснение их пространственных соотношений и степени активности на разных глубинах направлены на совершенствование структурно-кинематической модели современной литосферы, модели, без которой невозможно расшифровать тектонику геологического прошлого. Изучение современных процессов преследует и практическую цель совершенствования прогноза стихийных геологических явлений: землетрясений, извержений вулканов, оползней, селей, эрозии и аккумуляции поверхности.

Применение космической информации при структурно-геологических исследованиях, изучении глубинного строения земной коры имеет и еще один важный практический аспект — прогноз и поиски полезных ископаемых. Начинают развиваться прямые методы дистанционного поиска рудных тел и нефтегазовых залежей путем регистрации обусловленных ими геотермальных, геохимических и других ландшафтных индикаторов. Но главной задачей остается совершенствование структурных критериев прогноза и поиска. На мелкомасштабных космических изображениях выделяются и картируются трансрегиональные линеаменты, с которыми связаны металлогенические зоны и нефтегазоносные провинции. Это обстоятельство стимулировало развитие представлений о роли протяженных и глубинных линейных зон длительной активности в локализации и формировании месторождений.

Использование материалов космических съемок при более детальных исследованиях закономерностей размещения рудных и нефтегазовых месторождений имеет ряд особенностей. Так, для нефтяной геологии важна прежде всего дополнительная информация о глубинном строении территории. На платформах они обычно характеризуются унаследованным развитием структур вплоть до новейшего этала. Эта неотектоническая активизация отражается на космических снимках и служит индикатором глубинных структур и нефтегазоносных зон.

Существование рудоконтролирующих структур разных рангов делает весьма важным сопоставление результатов дешифрирования аэрокосмических изображений разных уровней генерализации. При этом пополняются сведения о региональных и локальных разломах, с которыми часто непосредственно связаны месторождения.

Новый импульс получило развитие представлений о скрытых разломах, о тектонической делимости земной коры. Это важно для понимания условий образования рудных месторождений. Для металлогенического анализа существенным оказалось выделение региональных кольцевых структур, обусловленных глубинными магматическими процессами. В локальных кольцевых структурах проявляется специфика развития вулканотектонических структур и гипабиссальных интрузий, контролирующих размещение рудных месторождений.

Успешное применение материалов дистанционных съемок и измерений возможно лишь при комбинации различных методов дистанционного зондирования друг с другом и с наземными методами геологических исследований. Большие объемы аэрокосмической информации, необходимость количественной корреляции результатов ее обработки с разными геологическими, геохимическими и геофизическими данными делают весьма актуальной задачу автоматизации геологического дешифрования и интерпретации материалов дистанционных съемок и измерений на базе широкого применения вычислительной техники.

Перечисленные основные направления применения космической информации в геологии рассматриваются в предлагаемой монографии. Она является результатом творческого содружества многих организаций Академии наук СССР, академий наук союзных республик, а также Мингео СССР, Миннсфтепрома СССР, Мингазпрома СССР, Минвуза СССР и территориальных управлений.

Непосредственными исполнителями и авторами монографии являются Г. И. Волчкова, Н. В. Лукина, В. И. Макаров, С. Ф. Скобелев, В. Г. Трифонов (Геологический институт АН СССР), Е. В. Акимова, И. К. Волчанская, В. И. Завалин, Н. Т. Кочнева, В. С. Кравцов, В. И. Микляев, В. Д. Парфенов, Ю. Г. Сафонов, В. В. Середин, И. Н. Томсон, М. А. Фаворская (Институт геологии рудных меторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР), В. Е. Гоникберг (Институт литосферы АН СССР), И. В. Ананьин (Институт физики Земли АН СССР), В. П. Крючков (Институт геохимии и аналитической химии АН СССР), Д. В. Лопатин (Институт геологии и геохронологии докембрия АН СССР), В. Д. Баранов, М. И. Диденко (Институт минералогии и геохимии редких элементов АН СССР и Мингео СССР), А. А. Логачев, А. С. Нетренко, Ю. А. Романов, А. Н. Шарданов (Институт геологии и разработки горючих ископаемых АН СССР и Миннефтепрома), Г. Ф. Уфимцев (Институт земной коры СО АН СССР), Ф. С. Онухов, В. Н. Ставров, В. В. Юшманов (Институт тектоники и геофизики ДВНЦ АН СССР), Л. А. Гаврилов, С. М. Тащи (Дальневосточный геологический институт ДВНЦ АН СССР), А. П. Кулаков. (Тихоокеанский институт географии ДВНЦ АН СССР), Н. А. Гусев, И. В. Флоренский (Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР), С. В. Левашова, В. Н. Смирнов (Северо-Восточный комплексный научно-

исследовательский институт ДВНЦ АН СССР), Л. Д. Вульфсон, В. И. Лялько, М. М. Митник (Институт геологических наук АН УССР), Я. Н. Белевцев, С. С. Быстревская, Е. А. Зыков, Н. П. Селезнюк (Институт минералогии и физики минералов АН УССР), Р. Г. Горецкий, О. И. Карасев, В. Я. Коженов, Э. А. Левков, А. А. Святогоров (Институт геохимии и геофизики АН БССР), В. М. Аллахвердиев, Н. А. Ащумов, В. Н. Ермолаев (Институт геологии АН АзССР), А. С. Қараханян (Институт геологических наук АН АрмССР), И. И. Войтович (Институт геологии АН КиргССР), В. К. Кучай (Институт геологии АН ТаджССР), О. М. Борисов, В. М. Полтавченко (Институт геологии и геофизики АН УзССР), Х. Спиридонов, М. Червеняшка (Центральная лаборатория космических исследований АН НРБ), Н. Кацков (Мингео НРБ), Г. С. Бурлакова, В. А. Буш, А. В. Доливо-Добровольский, В. А. Козлов, Ю. А. Лион, Б. Я. Пономарев, Н. С. Посошкова, Л. И. Соловьева, В. В. Шарков (ВНПО Аэрогеология Мингео СССР), С. И. Стрельников, С. С. Шульц (Всесоюзный геологический институт Мингео СССР), А. В. Гурьянов (ВНПО Союзнефтегеофизика Мингео СССР), Т. В. Флоренская (Всесоюзный научно-исследовательский нефтяной институт Миннефтепрома), Б. В. Сенин (ВНПО Союзморгео Мингазпрома), С. В. Порошин (Госцентр «Природа» ГУГК СССР), А. И. Гущин, М. Ю. Никитин, В. Д. Скарятин, Д. М. Трофимов (Московский государственный университет), М. А. Кикина, В. К. Флоренский (Московский геологоразведочный институт), В. Г. Варламов, В. И. Гридин, А. Н. Дмитриевский, А. В. Колылов, Е. Л. Курбала, А. Н. Руднев, И. И. Скворцов, П. В. Флоренский (Московский институт нефтехимической и газовой промышленности), А. К. Глух (Мингео УзССР), С. Е. Апрелков, Б. В. Ежов (Камчатское геологическое управление), Д. Н. Чучадеев (Управление геологии ТаджССР), В. В. Боровский, А. Л. Клопов, И. Д. Песковский, Л. Л. Подсосова (ЗапСибВНИГНИ), Г. И. Амурский, М. С. Бондарева, Л. В. Пименова (ВНИИГаз Мингазпрома).

Общая организация и координация работ осуществлялись Геологическим институтом АН СССР через секцию «Космическая геология» Комиссии АН СССР по изучению природных ресурсов с помощью космических средств.

Монография состоит из пяти частей. В первой части рассматриваются общие вопросы методики применения аэрокосмической информации в геологии, вторая посвящена использованию аэрокосмической информации при изучении современных и новейших геологических процессов, третья — анализу и интерпретации отдешифрированных на космических снимках линеаментов и кольцевых образований. В четвертой части обсуждаются результаты применения космической информации при металлогенических исследованиях и изучении закономерностей размещения рудных месторождений, а в пятой — при изучении тектоники платформенных областей, прогнозе и поисках месторождений нефти и газа.

Ответственные редакторы — В. Г. Трифонов (части первая и вторая), В. И. Макаров (часть третья), Ю. Г. Сафонов (часть четвертая) и П. В. Флоренский (часть пятая) — скомпоновали представленные авторами материалы, придав им целевую направленность в рамках единой монографии. Насколько это удалось, предоставляется судить читателям.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Глава 1

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Несмотря на большой опыт использования в геологии космических изображений, еще недостаточно ясны характер геологической информации, заключенной в космических снимках, ее природа и соотношение с информацией, получаемой традиционными наземными методами и аэрометодами. Поэтому разработка и совершенствование методики использования материалов космических съемок и измерений для решения геологических задач в значительной мере определяются уровнем знания общих основ формирования космического изображения и умением определять сущность содержащейся в нем геологической информации.

При изучения Земли из космоса — визуальном или по фотографическим, сканерным и другим изображениям — геологи, географы, гидрологи, специалисты сельского, лесного хозяйства и других отраслей землеведения получают информацию с одного и того же образования — с земной поверхности. Задача специалиста состоит в том, чтобы из сложного интегрального изображения земной поверхности извлечь необходимую часть.

Таким образом, приступая к геологическому дешифрированию космических снимков, необходимо с самого начала иметь совершенно определенное представление о том, чем является земная поверхность как геологическое образование. В самом общем виде ее необходимо рассматривать как результат последовательного наложения структур разного возраста и различной глубины, закономерно преобразованных комплексом экзогенных процессов. В этом определении земная поверхность выступает, во-первых, как историческая категория и, во-первых, как результат взаимодействия литосферы (эндогенных процессов) с гидросферой, атмосферой и биосферой (экзогенными процессами).

С исторической точки зрения в структуре земной поверхности необходимо прежде всего четко разграничивать ее древние и новейшие элементы. Их удельный вес в формировании лика земной поверхности различен. Соответственно различна и информативность космических изображений элементов разного возраста.

Известно, что основные формы современного рельефа континентов, который прежде всего отражен на космических изображениях, определены неотектонической структурой, теми движениями, которые в общем случае начались в олигоцене — раннем миоцене. Характерный размер этих форм таков, что в большинстве своем они хорошо соответствуют обзорности космических снимков. Именно поэтому снимки наиболее информативны в отношении неотектонической структуры, которая проявлена — практически везде — прямыми признаками. Особенно это касается крупных повсеместно развитых складок основания (в понимании Э. Аргана [1935] и С. С. Шульца [1948]) и связанных с ними разрывов.

Того же возраста альпинотивные складки, широко р.К. пространенные в пределах альпийских горно-складчатых поясов и относящиеся к категории складок покрова, относптельно невелики и обычно не образуют крупных самостоятельных форм рельефа. Поэтому они могут дешифрироваться, как правило, лишь на крувномасштабных космических изображениях, а еще лучше — на аэрофотоснимках.

Древние структуры, в различной мере преобразованные более молодыми движениями,

7

выступают в новой композиции и через нее проявлены в тех или иных своих элементах. В зависимости от степени последующих преобразований и принадлежности к той или иной неотектонической области их значение в формировании рельефа поверхности различно. Структура древних складчатых комплексов в пределах молодых, орогенов, например Тянь-Шаня, распознается на материалах дистанционных съемок так же или несколько хуже, чем альнинотипная молодая складчатость. Эта структура определяет лишь некоторые особенности новейших форм и в рельефе проявлена, как правило, мезо- и микроформами. Последние формируют лишь специфику внутреннего рисунка того или иного неотектонического блока. Сами же элементы этого рисунка или формы древних структур на мелкомасштабных космических снимках (типа «Метеор») не диагностируются и могут распознаваться (и то далеко не везде) лишь на более крупномасштабных изображениях, например полученных с пилотируемых орбитальных станций «Салют», с космических кораблей «Союз», с автоматических спутников «Ландсэт».

Значительно лучше древние складчатые комплексы проявлены на изображениях древних массивов платформенного типа (например, щитов), где их рисунок мало переработан более поздними тектоническими процессами и не затушеван глубокими складками (формами) орогенного рельефа. В этих условиях избирательно эродированные и отпрепарированные древние структурные формы и литолого-петрографические комплексы доминируют в рельефе и дешифрируются достаточно хорощо. Крупные разнородные комплексы древнего складчатого или метаморфического основания могут проявиться даже на сравнительно мелкомасштабных изображениях со спутников серии «Метеор».

Второй аспект рассматриваемого вопроса — это взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов. Ему посвящена обширная литература. Многие стороны и результаты этого взаимодействия, по крайней мере в общем виде, аксиоматично ясны, однако, поскольку при анализе и интерпретации материалов дистанционных съемок они приобретают принципиальное значение и требуют особого внимания, подчеркнем некоторые известные положения.

Прежде всего при анализе эндогенной составляющей необходимо иметь в виду, что она складывается из деформаций разного возраста — древних и молодых. Принципиальная схема разреза континентальной земной коры (рис. 1), как и конкретные геолого-геофизические разрезы самых разных областей, приведенные в многочисленных публикациях, свидетельствует о том, что наблюдаемое положение и структуры (рельеф) поверхностей разделов глубинных слоев литосферы наилучшим образом отражены в неотектонической составляющей приповерхностной структуры. Этим определяется и возможность изучения глубинных структур по космическим изображениям. По существу, речь идет об анализе глубинной составляющей неотектонической структуры, хорошо проявленной, как отмечалось выше, на космических снимках.

При этом необходимо, конечно, учитывать, что неотектонические формы могут как иаследовать более древние, так и быть в той или иной мере несотласными с ними, новообразованными или наложенными.

Во всех случаях молодые тектонические процессы деформируют поверхность, а значит, нарушают ранее установившееся равновесное состояние и приводят в действие компенсирующие гравитационные и другие силы и внешние процессы, в конечном счете направленные к выравниванию поверхности. В зависимости от величины связанных с деформацией уклонов поверхности и от климатических условий устанавливается определенный комплекс экзогенных процессов (денудационного и аккумулятивного рядов). Этот комплекс предопределяет развитие тех или иных типов рельефа, особенности структуры и распространения почвенно-растительного покрова, которые, проявляясь на космических изображениях, служат индикаторами новейших тектонических форм самых разных порядков и особенностей развития.

Все древние структуры должны наблюдаться, очевидно, на фоне более молодых, определяя детали их строения и внутренний рисунок. Само расположение древних образований (на поверхности или под покровом осадочных пород) обусловлено развитием более молодых деформаций земной коры (в первом случае сопровождающихся воздыманием поверхности, во втором — ее опусканием) и является их индикатором (см. рис. 1).

Древние структуры определяют пространственное размещение тех или иных литологопетрографических разностей горных пород. Последние, будучи выведенными на поверхность и подвергаясь здесь процессам избирательной денудации, предопределяют особенности рельефа поверхности, структуру почвенно-растительного покрова и некоторые другие детали рисунка земной поверхности.

Z +++3 *V* √ *Y C* − 5 *S 6*

Рас 1. Принципиальный обобщенный разрез земной коры континентов

I — недислоцированные или слабо дислоцированные отложения илатформенных чехлов, 2 — дислоцированные комплексы пород складчатых областей и основания молодых платформ, 3 — гранитво метаморфический слой, 4 — «базальтовый» слой, 5 — верхняя мантия, 6 — разломы

Погребенные древние структуры также могут косвенно проявиться на поверхности, поскольку они воздействуют на поднимающиеся снизу потоки тепла, газов и флюиды и поэтому изменяют, формируют особенную геохимическую структуру поверхности и соответствующий почвенно-растительный покров.

Естественно, что в первом и втором случае характерные размеры и отчетливость контуров и формы проявления элементов древних структур на поверхности и на ее космических изображениях будут существенно различаться. Следовательно, для дешифрирования потребуются различные материалы (в частности, по уровню генерализации) и различные методы.

В целом же можно сделать вывод, что геологические образованя в большинстве своем проявляются на космических снимках через геоморфологические или ландшафтные индикаторы. При этом один и тот же объект или одинаковые по геологическому содержанию объекты, находясь в различных структурно-орографических и климатических условиях, могут иметь достаточно различные проявления на местности и на космических снимках. Многообразие и пространственная изменчивость внешних форм проявления геологических образований неизбежны, они естественны и закономерны. Это, по существу, было сформулировано в свое время В. Дэвисом, который подчеркивал, что все разнообразные формы рельефа не случайны, а закономерно определяются тремя причинами --- геологической структурой, процессом и временем, из которых главной является первая.

Методы дешифрирования и приемы распознавания геологических объектов на космических изображениях весьма разнообразны и определяются многими обстоятельствами или условиями, которые можно подразделить следующим образом.

І. Программно-целевые условия. 1. Объекты исследования: линеаменты, кольцевые образования, разломы, складчатые комплексы, литолого-структурные комплексы, вулканические и интрузивные образования, коры выветривания, зоны гидротермальных измерений и т. д.

2. Цели и задачи исследования: выделение и характеристика сейсмоонасных и аномально напряженных зон, зон повышенной минерализации разных типов, зон глубинных скрытых (погребенных) нарушений, нефтегазоносных структур, областей дисгармоничного развития разноглубинных горизонтов, зон повышенного теплового потока и т. д.; составление и корректировка геологических, тектонических, геоморфологических, геофизических и других карт.

3. Динамичность исследуемого явления, процесса.

П. Общие природные условия местонахождения исследуемых объектов, явлений или процессов. 1. Структурно-геоморфологическая позиция: платформенные коптинентальные равнины (щиты, плиты), горно-складчатые области (впадины, поднятия), мелководье морей, океанов и внутренних водоемов.

2. Ландшафтно-климатические условия: климатическая зона (температура и влажность), характер (тип) и состояние почвенно-растительного покрова.

Ш. Предварительная изученность территории. 1. Хорошо изученные территории (исследование предполагает получение дополнительной информации об известных объектах и их взаимосвязи).

2. Неизученные территории (исследование предполагает получение первоначальных данных и представлений).

IV. Материально-технические условия. 1. Тип и качество обрабатываемых космических изображений: масштаб, территориальный охват (обзорность), спектральный диапазон съемки, время съемки и повторяемость, способ получения (фотографический, телевизионный, сканерный) и т. д. 2. Технические возможности и способы преобразования первичных изображений. Первые три группы условий предопределяют требования к некоторым материалам и технике. Если они пе удовлетворены, задачи исследования не могут быть решены, частично или полностью. Ниже рассматриваются некоторые наиболес важные аспскты методики дешифрирования на примере линеаментов.

Главная задача изучения линеаментов — это выяснение их природы. Для ее решения необходим всесторонний совместный анализ дистанционных материалов и данных, полученных традиционными геологическими, геофизическими, геохимическими и ланд-шафтно-геоморфологическими методами.

Частными являются задачи изучения линеаментов в их отношении к разрывным деформациям земной коры, их кинематической характеристики и возможной связи с напряженными зонами земной коры, возраста линеаментов, глубины их заложения, взаимосвязи линеаментов со структурами магнитного, гравитационного и теплового полей, с зонами повышенной проницаемости и геохимических аномалий и т. д.

; Среди важных общетеоретических и практических задач необходимо выделить геодинамический анализ линеаментов (линеаменты и планетарная трещиноватость; линеаменты, мобилизм и фиксизм), использование линеаментов в структурном прогнозе месторождений полезных ископаемых, в изучении сейсмоактивных зон и т. д.

Для выявления и характеристики сейсмоонасных и аномально напряженных зон необходим весьма широкий комплекс съемок и исследований, в которых наибольшее внимание должно уделяться линеаментам. При дешифрировании важное значение приобретает анализ яркости, морфологии и других особенностей их проявления на изображениях разных масштабов. Ранее на ряде примеров было показано, что активность и форма проявления линеаментов разной глубины заложения на космических изображениях разных масштабов и территориального охвата существенно различаются. Таким образом, сравнение изображений разных масштабов дает дополнительные сведения по крайней мере об активных «линиях» глубинных слоев литосферы, которые часто не соответствуют таковым в приповерхностных структурах и через их посредство не всегда могут изучаться достаточно эффективно [Макаров и др., 1974; Макаров, Трифонов, Щукин, 1974; Макаров, Соловьева, 1975, 1976; Ананьин, Трифонов, 1976; "Макаров, 1977; Геологическое..., 1978].

Дело в том, что дизъюнктивные деформации глубоких слоев литосферы, распространяясь вверх, преобразуются в соответствии со структурами и литолого-петрографическими неоднородностями более высоких слоев и достигают поверхности в виде более или менее широких ореолов разнообразных вторичных форм и других особенностей, генетическая связь которых не всегда очевидна и понятна без определенной генерализации структуры, т. е. без того, что обеспечивает космические съемки. При прочих равных условиях, чем больше глубина заложения деформации, тем в более рассеянном виде она проявлена на поверхности и тем более высокий уровень генерализации требуется для ее выявления. Особенно эффективно использование космических изображений при изучении глубинных подвижных зон или разломов скрытого типа в равнинных областях с широким развитием осадочного чехла

Для распознавания нефтегазоносных структур или рудоносных структур определенной минерализации, в том числе скрытых, и для выявления глубинных погребенных структур очень важно выявлять и анализировать геотермальные и геохимические аномалии эемной поверхности. Принциянальная возможность применения для этого космических методов состоит в том, что в сложном геохимическом спектре того или иного участка земной поверхности (спектре, который так или иначе проявлен в особенностях почвенно-растительного покрова и характеристиках электромагнитного излучения, фиксируемого на снимках) заключена весьма разнородная информация, в том числе та, которую восходящие флюнды несут как о своих материнских средах, так и о слоях коры, сквозь которые они прошли на своем пути к поверхности. Следовательно, задача состоит в том, чтобы с помощью многозональной съемки земной поверхности или измерений в узких спектральных зонах выделить генетически различные составляющие _(в том числе по глубине заложения) наблюдаемого геохимического поля.

Таким образом, речь идет о развитии методов дистанционного (космического) геохимического зондирования для прямого и целенаправленного поиска зон различной геохимической специализации. В этом отношении очевидна основная роль многозональных съемок и измерений, с помощью которых осуществляется спектральный анализ электромагнитной радиации с земной поверхности. Самостоятельное значение и большие перспективы имеют методы лидарной спектроскопии (см. гл. 6). В связи с отмеченными выше особенностями геохимической структуры поверхности и возможностью проявления в ней погребенных вещественно-геохимических неоднородностей необходимо отметить, что, по-видимому, далеко не все элементы структуры, дешифрируемые на космических снимках, следует объяснять неотектоническими деформациями.

Во всех случаях решение научных и прикладных задач основывается на выявлении типичных и особенных черт того или иного явления (или образования). Выбор необходимых типов съемок или измерений должен производиться исходя из общетеоретических, научно-методических предпосылок, а также путем эмпирического поиска.

Общие физико-географические условия местонахождения исследуемых объектов или территорий имеет чрезвычайно важное, определяющее значение в формировании облика линеаментов, в особенностях их проявления и дешифрирования на космических снимках. Эти условия в самом общем виде предопределяются орографическими и климатическими факторами.

Главные орографические элементы земной поверхности, как известно, обусловлены reoлогической структурой, причем в основном неотектоническим ее планом. Характер проявления и дешифрировочные признаки линеаментов могут существенно различаться в пределах континентальных платформенных равнин и горно-складчатых областей. Из-за резкого различия амплитуд тектонических движений и вообще интенсивности и характера геологических процессов, а также из-за различия горизонтальных градиентов тех или иных характеристик земной поверхности (литолого-фациального состава отложений, уклонов и т. д.) один и тот же линеамент (транзитного типа) на изображениях платформы и смежной горной области может иметь различную отчетливость и форму проявления. Резко обозначенный в одной области, он может «потеряться» в другой. Но на изображениях другого масштаба, другого уровня генерализации он и здесь может проявиться достаточно ясно. При этом для выявления линеамента в пределах платформы, при прочих равных условиях, обычно требуется изображение более высокой степени генерализации.

Указанное обстоятельство имеет принципиальное значение, например, при интерпретации линеаментов как глубинных образований и при оценке их глубинности по характеру проявления на изображениях разных масштабов. Такая оценка, очевидно, должна производиться с обязательным учетом положения линеаментов в той или иной геотектонической области. Это же необходимо учитывать и при оценке причин прерывистости линеаментов, изменения их облика по простиранию.

Кроме самых общих, существенные различия в характере проявления линеаментов связаны с их положением в областях денудации или аккумуляции. В качестве таковых укажем на платформах щиты и плиты, в орогенах — зоны и системы поднятий и впадии.

В областях преобладания процессов денудации линеаменты проявляются не только, в литолого-фациальных, структурных и других особенностях субстрата, но и в разнообразных типах и формах эрозионно-денудационного рельефа. Анализ рельефа в таких областях дает ценнейшую информацию, поскольку здесь линеаменты и проявляются главным образом в рисунке эрозионных сетей, расположении уступов и других форм рельефа.

В области опусканий, где широко развиты аккумулятивные равнины, образы линеаментов формируются менее заметными особенностями поверхности. Обычно они отражают конседиментационные деформации, которые сопровождаются изменениями фациального состава и мощности отложений и соответствующей структурой почвенно-растительного покрова, влажности поверхности и т. д. Иногда они являются геотермо-геохимическим отражением на поверхности более или менее глубоко залегающих неоднородностей фундамента.

Если в области денудации линеаменты образуются достаточно резкими чертами рельефа, то на аккумулятивных равнинах они нередко представляют собой довольно расплывчатые, без резких ограничений зоны, для выявления которых требуются изображения с более высокой генерализацией. Кроме того, поскольку в этом случае велико значение структуры почвенно-растительного покрова, при дешифрировании линеаментов значительно бо́льший удельный вес приобретают многозональные съемки, позволяющие в определенных зонах спектра как бы экстрагировать искомые объекты.

Особый подход требуется при выявлении линеаментов в пределах акваторий. Возможно непосредственное дешифрирование тектонически обусловленных элементов рельефа дна мелководья на изображениях, полученных в коротковолновой части видимого спектрального диапазона. Здесь, а также и в более глубоководных частях акваторий линеаменты и другие структурные элементы могут дешифрироваться и по косвенным признакам. Это некоторые особенности водной среды (цвет, температура, соленость, плотность, насыщенность планктоном и т. д.), которые определяются структурой течений, зависящих, в свою очерсдь, и от тектонически обусловленного рельефа дна Для выявления структуры водных масс требуется использование съемок в коротковолновой части спектра. Очевидно, что положение структурных элементов дна, установленных по таким данным, будет весьма приблизительным.

Климатические условия изучаемых территорий играют также важную роль в формировании их образов на космических изображениях и поэтому должны прежде всего учитываться при выделении и интерпретации объектов и их параметров. Собственно говоря, важно иметь четкое представление не столько о климатических особенностях изучаемой области, сколько о генетических типах геологических процессов, которые обусловлены этими особенностями и вместе с соответствующим почвенно-растительным покровом определяют ландшафтное выражение геологической структуры.

На изображениях аридных областей, как жарких, так и холодных, геологический субстрат находится в «открытом» залегании. Хорошими индикаторами его структуры здесь являются рельеф и его непосредственные литологические (петрографические) характеристики, прежде всего цвет и структурно-текстурные особенности. Имеющийся опыт показывает, что для таких областей наиболее информативны изображения, получаемые в инфракрасном диапазоне и длинноволновой части видимого спектра.

В гумидных областях геологический субстрат находится, как правило, под изменчивым почвенно-растительным покровом. В таких «закрытых» областях геологическая интерпретация космических изображений выполняется по сумме косвенных признаков. Поэтому здесь особенно важно и необходимо предварительное знание индикаторов геологических тел и структур. Поскольку почвенно-растительные индикаторы относятся к категории чрезвычайно тонких и далеко не всегда различимых непосредственно, необходимо применять методы инструментального измерения, вычисления и анализа спектральных яркостей изучаемых объектов, а также разнообразные методы искусственного их выделения. Таковы методы оптической, электронной или фотографической фильтрации, заключающиеся в различных преобразованиях первичных изображений. Они достаточно трудоемки, требуют соответствующего технического обеспечения.

Что же касается морфологических индикаторов, связанных с особенностями рельефа, то в гумидных областях они также весьма разнообразны, но в соответствии со спецификой экзогенных процессов пространственно более изменчивы, чем в аридных областях. Поэтому необходимо быть готовым к тому, что одинаковые объекты будут по-разному выражены на космических изображениях. Это чрезвычайно важное обстоятельство, так как при интерпретации геологической сущности, например, линеаментов важно быть уверенным, что изменение их образов определено какими-то первичными (тектоническими) причинами, а не чисто вещними особенностями среды их проявления.

Следующая группа условий, от которых зависят направленность, ход, методы и возможности исследования, определяется состоянием предварительной изученности дешифрируемой территории. Этот аспект, по-видимому, не требует особых разъяснений. Но необходимо подчеркнуть, что при геологической интерпретации космических изображений степень предварительной изученности территории, а также знание и опыт интерпретатора имеют очень большое значение. От них зависит широта решаемых проблем и задач, глубина проникновения в геологическое существо видимой картины, т. е. эффективность применения космических средств.

Дешифрирование слабо изученных территорий обычно дает лишь общее представление о структурном каркасе путем аналогий с лучше изученными территориями, позволяет сделать некоторые предварительные выводы и организовать соответствующим образом наземные исследования. Круг решаемых задач в этих условиях обычно весьма ограничен, степень гипотетичности высока.

Исследование хорошо изученных территорий имеет существенно иные особенности. Кроме получения некоторых дополнительных сведений о деталях приповерхностной структуры, важной стороной исследования становится региональный анализ уже известных факторов и представлений на основе космических изображений, дающих объективную и цельную картину пространственного взаимоотношения различных структурных образований на больших территориях. Изучая генстически сдиную совокупность геологических образований (элементов), мы получаем новые данные также и о составляющих ее элементах, поскольку свойства последних определяются свойствами совокупности. Кроме того, на космических изображениях с их большой генерализацией отдельные, даже крупные, геологические образования для нас исчезают, и вместо них проявляется нечто новое, характеризующее уже совокупность таких образований.

Таким образом, космические изображения позволяют по-новому рассмотреть весьма разнообразные имеющиеся геологические и геофизические данные, вскрыть еще неизвестные причинно-следственные связи между известными объектами и получить новые представления о свойствах этих объектов. При этом использование космических изображений различных уровней генерализации и разного территориального охвата позволяет вести анализ одновременно на всех уровнях — от локального до глобального.

Наковец, рассмотрим материально-технические условия, т. е. тип и качество космических изображений и технические возможности их инструментальной обработки и преобразований.

Масштаб, разрешающая способность и территорнальный охват изображений определяют ранг изучаемых объектов и явлений. Наличие серии разномаештабных изображений с существенно различными уровнями генерализации позволяет проводить многоплановые исследования структуры литосферы. Современные представления, например, о линеаментах должны, очевидно, основываться на непосредственном видении крупнейших элементов структуры в целом, а не их деталей, доступных наземным паблюдениям.

Большая обзорность и высокий уровень генерализации космических изображений весьма благоприятны для составления различного рода обобщающих схем и карт. «Возникает возможность составлять путем дешифрирования космических снимков тектонические или структурные карты не обычным способом обобщения и структурного акализа карт геологических, а непосредственно, минуя стадию собственно геологического картпрования... При дешифрировании телевизионных космических снимков тектоническая карта становится первичным, а не производным документом» [Башилова и др., 1973, с. 109]. Интегрирование деталей геологической структуры в более крупные единицы, которое происходит на космических изображениях, делает последние чрезвычайно полезным инструментом исследования. При этом необходимо учитывать, что контрастноаналоговый метод геологической и тектонической интерпретации космических изображений [Башилова и др., 1973] имеет определенные недостатки и ограничения, связанные с многообразием и пространственной изменчивостью внешнего проявления одинаковых или сходных геологических образований, особенно древних.

Выше отмечалась возможность путем сравнительного анализа разномасштабных снимков получать данные о глубине заложения выделяемых элементов структуры и коррелировать структурные планы разных горизонтов литосферы. Это, несомненно, очень важное дополнение к геофизическим методам изучения глубинной структуры литосферы.

Спектральный диалазон изображений, как установлено, имеет важное значение для выявления и картирования геологических образований, которые в силу тех или иных причин трудно распознаются и прослеживаются при наземных исследованиях. Это особенно важно в условиях закрытых территорий, где изучаемые образования находятся под сплошным почвенно-растительным покровом или под чехлом более молодых отложений. В данном случае работа состоит в нахождении такого участка спектра или такого сочетания разных спектральных диапазонов, при которых искомый объект проявлялся бы максимально.

Эта сторона исследования тесно связана с геохимической структурой и особенностями земной поверхности, с проницаемостью земной коры и проблемами глубинной дегазации. Она весьма перспективна с практической точки зрения: для выявления и прослеживания открытых и погребенных рудных зон определенной геохимической специализации, нефтегазоносных структур, изучения структуры глубинных слоев.

Время съемки также играет важную роль. Для каждой области достаточно хорощо известно или может быть установлено время года, когда геологический субстрат наименее всего замаскирован растительным покровом, либо когда состояние растельного покрова и влажность почв максимально проявляют и подчеркивают особенности строения субстрата.

Вместе с тем необходимо использовать и некоторые «парадоксальные» явления. Так, в областях сплошного развития земледелия многие линеаменты и разрывы наиболее ярко проявляются на земных снимках, когда снежный покров снимает мозаику сельскохозяйственных угодий и делает видимым элементы рельефа. Динамика весеннего таяния снежного покрова и особенности его распространения в ряде случаев хорошо обозначают неоднородности теплового потока в земной коре.

13

Конкретные рекомендации по выбору сезона и времени суток, оптимальных для съемки, могут быть получены путем несложных специальных исследований.

Повторяемость съемок для решения многих задач геологии не имеет большого значения. Вместе с тем для изучения ряда геологических процессов, для осуществления их прогноза необходима определенная периодичность съемок, которая устанавливается исходя из характера изучаемого явления. Для изучения вулканических извержений и, возможно, сейсмоопасных зон необходимы постоянное патрулирование соответствующих областей с орбиты и оперативный анализ данных наблюдений и измерений. Для противооползневой и противоселевой службы такое космическое «патрулирование» необходимо проводить в наиболее критические годы и сезоны. Для оценки скоростей и тенденций развития эрозионных и абразионных процессов по берегам рек, морей и озер, эрозии или засолонения почв, заболачивания, распространения песчаных пустынь и других подобных процессов съемки можно проводить гораздо реже.

Способ получения изображений играет значительную роль главным образом при необходимости их вторичных преобразований и определении соответствующей технологии. Для визуально-инструментальных методов анализа вполне удовлетворительны фотографические изображения. Для машинной автоматизированной обработки (фильтрации) и дешифрирования изображений (особенно многозональных) наиболее перспективны электропно-механические (сканерные) способы получения изображений.

Перечисленные выше методологические и методические особенности и аспекты использования космических изображений в геологических исследованиях не являются, по-видимому, исчерпывающими. Но уже они показывают всю сложность, многоплановость и большие возможности космической геологии.

Глава 2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Получаемые дистанционными методами изображения не представляют собой однозначных отображений реальных объектов, а показывают лишь некоторые, не всегда самые главные, и только спектрально-фотометрические и геометрические их характеристики. Поэтому необходимо исследовать некоторые особенности разномасштабных данных дистанционного зондирования, дать ряд определений, наметить круг задач, решаемых математическими методами, и оптимальную стратегию изучения геологических объектов дистанционными средствами.

Специфика аэрокосмических снимков заключается в том, что различные по своей природе геологические объекты могут отражаться на них одинаково и, наоборот, одинаковым по целевому признаку геологическим объектам в различных ландшафтных и геологических условиях могут соответствовать различные изображения.

Такое положение делает необходимым использование понятий «геологический объект» и «дистанционное изображение геологического объекта» (в дальнейшем просто «изображение»).

Как показал опыт [Макаров, Трифонов, Щукин, 1974; Макаров и др., 1974; Скарятин, 1976; Комаров и др., 1974; Геологическое..., 1978], дистанционные материалы обладают тем счастливым свойством, что различия в их разрешающей способности определяют и ранг дешифрируемых структурных элементов. Рассмотрим физические причины этого явления, после чего обратимся к методическим аспектам анализа аэрокосмической информации.

Разрешающая способность аэрокосмоснимков как фильтр разноранговых структурных элементов Земли. Изображение объекта дистанционными методами мы получаем в том случае, если имеют место спектрально-фотометрические отличия земной поверхности в пределах геологического объекта относительно окружающей территории. Эти отличия могут вызываться особенностями рельефа земной поверхности и флуктуациями ее отражающей способности и цвета. Поэтому будем различать яркостной, цветовой и теневой контрасты. В зависимости от разрешающей способности снимка они и формируют изображения структурных элементов различных рангов.

Действительно, пусть на высоте Н располагается снимающий аппарат. Тогда по кри-

терию Релея точки с одинаковыми спектрально-фотометрическими характеристикамибудут неразличимы, если они расположены на расстоянии $I \leq L = \lambda H/D$, где $\lambda - длина$ волны света; D — оптическая характеристика прибора. Таким образом, при фиксированных D и H на аэрокосмическом снимке будут изображены лишь объекты с характерными размерами l > L. Следовательно, дистанционная аппаратура в зависимости от ее оптических характеристик и высоты съемки выполняет роль автоматического фильтра, изображая на снимке лишь структуры вполне фиксированного порядка. Увеличение высоты съемки H или ухудшение оптической характеристики D приводит к тому, что на аэрокосмических снимках исчезают структурные элементы высоких рангов и проявляются невидимые ранее структурные элементы более низких рангов.

Прямые, обратные и прогнозные задачи методов дистанционного зондирования. Фильтрационные особенности дистанционной аппаратуры приводят к выводу о необходимости учета ранга изображений геологических объектов. Неоднозначность же связей между геологическими объектами и их изображениями позволяет различать прямые, обратные и прогнозные задачи методов дистанционного зондирования.

Под прямыми задачами будем понимать задачи установления соответствия (однозначного или неоднозначного) между геологическими объектами и их изображениями. К классу обратных задач отнесем задачи диагностирования геологических объектов по материалам дистанционного зондирования. Наконец, задачи предсказания наличия или отсутствия полезных ископаемых, землетрясений, оползней с использованием данных дистанционного зондирования отнесем к классу прогнозных задач.

Можно выделить две главные группы космических изображений, различающиеся по спектрально-фотометрическим и геометрическим показателям, — это линеаменты и блоки.

С учетом ранговой соподчиненности сруктурных элементов линеаментом фиксированного уровня ранговой соподчиненности К условимся называть элемент системы геологических объектов фиксированного ранга К, имеющий протяженность на два или более порядков больше его ширины. В качестве меры линеарности можно избрать десятичный логарифм отношения размеров длины структуры к ее ширине.

Изображением блока фиксированного уровня ранговой соподчиненности *К* назовем изображение геологического объекта фиксированного уровня *К*, протяженность которого не более чем на два порядка превосходит его ширину.

Существующая неоднозначность соответствий между реальными геологическими объектами и их дистанционными изображениями в значительной мере определяет и методику изучения этих объектов дистанционными средствами.

Без решения прямой задачи дистанционного зондирования невозможно однозначно идентифицировать изображения с конкретными геологическими объектами. Поэтому сначала необходимо решить прямую задачу, а потом переходить к обратной, используя, например, алгоритмы распознавания образов. Иными словами, на первом этапе предполагается картирование и классификация дистанционных изображений. На втором этапе методами математической статистики или распознавания образов с помощью наземных наблюдений производится обучение, находятся количественные оценки тесноты связи между дистанционными изображениями и конкретными типами геологических объектов. Наконец, на третьем этапе на основании обучения по данным дистационного зондирования осуществляется диагностика объекта в рамках алгоритмов распознавания образов. Тем не менее неоднозначность диагностики в силу перечисленных выше особенностей сохраняется и в этом случае.

Другой, быть может более плодотворный, путь связан с отношением к аэрокосмической информации как к некоторому указанию на существование в земной коре и литосфере неоднородностей, природа которых, как правило, неизвестна и нуждается в определении с использованием традиционных геофизических и геологических методов.

Существуют два способа решения прогнозной задачи дистанционного зондирования. Можно, решив прямую и обратную задачи, диагностировать по изображению геологический объект и включать результаты диагноза в прогностические алгоритмы. Однако с точки зрения практики, может быть, более рационально использовать материалы дистанционного зондирования непосредственно на стадии обучения прогнозных программ. Тогда можно прогнозировать с использованием дистанционных методов, минуя стадию диагноза (метод черного ящика).

Таким образом, при использовании материалов дистанционного зондирования мы сталкиваемся с двумя моментами. Во-первых, эти материалы несут в себе принципиально новую информацию о существовании структур различной глубинности, которые далеко не всегда могут быть установлены традиционными приемами геологических исследований. Во-вторых, поскольку на земной поверхности мы находим лишь косвенное отражение глубинных структур (которые дистанционными методами фиксируются также не во всем своем многообразии), изображения этих структур, как правило, не адекватны реальным объектам. В связи с этим, с одной стороны, необходимо разработать методику диагностики (распознавания) реальных объектов на основании их дистанционных изображений, с другой — следует найти методику непосредственного применения материалов дистанционного зондирования, например, в поисках месторождений полезных ископаемых. Этим методикам посвящен следующий раздел.

БАЙЕСОВСКАЯ СТРАТЕГИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ КОСВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВАНИИ ТРЕХРЯДНОГО ПЕРЦЕПТРОНА ¹

Используемые в анализе материалов дистанционного зондирования косвенные изображения позволяют в качестве прямой считать такую задачу, в которой в признаковом пространстве мерностью N + 1 ($N - \cdot$ число признаков) заданы распределения $P(X_k/^t V)$, оценивающие вероятности отнесения косвенного изображения tV к конкретному объекту X_k . По этим данным необходимо либо оценить вероятности реализации объекта X_k при наличии значения признака u_i^k или сочетаний значений пересекающихся признаков tV (в прогнозной задаче), либо найти, с какими вероятностями реализуются выделенные по целевому признаку объекты $X_k \in \{X\}$ при наличии конкретного значения признака или сочетаний значений признаков (в диагностических задачах).

При решении обратной задачи необходимо по множеству наблюденных данных (совместные реализации целевого признака и косвенных изображений) рассчитать вероятности реализации целевого признака X_k при условии косвенного изображения. Поскольку вероятности $P(X_k/^iV)$ априорно неизвестны, обратная задача геологического прогнозирования имеет первостеленное значение; только после ее решения становится возможным как прогноз, так и диагноз.

По аналогии с приведенной совокупностью признаков [Кучай, 1976] под приведенной совокупностью косвенных изображений будем понимать такую идеализированную совокупность, в которой вероятности всех классов косвенных изображений равны, т.е. $P({}^{t}U) = P({}^{t}V)$ ($i \ge j$). Тогда [Кучай, 1976] в приведенной совокупности для единственного реализованного объекта X_k имеем

$$P({}^{j}U/X_{k}) = \frac{P(X_{k}/{}^{j}U)}{\sum_{i} P(X_{k}/{}^{j}U)}, \qquad (2.1)$$

где $P(X_k/{}^{3}U)$ — вероятность реализации объекта X_k при условни косвенного изображения ${}^{j}U$.

Знание вероятностей $P({}^{i}U/X_{k})$ позволяет выбрать структуру вероятностных связей первого ряда системы, поскольку, чем больше величина $P({}^{i}U/X_{k})$, тем больше вероятность совместной реализации объекта и косвенного изображения. Эти вероятности являются инвариантными оценками тесноты связи косвенных изображений ${}^{i}U$ с объектами X_{k} , они не зависят от априорных вероятностей как изображений, так и самих объектов.

Что касается задачи выбора вероятностных связей второго ряда системы, где собственно решается задача диагноза, то, поскольку для приведенной совокупности признаков $P({}^{i}U/X_{k}) = P(X_{k}/{}^{i}U)$, учитывая (2.1), можно по формуле Байеса найти вероятности и совместных реализаций фиксированного косвенного изображения, и объектов класса $K - X_{k} e\{X\}$:

$$\bar{P}(X_{k}/^{j}U) = \frac{P(X_{k})P(^{j}U/X_{k})}{\sum_{l=1}^{L}P(X_{l})P(^{l}U/X_{l})},$$
(2.2)

где $P\{X_k\}$ — априорные вероятности объекта класса K.

Расстоянием между двумя косвенными изображениями ${}^{1}U = \{{}^{1}u_{1}, {}^{1}u_{2}, ..., {}^{1}u_{N}\}$ и ${}^{2}U = \{{}^{2}u_{1}, {}^{2}u_{2}, ..., {}^{2}u_{N}\}$ будем называть расстояние между векторами соответствующих косвенных изображений в N-мерном пространстве признаков:

$$\rho_{12} = \rho_{21} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} ({}^{1}u_{i} - {}^{2}u_{i})^{2}}.$$

¹ Подробно эта методика изложена в статье В. К. Кучая, Д. Н. Чучадеева [1979]. 16

Аппроксимируем условную вероятность принадлежности изображения 'U к изображению 'U функцией расстояния между косвенными изображениями: $P(U/U) = \alpha(\rho_{ii})$. Рассматривая обобщенный вид функций связи между косвенными изображениями в виде $a(\varphi_{ii}) = a_0 f(\varphi_{ii})$, и накладывая очевидные граничные условия

$$\begin{cases} \alpha(\rho_{ij}) = a_0 \leq 1 & \text{при } \rho_{ij} = 0, \\ \alpha(\rho_{ij}) = 0 & \text{при } \rho_{ij} = \rho_{\text{max}}, \end{cases}$$
(*)

введенные функции связи можно рассматривать как обобщение понятия адекватности на вероятностной основе.

Пусть имеется обучающая информация двух типов: a) матрица $t_{ij}(X_k)$, строки которой представляют собой косвенные изображения при условии реализации объекта класса $K(X_k)$, и б) матрица t_{ii} , строки которой представляют собой косвенные изображения, случайно выбранные из обучающей совокупности. Тогда вероятность связи в приведенной совокупности определится равенством, аналогичным (2.1):

$$P^{*}({}^{j}U/X_{k}) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{k}} \alpha \left\{ \rho({}^{j}U, {}^{i}U) \right\}}{\sum_{j=1}^{k_{k}} \sum_{i=1}^{k_{k}} \alpha \left\{ \rho({}^{j}U, {}^{i}U) \right\} \sum_{i=1}^{N^{*}} \alpha^{*} \left\{ \rho({}^{j}U, {}^{i}U) \right\}} :$$

$$:\sum_{k=1}^{k_{k}} \frac{\sum_{i=1}^{k_{k}} \alpha \left\{ \rho({}^{k}U, {}^{i}U) \right\}}{\sum_{i=1}^{k_{k}} \alpha \left\{ \rho({}^{k}U, {}^{i}U) \right\}} :$$

$$(2.3)$$

где h_k — число изображений в матрице $t_{ij}(X_k)$. Число N^* изображений в матрице t_{ij}^* и множество косвенных изображений {¹U} $t_{ii}(X_k)$ рассматриваются как полная группа событий.

В рамках принятой постановки задачи если имеется счетное множество косвенных изображений $\{{}^{t}U\}$, не содержащихся в обучающих матрицах $t_{ii}(X_{k})$ и t_{ii}^{*} , и если множество {¹U} по условию образует полную группу событий, то для решения первой задачи (оценки тесноты связи фиксированного по целевому признаку объекта X_k с элементами множества косвенных изображений *U € {'U}) вероятность связи конкретного изображения с реальным объектом X_k равна

$$P(^{*}U/X_{k}) = \frac{\sum_{i=1}^{k_{k}} a\left\{ p\left(^{*}U, ^{i}U\right) \right\} P^{*}\left(^{i}U/X_{k}\right)}{\sum_{i=1}^{L} \sum_{i=1}^{k_{k}} a\left\{ p\left(^{i}U, ^{i}U\right) \right\} P^{*}\left(^{i}U/X_{k}\right)}, \qquad (2.4)$$

где t — число изображений в множестве $\{U\}$ и $U \in t_{ij}(X_k)$.

На втором ряду распознающей системы, полагая, что классы распознаваемых ; объектов образуют полную группу событий, по аналогии с (2.3), с учетом (*) решение осуществляется по формуле

$$P(X_{k}/^{*}U) = \frac{P(X_{k}) \sum_{i=1}^{k_{k}} a\left(p\left(^{*}U, \frac{i}{U}/X_{k}\right)\right) P^{*}\left(^{i}U/X_{k}\right)}{\sum_{i=1}^{N} P(X_{i}) \sum_{i=1}^{k_{k}} a\left(p\left(^{*}U, \frac{i}{U}/X_{i}\right)\right) P^{*}\left(^{i}U/X_{i}\right)},$$
(2.5)

где М — число классов распознаваемых объектов, образующих группу событий, $U/X_k \in t_{ii}(X_k)$.

Таким образом, алгоритм определения вероятностей принадлежности косвенного изображения U к конкретным классам объектов X_k (выделенных по целевому признаку) сводится к следующим операциям:

1) по эталонным изображениям (изтрицы (//Х_к)-и пнформации об изображениях в выборке в целом (матрица t^{*}) на стадии обучения по формулам (2.1)²²²(2.3) рассчитыелопедиція 2 Jakas 588 17

ваются вероятности реализации объекта класса X_k при условии фиксированного изображения ⁱU в приведенной совкупности изображений;

2) диагностируемое (поступившее на вход системы) изображение *U оценивается на близость к эталонным изображениям в матрице t_{ij}/X_k , и по формуле (2.4) рассчитываются вероятности $P(*U/X_k)$;

3) учитывая априорные вероятности классов объектов X_k, воспользовавшись формулой (2.5), получаем окончательные вероятности реализации объекта X_k при условии косвенного изображения ¹U с учетом априорных вероятностей самих объектов.

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Как отмечено выше, сейчас все большее признание получает взгляд на геологическую среду как на систему разноранговых структурных (в понятии теории систем) элементов. Распространенные в геологии схемы систем являются по своему содержанию детерминистическими. На наш взгляд, именно эта их особенность является причиной того, что строгое применение таких схем на практике сталкивается с серьезными трудностями. В самом деле, при построении модели любой системы исследователь стремится включить в нее все наблюденные элементы различных рангов и связи между ними. Детерминистическая модель предполагает обязательную реализацию всех элементов и связей, в то время как в природе это происходит далеко не всегда.

По-видимому, не случайно Л. П. Зоненшайн отмечает, что «не может быть предложено единой схемы развития геосинклиналей в духе строго детерминированной схемы Штилле в виде череды событий, сменяющих одно другое в строгой, наперед заданной последовательности, например по классическому образцу, когда первоначальное погружение якобы предопределяет через какое-то время складчатость и последующее воздымание» [Геофизика..., 1979, с. 279].

. Таким образом, необходимо либо предположить, что в каждом случае мы имеем дело с новой детерминистической системой, либо допустить, что сами геологические системы имеют не детерминистическую, а вероятностную природу. Иными словами, каждый элемент системы и ее связи в каждой конкретной реализации присутствуют не обязательно, а с некоторыми определенными вероятностями, свойственными самой системе.

От традиционных детерминистических моделей [Соловьев, 1975; Иерархия..., 1977] вероятностные будут отличаться лишь характеристиками вероятностей появления элементов различных рангов и связей между ними. Можно предполагать, что и системы дистанционных изображений также имеют не детерминистическую, а вероятностную природу. Тогда имеет смысл создание вероятностной модели системы дистанционных изображений. Поскольку же имеются вполне определенные связи между дистанционными изображениями определенного ранга и элементами геологического строения определенного ранга, появляется возможность установления связей между этими системами и разработки стратегии геологического прогнозирования с учетом их особенностей.

В рамках рассматриваемого подхода имеется возможность решения следующих трех групп прогнозных задач. Во-первых, по наличию элемента определенного ранга A геодогической системы можно определять вероятности появления элементов этого и других рангов и вероятности определенных связей между элементами (рис. 2). Во-вторых, аналогичные операции возможны для системы дистанционных изображений (определения вероятностей появления конкретных изображений и связей между ними при условии изображения j(j = I, II...)). Наконец, в-третьих, речь может идти о предсказании элементов геологической системы различных рангов при условии реализации некоторых дистанционных изображений (эти связи на рисунке показаны пунктирными линиями).

Что касается систем геологических объектов, то здесь, по-видимому, следует опираться на известные достижения геологии, дополнив существующие детерминистические модели оценками вероятностей реализации определенных элементов и связей между ними. Построение же вероятностной иерархии дистанционных изображений будем проводить следующим образом.

Зафиксируем высоту (или разрешающую способность) снимающего аппарата, выберем ряд геометрических и спектрально-фотометрических характеристик дистанционных изображений и определим вероятности изображений определенного ранга и связи между ними. При переходе на новую высоту съемки (или к новой разрешающей способности)



Рис. 2. Иерархическая система классификации геологических объектов и структур дистанционного зондирования

1, 2 — элементы систем: 1 — геодогического строения, 2 – дистанционных изображений. Объяснение в тексте

мы получаем систему элементов другого ранга, их связи и их вероятности. Оценив вероятности реализации изображений различных рангов при условии изображения другого ранга, перейдем к построению системы на более высоком уровне иерархической подчиненности. Процедуру можно повторять сколько угодно или до тех пор, пока не будут исчерпаны технические возможности. Само выделение изображений различных рангов осуществляется методами автоматической классификации или распознавания образов, в том числе и методом, описанным в предыдущем разделе главы.

Допустим, что мы построили модели геологических систем и систем дистанционных изображений. Пусть по методике, изложенной в предыдущем разделе, мы рассчитали вероятности принадлежности косвенных изображений определенного ранга геологическим объектам фиксированного ранга. Тогда мы имеем возможность получить ряд условных вероятностей: P(A/B), P(A/A), P(A/I), P(A/II), P(1/I), ... я т. д. (см. рис. 2),т. е. перейти к системе вероятностного иерархического прогнозирования на основании вероятностей иерархической системы дистанционных изображений. Пример взаимосвязей показан на рис. 2. Поскольку при построении вероятностных систем мы получаем вероятности одного элемента при условии реализации какого-либо другого, вероятности объект -- объект, изображение 🕶 изображение, имеем типа: мы изображение 🛶 объект. В связи с этим процедура конкретного прогнозирования на основании материалов дистанционного зондирования сводится к последовательному применению формул байесовской стратегии принятия решений.

В то же время каждый элемент иерархии можно рассматривать как некоторое состояние системы, а условные вероятности связей между элементами — как вероятности перехода в другое состояние. При таком подходе мы приходим к теории марковских случайных процессов для нахождения наиболее вероятных переходов из состояния, описываемого одним элементом, в состояние, описываемое другим элементом системы. Иными словами, речь идет о выявлении наиболее существенных зависимостей между самими элементами.

Вышензложенное мы резюмируем следующим образом. В целом проблемы изучения природной среды дистанционными методами относятся к классу задач распознавания образов в условиях неполноты информации и с учетом ранговой соподчиненности анализируемых структурных элементов. В связи с этим использование аэрокосмической информации требует фиксирования ранга анализируемых структурных элементов и разделения задач на прямые, обратные и прогнозные.

В рамках принципа Релея аппаратура дистанционного зондирования в зависимости

2*

19

от ее разрещающей 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.

Глава З

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 изображении 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 изображения, и, наконец, приобретающие в последнее вемя 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, тонографическом 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; Петрусевич, 1962; Аэрометоды..., 1971; Космическая..., 1975; и др.].

Дешифрирование аэрокосмических изображений опирается на более чем полувековой опыт дешифирования аэрофотоснимков, на сформулированные при этом теоретические основы и аппаратурные 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 востроения моделей изображения, а само изображение представить не в виде суммы объектов, запечатленных на снимке, а в виде копии системы объектов, взаимосвязи и структура которой обусловливают 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) є D справедливо выражение

$$|x|+|y| \leqslant M, \tag{3.1}$$

где *М* — 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:

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

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

$$0 \leqslant F(x, y) \leqslant K, \tag{3.2}$$

где K>0 для любой точки (x, y) є D, н

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

Носятель	высота съемки	Тип аппара- туры	Диапазо+ Кы, мкм	Поноса обзора, км	Простран ственное разреше- ние , 14	Приближенные эначения абсо- лютной инфор- мативкости (бит) для изоб- ражения 18 х 18 см
Метеор 1-17	670	Т – кадровая с видеоколом	0,35-0,76	1000-1400	1250	3 • 107
Mercop-18	670	Сканер малого	0,7-0,8	3000		
		разрешения	0,8-1,0			
Mercop-28	670	Сканер малого	0,5-0,6	3000	750	
-		разрешения	0,6-0,7			
		Сканер среднего	0,7-0,8	3000	350	
		разрешения	0,8-1,0			
			8-12	9600-		
				-17000		
Ландсэт-1, 2, 3	<u> </u>	Мультиспек-	0,475-		40	
	~1000	тральная	-0,575			
		Т-камера	0,580-	185		
	1	использую-	-0,680			
		щая видс-	0,690-			
	{	кон с обрат -	-0,830			
]	ным лучом				
	I .	Оптяко-элек-	0,5-0,6			
		трокный ска-	0,6-0,7		49-60	
		кер	0,7-0,8			1 - 169
Панисэт	ر	T	0,0-1,1			1 * 10
ancern.		1 — кадроная	/ спек-		30	
vemag		сканер	тральных			
Coroa-1.2	250	THEOR 2		l		
VUNU 10	200	JICCA-J	0,38-0,66			
			0,00-0,47	1.50		
			0,34-0,64	150	20-300	1 • 10' •
			0,43-0,80			
0303-22	260	አብር ሲ 6	0,82-1,00	120	-	7 7 4 49
	200	1711 W U	0,40-0,30	160	20-90	7,2 • 10*
			0,32-0,30			
			0,30-0,62			
			0,004~0,00			•
			0,70⊶0,74 0.78 0.05			
	-		0,78-0,88			

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

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

$$|F(x, y) - G(x, y)| < \varepsilon.$$
(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.

 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 дешифрования;

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 вешним 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 ¹ 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 • 10⁸ до 1 • 10¹⁰ бит. Примерно такой же объем информации содержат и изображения, которые получаются с помощью сканеров высокого разрешения [Чесноков, Ведешин, 1975] Техпические 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 NACA считают, что полученные в настоящее время с «Ландсэт-З» изображения с информативностью примерно на два порядка ниже, чем у фотографических снимков того же масштаба, удовлетворительны для решения большинства природоведческих 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,

¹ Под достоверностью дешифрирования понимает отношение правильно распознанных объектов к числу всех выделенных на изображении фотообразов. Она равна единице, если все выделяемые из 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 180×180 мм (по Л. А. Богомолову [1976], с дополнениями)

Разрешение	Информативность						
на пленке, лня/мм	2	5	10	15			
8	8,5 · 10 ⁶	1,7 • 107	$2,5 \cdot 10^{7}$	3,3 • 10 ⁷			
12	$1.9 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^7$	$5.7 \cdot 10^7$	$8,0.10^{7}$			
10 56	$3,0 \cdot 10^{9}$	$3.4 \cdot 10^{9}$	$9,0 \cdot 10^{\circ}$ 5.1 • 10 ⁹	$1,2 \cdot 10^{\circ}$ $7,2 \cdot 10^{\circ}$			
160	3,2 - 1010	6,4 · 10 ¹⁰	1,0 • 1011	1,4 • 1011			

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

Таблица З

Некоторые характеристики автоматических камер для аэро- и космических съемок

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

человеческий глаз способен различать пять пар ляний 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 [Богомолов, 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 компораторов «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 и оптико-механической обработки [Геологическое..., 1978], методы фотографической и оптико-механической фильтрации изображений [Комаров и др., 1976]. Кроме того, применяются различные способы оптико-электронных преобразований исходного

Нехоторые характеристики бортовой съемочной аппаратуры

Носитель	Высота съемки, км]'ип аппаратуры	Диапазон, мкм	Полоса обзора, км	Пространственное разрешение, м	Приближенные значения абсолют лои информативности для изобра жения 18 × 18 см. бит
«Метеор-1-17»	670	ТV-кадровая с видеконом	0,35—0,76	1000-1400	1250	
«Метеор-25»	670	Сканер малого разрешения	0,70,8 0,81,0	3000		3 - 107
«Метеор-27»	670	Сканер малого разрещения	0,5—0,6 0,60,7	3000	750	
		Сканер среднего разрешения	0,3-0,1 0,7-0,8 0,8-1,0	3000	350	
			812		9600-17000	
«Ландсэт-1»	500 1000	Мультисцектральная TV-ка- мера, аспользующая видекон с обратным дучом	0.475 - 0.575 0.580 - 0.680 0.690 - 0.830	185	90-250	
«Ландсэт-2»	5001000	Оптико-элсктронный сканер	0,5-0,60,6-0,70,7-0,80,8-1,1		76 40	1 - 109
«Ландсэт-3» «Ландсэт-Стереосайб» (проект)	5001000	ТV-кадровая, сканер	Семь спектральных диапазонов		1530	1.10
«Союз-12»	260	ЛҚСА-З	$\begin{array}{c} 0,58 - 0,66 \\ 0,68 - 0,47 \\ 0,54 - 0,64 \\ 0,43 - 0,80 \\ 0,82 - 1,00 \end{array}$	150	100	1 • 10 ¹⁰
«Союз-22»	260	МҚФ-6	$\begin{array}{c} 0,460,50\\ 0,520,56\\ 0,580,62\\ 0,640,68\\ 0,700,74\\ 0,780,88\end{array}$	160	20 -40 80	7,2 • 10 ⁹

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

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

Таблица б

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

Тип плеяки	Зона эффективной слектральной чувстви- тельности, км	Общая светочув- ствительность, ед ГОСТа	Средний коэффи- циент контрастности	Разрешение, лна/мм
Изопанхром T-18 И-740-3	510—700 640760	100 300400	2,0—3,0 1,6—2,6	250 68
Цветная ЦН-3	400~-480 500—580 600—680	80	0,81,2	58
Спектрозональная СН-23	670—800 580—680 500600	200	1,5—2,0	6872
СН-2М	670—800 510—670	200—300	1,7—2,6	58

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 • 10⁹ бит информации, а при 60 лин/мм — более 10¹⁵ 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 матерналы, 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» [Дюкрок, 1974, с. 87]. В принципе это было проделано 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 антропогеновых) 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 ¹, 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.

¹ 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):

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

где а, является і-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 , ..., V_k описывают k возможных классов. Согласно (3.5), разделяющая функция R_j (a), относящаяся к классу образов V (j=1...k), должна быть меньше, чем R_j (a), принадлежащая к классу V_j . Полагая $A \sim V_k$, можно записать

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

В этом случае границу разбиения между классами V, и V, можно выразить уравнением

$$R_{i}(a) - R_{j}(a) = 0. (3.7)$$

Существует множество форм для границы разбиения, удовлетворяющих условию (3.6). В литературе рассмотрены линейные, кусочно-линейные, полиномные 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 $z_1, z_2, ..., z_N$ можно рассматривать как случайные величины, и тогда z_i представляет собой измерение *i*-го признака с учетм 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

$$\lambda_{*} = \frac{P_{n}\left(A/\omega_{1}\right)}{P_{n}\left(A/\omega_{2}\right)},\tag{3.8}$$

где $P_n(A/\omega_i)$ при i=1,2 - n-мерная функция условной плотности вероятностей для ω_i -го класса. При сравнении λ_n с останавливающими границами Γ_1 и Γ_2 принимается решение $A \sim \omega_1$, если $\lambda_n \ge \Gamma_1$, или $A \sim \omega_2$, если $\lambda_n \le \Gamma_2$. Если $\Gamma_2 \lambda_n < \Gamma_1$, процесс поиска должен быть продолжен для (n+1)-го шага. Останавливающие границы зависят от вероятности ложного распознавания:

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

где $l_{i,j}$ при t, j = 1, 2 — вероятность принятия гипотезы $A \sim \omega_{i1}$, 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

$$V_n(A/\omega_i) = \frac{P_n(A/\omega_i)}{\left[\prod_{q=1}^m P_n(A/\omega_q)\right]^{1/m}}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$
(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 ω_i из дальнейшего рассмотрения (т. е. считают, что A не принадлежит к классу ω_i), если

$$V_{n}(A/\omega_{i}) < \Gamma_{1}(\omega_{i}), \quad i = 1, 2, ..., m.$$
 (3.11)

Останавливающая граница определяется соотношением

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

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

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, ..., m не увеличиваются после выполнения каждого измерения признаков, то вероятность ощибок 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, р. 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 лонск линеаментов [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 воли в разных диапазонах известна плохо; пока приходится пренебрегать ею. Характеристика почвенно-растительного покрова в эначительной мере зависит от климата региона и, что наиболее существенно при решении геологических задач, от строения геологического субстрата, его структуры и вещественного состава [Фридманд, 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 программноцелевой 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 эго 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 соотнесением 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.

Глава 4

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, разделение изображения по степени оптической плотности. В этом случае обработанное изображение может быть представлено в виде изолиний плотности (эквиденсит).

31



Рис. 3. Сканерное изображение Нижнего Поволжья, полученное с американского спутника «Ландсэт-1» 10 июня 1973 г.



Рис. 4. Фотометрическая схема

Показаны изолинии условных баллов оптической плотности. Жирные линии — крупнейшие линеаменты



Fac. 5. Скема корреляция презигиционного в маганиеого нолей

Па орятвизльных авобреженных Мяжлего Поволжых, переланных 10 и 16 явля 1973 г. со слутинка «Ландсэт 1», этчетлявся ведны земельные уголыя различией тональчостя (ряс. 3), что анатательно овтрудняет дешифрирование снимка. Представлялось возможных с цомощью комбиверованног, метода фотографической фильтрации, фотометрирования в фотометрической обрабстки избавиться от изланней детальности изображения, генерализонать его. Интегрированное измеровно оптических илогиостой изображения, генерализонать его. Интегрированное измеровно оптических илогиостой изображения, генерализонать его. Интегрированное измеровно оптических илогиостой изображения проводилось по профилам на регистрирующем микрофотометре ИФО-451. Система профилей подбирилась по сосё плющада примерно через 20–25 км, что обенначило достаточную дотальность и позволило построить скему оптических плотностей территории (рис. 4). На схеме, выполненной со значитсльной генерализацией, градиенты колебаний ортической плотности почти всюду невелики, экзиденситы очериналог различвые учястии, образуя условную фотометрическую воверхность. Эле схема, изываемая в дальнойшем слемой фотоаномалий, представляет собой исходный материал для соноставленные с теолого-геофевенесками давными.

Аналаз взаямосвяля проводился на ЭВМ по программе «Анкор», составленной А. П. Гущиным. В процессе отладки нами были внесеом значительные изменения, позволивщае выхоматизировало работу программы.

Программой предусмотрено ынимеление коэффициентов корреляния между даума полями, заданными на плоскости часловыма значенными в узлач матрицы по интегральной области, которая определяется дианазоном снашезнаето окна (размером палетки). Пои этом размер окна меластса автоматически, а относительное смошенае одного ка исходных полей задается информационог. Такое смещеные обусловленс коможностью косого намагания козмущающих объектов, инэтому задавнаесь оно телько при анализи соотношения гравитального в магнитого полей. Исходные массивы данных формирозалнов из элемений геофизических нолей или оптической плотчости, которые синмалается с парты или со схом по регулярной сетке с шагом 10 км. Предусмотренное программой автоматическое изменение размерот силстви от 26 × 20 до 100 × 160 км позлочает середскить характер взаимосялях между полями с разной степенно генеральзации, чго ссобенно реобходимо, когда космическая информация амеет разную степерь разрешения

Кроме значений коэффизиентов корреляции в узлах матричной сетки, прогряммой спределяются чисточы их эстречаемости. Анализ построевных по ним наризационных, кразых позволяет устаковить общий характер изменения связи между полним с увеличетися размеров аслетам и выбрять онтимальную налетку. Так, сразнение гискограмм коэффициентов хоровляции али различных сеснолов Средней Азии, построенных али налеток до 20 × 20 по 100 × 100 хм, позволяю оценать достоветность районирования тео-



Рис. 6. Схема корреляции гравитационного поля с оптической плотностью

ритории по геофизическим материалам и выбрать следующие оптимальные размеры палеток: 30×30, 50×50 и 100×100 км [Князев и др., 1981].

Степень дифференцированности гистограмм для Нижнего Поволжья такова, что оптимальным оказалось окно 30×30 км [Флоренский, Петренко и др., 1976]. Эти размеры палеток, сопоставимы с величиной наиболсе часто встречающихся в осадочном чехле и кристаллическом фундаменте структурных элементов. По результатам вычислений строились карты коэффициентов корреляции (рис. 5, 6). Сравнение карт с исходными данными показало, что новые карты отличаются характером распределения аномальных зон и тем самым содержат в себе новую комплексную информацию о геологической структуре изучаемых регионов.

Геологические факторы, обусловливающие гравитационные и магнитные поля, не тождественны, связь их между собой различна в участках с разным геологическим строением. Даже в самых простых случаях, когда гравитационая и магнитная аномалии вызываются тем же геологическим телом, например интрузией основных магматических пород, связь между ними не имеет линейного характера. Поэтому, строго говоря, анализ связи между геофизическими полями — процесс, где исследователь сталкивается со многими противоречиями. По тем же причинам геофизический, весьма информативный материал еще далеко не исчерпан и допускает новые геологические построения, в первую очередь на базе новых, комплексных методов обработки материалов. Именно на таком, принципиально новом, уровне находится задача количественного сопоставления геофизических полей и на этой основе --- формализованного районирования территории. В качестве одной из количественных оценок могут служить, как показал В. И. Шрайбман, коэффициенты корреляции, определяемые по программе «Анкор».

Ниже в качестве примеров дается анализ корреляционных связей между геологогеофизическими и космическими материалами для двух районов — Нижнего Поволжья и Средней Азии.

Нижнее Поволжье

Центральную часть анализируемого района (см. рис. 3) занимает Доно-Медведицкая гряда, смыкающаяся с Приволжской возвышенностью, которая достигает высоты 300 м и является водоразделом бассейнов рек Медведицы и Иловли. Правый берег Волги возвышается над урезом воды на 100—150 м. Такие различия рельсфа слабо видны на космическом снимке и на схеме фотоаномалий.

В геологическом отношении район является пограничным между Воронежской антеклизой и Прикаспийской впадиной. Выходы коренных пород почти всюду скрыты почвой, сельскохозяйственными угодьями и не отражаются на космических снимках. В пределах района в своде Линевского поднятия обнажены каменноугольные породы, перекрытые юр скими, меловыми, палеогеновыми, а на левобережье Волги — четвертичными осадками.

На схемах амплитуд неотектонических движений, составленных А. В. Цыганковым [1971] и В. П. Бухарцевым [1973], выделяется субмеридиональная полоса, соответствующая в структуре фундамента Уметовскому грабену и Камышинскому выступу (рис. 7). Здесь за четвертичное время произошел максимальный размыв древних отложений, достигающий на севере, в районе Линевского поднятия, 1000 м. На космическом снимке (см. рис. 3) и особенно на схеме фотоаномалий (см. рис. 4) эта зона выделяется темным фоном и, следовательно, наибольшими значениями эквиденсит. Левобережье Волги является областью длительного прогибания и на снимке отличается более светлыми тонами. На западе находится переклинальное окончание Воронежской антеклизы, где фундамент залегает на глубине 2,5 км, а на юго-востоке — склоны Прикаснийской впадины с погружением фундамента на глубину 10—11 км. В центральной части проходит Саратовское ответвление Пачелмского авлакогена. Фундамент склона Воронежской автеклизы, вскрытый глубокими скваживами, детально изучен на кафедре петрографии МИНХиГП под руководством В. П. Флоренского [Флоренский и др., 1950; Богданова и др., 1971]. На юго-западе региона в составе фундамента вскрыты архейские высокоглиноземистые гнейсы гранулитовой фации. На крайнем юго-западе они перекрыты протерозойскими филлитами, сланцами и метапесчаниками. Севернее вскрыто поле пород амфиболитовой фации (биотит-амфиболовые гнейсы, микроклиновые граниты и пр.) с реликтами пород гранулитовой фации в условиях амфиболитовой. Крупный массив архейских гранитоидов вскрыт на севере района. В его центральной и восточной частях фундамент глубоко погружен, слабо разбурен, и о его составе и структуре можно судить лишь по косвенным геофизическим материалам. Предполагалось, что в центральной части залегают разуплотненные гнейсы, переработанные свекофено-карельской складчатостью [Неволин, 1971; Гафаров, 1976]. О структуре докембрийского фундамента юговостока района, в Прикаспийской впадине, высказаны лишь схематические предположения.

Детальный анализ гравитационного поля показывает, что на исследуемой территории оно в основном положительно, но в северо-западной области более интенсивно, зато слабо дифференцировано, а в юго-восточной — менее интенсивно и сильно расчленено. Граница между областями резкая и совпадает с бортом Прикаспийской впадины. В правобережье Волги по характеру гравитационного поля выделяются три участка. В пределах Прикаспийской впадины мелкие отрицательные высокоамплитудные аномалии вытяпуты субпараллельно ее границе.

Сопоставление фотоаномалий с гравитационным полем (см. рис. 6) дает объективную характеристику взаимосвязи двух полей, оцененную количественно. Корреляция между полями невысокая, колеблется в пределах $\pm 0,7$ и лишь на отдельных участках возрастает до $\pm 0,9$. Однако в основном по ее знаку удается выделить отдельные зоны. По центру территории протягивается широкая (60—70 км) субмеридиональная полоса положительной корреляции, на юге раздваивающаяся на субширотную и субмеридиональную ветви. На этой полосе в районе Камышинского выступа и к северо-востоку от Кудиновского поднятия корреляция возрастает до $\pm 0,98$. Второй участок положительной, корреляции находится на северо-западе и примерно соответствует восточному склону Воронежской антеклизы. Зоны отрицательной корреляции на востоке характерны для левобережья, где на отдельных участках коэффициент корреляции достигает — 0,95. Это позволяет четко разделить район по характеру связи гравитационного поля с оптической плотностью на три субмеридиональные зоны и ряд подзон.

Магнитное поле дифференцировано слабо, но и оно, с одной стороны, позволяет судить о составе пород фундамента, а с другой, — используя также фотометрическую характеристику территории, проводить районирование.


Рис 7 Схема неотектонических движений за четвертичное время (по А В Цыганкову [1971])

1-5 амплитуды воздымании (в м) 1 + 1000 - 800 - 2 - 800 - 600 - 3 - 600 - 400 - 4 - 400 - 200 - 5 - 200 - 0 - 6 - 8 - амплитуды погружений (в м) <math>6 - 0 - 200 - 7 - 200 - 400 - 8 - 400 - 600 - 9 - изолинии амплитуд неотектонических движений <math>10 - флексуры 11 - разломы - 12 - пойма Волги

Центральную часть региона занимает субмеридиональная полоса отрицательной корреляции магнитного поля с оптической плотностью Эта полоса совпадает с зоной положительной корреляции фотоаномалий и гравитационного поля Однако другие участки имеют более сложную и дифференцированную рисовку в частности, область положительной корреляции совпадает со склонами Воронежской антеклизы, левобе режье Волги также характеризуется положительной корреляцией оптической плотности с магнитным полем

При сопоставлении гравитационного и магнитного полей Нижнего Поволжья уста новлено, что участки положительной и отридательной корреляции на схеме имеют мозаичное расположение, но если участки положительной корреляции изометричны, то отрицательной, как правило, вытянуты Так как и гравитационное и магнитное поля в исследуемом районе обусловлены в основном составом и рельефом фундамента, то можно предположить, что эти же факторы находят свое отражение и на представленной карте Сравнение схемы корреляции и структурной карты по поверхности фундамента по казало лишь слабое сходство в рисовке изолиний глубин залегания фундамента и изо линий коэффициентов корреляции Можно считать, что построенная схема почти не отра жает структуру поверхности фундамента В то же время при совмещении схемы коэф фициентов с петрографической схемой дорифейского фундамента [Богданова и др, 1971] отмечается совпадение местоположения как отдельных интрузивных тел, так и по лей распространения определенных комплексов пород [Флоренский Петренко и др 1976]

Схема корреляции магнитного поля с гравитационным позволяет выделить на юго западе района субмеридиональную полосу, совпадающую с зоной наибольшей опти ческой плотности Основные направления простирания корреляционных аномалий совпа дают с направлением аномалий оптической плотности Область положительной корре ляции геофизических полей на западе относительно темная, а участки отрицательной корреляции геофизических полей на востоке светлые Таким образом, корреляция раз личных геофизических полей, а также геофизических полей с оптической плотностью дают

дополнительную геологическую информацию, которую можно использовать при текто ническом районировании территории

Итак, сравнение схемы фотоаномалий с комплексом первичных геолого геофизиче ских материалов позволяет районировать Нижнее Поволжье по характеру намеченных связей Анализируя полученные результаты следует отметить что на изученной терри тории в фотометрической характеристике космических изображений находят свое отра жение не столько поверхностные геологические объекты, сколько региональные тектони ческие элементы строения как всей осадочной толщи, так и фундамента

Выделению линеаментов посвящено множество работ, поэтому мы только коротко опишем их, и то лишь постольку, поскольку линеаменты связаны с картами фотометри ческой характеристики и с картами корреляции

На телевизионных мелкомасштабных изображениях с аппаратов серии «Метеор» и других выделяется субмеридиональный линеамент, отвечающий здесь общему направ лению русла Волги, а в геологическом плане — северо западному борту Прикаспийской впадины Намечается также второстепенное, по отношению к меридиональному, северо восточное направление линеаментов

На снимках со спутника «Ландсэт 1» (см рис 3) и со станции «Салют 4» линеа менты читаются совершенно по иному Отмеченный меридиональный линеамент, напри мер, почти не просматривается, от него сохранились лишь прямолинейные участки пра вого берега Волги Однако удается выделить ряд других, менее значительных систем линеаментов (рис 8) Из них наиболее заметен северо восточный линеамент, пересекаю щий снимок В западной и центральной частях снимка к нему приурочена гряда облаков, ему соответствует известная в этом районе граница перепада погоды, совпадающая со структурным направлением на Новоузеньский и Федоровский выступы фундамента, к нему же приурочено расширение водохранилища в устье р Еруслан Остальные линеа менты выражены на снимке в виде очень тонких линий изменения фототона, лишь часть из иих удается отождествить с прямолинейными долинами рек и ручьев Такие линеа менты не всегда совпадают с геологическими границами на местности

После выделения линеаментов независимо на обоих снимках, а затем также пезави симо разными геологами (В П Бухарцев, А С Петренко, П В Флоренский и др) была сделана попытка соотнести их положение с градиентами геофизических полей, структу рой поверхности и составом фундамента

При этом уверенно выявилась связь северо западных разломов с градиентами гравитационных и магнитных полей Два линеамента, отождествленные с разломами, образуют юго западный борт Саратовской ветви Пачелмского прогиба Другие, парал лельные им, разделяют выделенные выше блоки Северо западные линеаменты харак терны в основном для правобережья Волги, в левобережной части особенно заметны се веро восточные линеаменты, лишь один из которых прослеживается с правобережья Зона, разделяющая участки проявления преобладающих северо западных или северо восточных линеаментов в географическом плане соответствует долине Волги

Таким образом, на изучаемой территории выделенные линеаменты слабо контроли руют геоморфологическую структуру района. Не все из них фиксируются и в структуре осадочного чехла. Однако почти все наиболее заметные линеаменты, по видимому, конт ролируют степень метаморфической переработки фундамента, структуру его поверхности, а местами — границы разновозрастной дорифейской складчатости. Создается вле чатление, что неоднородности внутреннего состава фундамента оказываются теми слабыми местами, которые наследуют зоны слабых перемещений в течение всего плат форменного этапа, вплоть до новейшего времени Только тогда, когда перемещения эти унаследованы, однонаправленны и значительны, к линсаментам оказываются приуро ченными локальные структуры Там же, где перемещения по разлому разнонаправленны, образуется зона повышенной трещиноватости, которая контролирует коллекторские свойства С этой точки зрекия выделение подобных «разломов без перемещения» позво ляет уточнить положение трещиноватых зон с улучшенными коллекторскими свойствами Наличие трещиноватых зон подтверждается анализом дебитов воды, газа и нефти из скважия, пробуренных в зонах линеаментов на Жирновском, Линевском, Северо Доро жанском, Терсинском и других месторождениях В скважинах, которые находятся в совпадающих с выделенными линеаментами зонах линейно трещинных коллекторов или на расстоянии 0,5-1 км от них дебиты флюидов из девонских и каменноугольных отложений, как правило, в 2--3 раза выше, чем в скважинах, расположенных на значи тельном удалении от этих зон Полученные результаты позволяют рассматривать линеа менты, связанные с зонами трешиноватых пород, как дополнительный поисковый крите рий при разведке нефтяных и газовых месторождений



Рис. 8 Схема линеаментов, отдешифрированных на космическом изображении

Линеаменты 1— слабо выраженные, 2— хорошо выражсяные, 3— совпадающие с флексурами, 4— пойма Волги

В результате проведенного комплексного анализа разнородного материала удалось выделить на изученной территории ряд блоков с различными значениями оптической характеристики поверхности, геолого-геофизическими нараметрами И их соотношениями. Выделенные структурные элементы отличаются амплитудами неотектонических движений, различным характером гравитационного и

магнитного полей и изменением оптической плотности изображения. Но особенно четко выделить их позволяет парная корреляция указанных параметров. Использованный метод комплексной корреляции геолого-геофизических и фотометрических параметров оказался наиболее эффективным для районирования территории. В общем плане весь участок разделен на три субмеридиональные полосы: западную, соответствующую периклинальному замыканию Воронежской антеклизы, центральную и восточную, отвечающую западному борту Прикаспийской синеклизы. Эти полосы, в свою очередь, делятся по внутренней структуре фундамента на блоки, в ряде мест очерченные разломами. Комплексная геолого-геофизическая и фотометрическая характеристика этих блоков опубликована ранее [Флоренский и др., 1976; Геологическое..., 1978].

Западная полоса выделяется однородностью и повышенной напряженностью гравитационного и магнитного полей. На востоке она ограничена системой меридиональных и субмеридиональных разломов, видимых на космических снимках и совпадающих с высокоградиентными зонами и локальными аномалиями геофизических полей.

Юго-западный блок отличается субширотными геофизическими аномалиями и повышенной оптической плотностью. На Коробковском поднятии скважинами вскрыты глубоко метаморфизованные породы гранулитовой фации, слабо измененные процессами диафтореза. Локальные гравитационные аномалии соответствуют телам гранитоидов. На Кудиновской и Панинской структурах вскрыты более молодые — протерозойские филлитовые сланцы, распространяющиеся далее на запад.

Северо-западный блок отличается субмеридиональным простиранием геофизических аномалий и более светлой поверхностью фотоаномалий. В пределах Жирновской, Линевской, Северо-Дорожанской, Мишинской, Терсинской структур вскрыты диафториты гранулитовой фации.

Центральная, субмеридиональная зона отличается невысоким гравитационным и низким магнитным полями, а также отрицательной корреляцией между ними. По простиранию она особенно сильно расчленена серией разломов. Эти особенности не противоречат предположениям о том, что здесь присутствуют породы, подвергшиеся позднейшей переработке свекофено-карельской складчатостью [Гафаров, 1976], в результате чего они были разуплотнены и инъецированы интрузиями.

Средняя Азия

Работы здесь велись в региональном плане, и первый, пожалуй главный, вывод был для авторов весьма неожиданным и не соответствовал тому, что ранее предполагалось. Для Туранской плиты, взятой как единое целое, коэффициент корреляции между гравитационными и магнитными апомалиями невелик и составляет лишь +0,1. Но на фоне этого общего отсутствия связи сразу на всей территории можно выделить участки, где корреляционная связь между магнитными и гравитационными полями существует, причем она сложная и в разных участках существенно различная. Можно выделить участки, где есть высокая положительная или отрицательная корреляция. Это свидетельствует о разнородности Туранской плиты. Отсутствие корреляции также присуще строго определенным районам.

Анализ распределений коэффициентов корреляции как по всей территории в целом, так и по отдельным регионам (рис. 9—11) позволил судить о достоверности тех или иных предположений и о принципах их использования для районирования. На основании намеченных закономерностей территория была разделена по характеру корреляции и построены карты, которые соотнесены с известными геолого-геофизическими материалами, в первую очередь с региональными схемеми, данными сейсмических исследований и результатами глубокого бурения. Проведенный анализ позволил по-новому оценить построенные ранее структурно-тектонические карты и внести в них ряд дополнений.

Прежде всего был поставлен вопрос: что же определяет распределение коэффициентов корреляции в пределах как всей Туранской плиты, так и отдельных ее участков, является ли оно отражением уже известного фактора или несет новую, комплексную информацию? Анализ связей карт коэффициентов корреляции с картами магнитных и гравитационных аномалий, проведенный для Русской платформы детально, а для Туранской плиты выборочно, показал, что эти связи очень слабые и возрастают лишь в немногочисленных участках весьма высоких магнитных аномалий. Во всех остальных районах коэффициенты корреляции не превышают $\pm 0,3$, лишь изредка достигая $\pm 0,5$. Связь карты корреляции со структурой доюрской поверхности заметна в первую очередь, хотя эта связь невелика и неоднозначна. В зонах погружения доюрской поверхности преобладает отрицательная корреляция, в зонах воздымания — положительная. Обнаруживается аналогичная связь с картой поверхности фундамента: зонам погружения последнего соответствуют области отрицательной корреляции, хотя и не во всех районах.

Было проанализировано соответствие карт корреляции с геологическим возрастом и формационным составом доюрских пород, вскрытых нефтегазопонсковыми скважинами. Такие скважины бурят в областях как регионального воздымания, так и регионального погружения, однако лишь в первом случае — обычно на глубине 1—3 км -- они достигают доюрских отложений. Поэтому распределение скважин, вскрывших доюрские отложения, по Туранской плите неравномерное. Более 60% скважин пробурсно в области иоложительной корреляции, причем на участках, где коэффициенты корреляции >0,6 (при палетке 50×50 км), пробурено до четверти всех скважия. Что же касается распределения по возрастам, то скважины, вскрывшие пермо-триасовые отложения, пробурены в зонах с разной, но чаще с отрицательной корреляцией; скважины, вскрывшие гранитоиды, — в областях с отсутствием корреляции. Расположение большей части скважин, вскрывших основные или средние эффузивы триасового и пермского возраста, совпадает с линейными участками повышенной положительной корреляции. Эти общие соответствия карты корреляции гравитационного и магнитного полей с составом доюрских пород, вскрытых скважинами, учтены при районировании Туранской плиты.

Для всей территории плиты отмечено преобладание структур запад-северо-западного, мангышлакского и копетдагского простираний. Этим структурам соответствуют четко выраженные зоны высокой положительной корреляции. Территориально они отвечают Копетдагу, Бахардокской ступени, северо-восточному борту Карабогазского свода, Центральному Устюрту и ряду узких зон на Северном Устюрте, пересекающих Южно-Эмбенское поднятие Эти зоны разделены зонами отрицательной корреляции такого же запад-северо-западного простирания: Южно-Бузачинско-Барса-Кельмесского, Южно-Мангышлакско-Дарьялык-Дауданского, Большебалханско-Предкопетдагского. Их границы, по-видимому, связаны с известными разломами, а также с линеаментами, выделенными по мелкомасштабным космическим снимкам [Флоренский, 1973; Макаров, Соловьева, 1975; Геологическое..., 1978]. Чередующиеся вытянутые зоны положительной и отрицательной корреляции сменяют друг друга и напоминают волны с длиной 200—350 км. По-иному проявляется сопряженное с рассмотренным северо-северо-восточное простирание. Условные линии этого направления секут корреляционные аномалии, соответствуют их «пережимам», началам или окончаниям.

Более детально сопоставление корреляционного поля проведено для четырех зон Туранской плиты. Границы зон достаточно условны, однако составляющие их участки обладают определенным единством строения. Первая зона объединяет Северо-Устюртский и Южно-Эмбенский участки, вторая — Мангышлакский и Центрально-Устюртский, третья совпадает с Карабогазским участком, в четвертую входит Каракумский участок с Бухарской ступенью.

Мангышлак-Устюртский регион [Князев и др., 1972] отличается присутствием плащеобразно залегающих мощных красноцветных пермо-триасовых отложений, среди которых на доюрскую поверхность изредка выходят налеозойские породы. Эта область при корреляционном анализе условно разделена на северный участок (Южно-Эмбенское поднятие и Северный Устюрт) и на южный (Мангышлак и Центральный Устюрт).

Для северного участка распределение коэффициентов корреляции асимметрично: зон с высокой отрицательной корреляцией больше. Последним отвечают, как правило, области, где залегают мощные линзы триасовых толщ, лишенные эффузивов. По мере увеличения окна палетки площадь отрицательной корреляции сокращается, что свидстельствует об уменьшении ее определяющей роли по мере увеличения площади обобщения и может объясняться выклиниванием осадочных линз на большой глубине. Скважины, вскрывшие дотриасовые породы, не имеют четкой приуроченности к корреляционным аномалиям. Докембрийские глубоко метаморфизованные породы, вскрытые в скважинах Базайская, Жумагул, Казалой, находятся в области близнулевых значений корреляционного поля.

Площадь зон положительной корреляции невелика. С увеличением окна палетки эти зоны почти не меняются, что говорит о стабильности факторов, их определяющих. Устойчивой положительной корреляцией выделяется Южно-Эмбенское поднятие северо-восточного простирания. При использовании палетки 30×30 км Северный Устюрт оказывается разбитым серией линейных зон положительной корреляции, которые субпараллельны Центрально-Устюртскому поднятию и соответствуют приразломным поднятиям или региональным разломам [Буш и др., 1975; Гаврилов, 1975]. При этом в скважинах Арыстан, Ирдалы, Байтерек и других, приуроченных к таким зонам, вскрыты основные эффузивы, вероятно, триасового возраста.

Экстраполируя полученные данные о связи корреляционных полей с составом вскрытых глубокими скважинами доюрских пород и учитывая общегеологическую структуру, можно уточнить геологическую карту доюрской поверхности Устюрта, более определенно ограничить зону распространения палеозойских пород на Южно-Эмбенском поднятии, докембрийских пород на Акулковском своде и принципиально по-новому наметить зоны распространения триасовых эффузивов основного состава. Если эти предположения верны, то основные эффузивы, приуроченные к запад-северо-западным разломам, достаточно широко распространены на Устюрте. Линейные зоны, содержащие их, повторяются через 100—120 км.

При использовании палеток любого размера корреляционное поле Мангышлак-Центрально-Устюртского региона оказывается резко отличным от других: эдесь аномально много участков с высокой положительной корреляцией. Это естественно, так как и геологически это наиболее апомальный район Туранской плиты. К Мангышлакско-Центрально-Устюртской системе дислокаций приурочены две уникальные структуры Туранской плиты — Каратауский антиклинорий и Центрально-Устюртские линейные поднятия, а к последним — одна из самых значительных магнитных аномалий. Каратауский инверсионный антиклинорий, являющийся мощной линзой триасовых пород и прогибом фундамента, отличается отрицательной корреляцией. По его южному борту, очсрченному Южно-Мангышлакским пермо-триасовым прогибом, тянется однородная зона отрицательной корреляции. Напротив, самая высокая положительная корреляция характерна для вытянутых Центрально-Устюртских поднятий. Степень положительной корреляции и площадь, занимаемая ею, даже растут по мере увеличения окна палетки. Здесь, помимо палеозойских и декембрийских осадочных и метаморфических пород, распространены и эффузивы среднего и кислого состава. Чрезвычайно устойчивая положительная корреляция, а также высокая положительная магнитная аномалия, характеризующие Центральный Устюрт, позволяют предполагать, что к этому участку приурочено весьма значительное внедрение основной магмы, а может быть, и линза ультраосновных пород.

Карабогаз-Каракумская область [Князев и др., 1972; Буш и др., 1975] отличается разнородностью движений и разнообразием структурных элементов и типов доюрских пород, поэтому слабая дифференцированность корреляционного поля для этой территории была неожиданной. Отдельно проанализирована северо-западная карабогазская часть и юго-восточная, отвечающая Каракумскому своду и Бухарской ступени. Характер корреляционного поля этих районов оказался сходным (и практически не зависящим от размера палетки). Здесь преобладают зоны весьма низкой корреляции (±0,3).

Рис. 9. Распределение площадей с разной корреляцией в зависимости

- а от коэффициента корреляции, б от окна палетки.
- f Южная Эмба и Северный Устюрт; II Мангышлак и Центральный Устюрт; III Карабогазский свод, IV — Каракумский свод и Бухарская ступень





Рис 10 Схема корреляции гравитационного и магнитного по ки Турэнской плиты

1.037.5 Палетка 30×30 км. Изолиник коэффициентов коррезии питерзазы зна чений коэффициента корреляции $I = < -0.9/2 \cdots > (6.0/0.9)/3$ (06) (-06) = 4 - (06 - 09)5 — > +09 На врезке - схема линеаментов

которым соответствуют Каракумский и Карабогазский своды, сложенные гравитоидными и метаморфическими породами

llpн этом с юга регион очерчен липейной зоной весьма высокой положительной кор реляции отвечающей Колстдагу к которой примыкает линейная Северо Балханская Предкопетдатская весьма протяженная зока отрицательной корреляции отвечающая. прогибам, где доюрские породы глубоко погружены. Другая линейно вытяпутая зопаустойчивой положительной корреляции очерчивает Карабогазский свод с севера и вос-



Рис 11 Схема корреляции гравитационного и матнитного полей Туранской плиты Палетка 100×100 км. На врезке — схема линеаментов. Условные обозначения см. на рис 10

тока Ей отвечает система разломов. Не исключено, что внедрившиеся тела ультра основных пород определяют существование этой аномалии

Ряд изометричных также вытянутых на северо запад и запад северо запад анома лий положительной корреляции отвечает Бахардокской ступени. Марыйскому выступу Чарджоуской ступени. Здесь везде скважинами вскрыты породы вулканогенно молас совой формации. [Кпязев и др., 1972], содержащей основные эффузивы. Таким образом при геолого структурных построениях для Карабогаз Каракумской области намечаются в общем те же соотношения с полем корреляции как и на севере. Зоны отрицательной корреляции фиксируют области прогибания зоны с высокой положительной корреляциен очерчивают присутствие на поднятиях основных магматических пород и разломов Что же касается зон отсутствия корреляции, то они, как и на Акулковском своде, отвечают срединным массивам, сложенным в основном гранитоидными и метаморфическими породами.

Проведенное с помощью ЭВМ сопоставление космической, геологической и геофизической информации позволяет сделать ряд следующих выводов о методике комплексного использования разнородных данных для изучения глубинного строения древних и молодых платформ. Эти выводы также освещают некоторые новые черты внугреннего строения платформ

1. Использование коэффициентов корреляции для оценки взаимосвязи космических и геолого-геофизических данных, построение карт коэффициентов корреляции дают возможность проводить районирование территорий платформ, уточнять геологическое строение глубоко погруженных горизонтов.

2 Применение программы «Анкор» для оценки характера взаимосвязи полей позволяет разработать программную часть системы комплексной обработки космотсо погической информации. Успешная работа системы возможна при хорошем аппаратурном оснащении, позволяющем автоматизировать процесс ввода и вывода массивов данных, а также совмещение со служебными и сервисными программами и системами.

3. Приведенный комплекс материалов о глубинном строении участка Нижнего Поволжья позволяет соразмерить информативность космического изображения и других источников, показать, что аномалии оптической плотности взаимосвязаны с характером неотектонических движений, с гравитационным и магнитным полями и с особенностями соотношения этих полей.

4. Предлагаемая методика обработки и обобщения геолого-геофизического материала, результаты непосредственного изучения керпа фундамента нозволили наметить черты тектонического строения Нижнего Поволжья. Показана одна из сторон связи характера фотоизображения и особенностей глубинного строения района, осуществляемой через неотектонические движения, наследующие, очевидно, компенсационное воздымание разуплотценных зоп фундамента, которые четко прослеживаются по геофизическим полям.

5. Выделяемые по космическим снимкам лицеаменты совпадают, как правило, с разломама фундамента и с зоцами высокой трещиноватости каменноугольных и девонских карбонатных пород и определяет объем дебитов в скважинах, пробуренных в линейнотрещинных зонах. Это позволяет рассматривать линеаменты как дополцительный признак при поисках месторождений пефти и газа

6. На Туранской плите области отрицательной корреляции гравитационного и магнитного полей изометричные или овальные. По мере увеличения окна палетки они сокращаются и наконец исчезают. Возможно, это свидетельствует об ограниченной глубине определяющих их тел. Эти зоны приурочены к мощным линзам осадочных пород и являются участками интенсивного погружения.

7. Овальные зоны высокой положительной корреляции в отличие от области отрицательной корреляции сохраняются по мере увеличения окна палетки и даже увеличиваются в размерах. Это позволяет предполагать значительную глубину залегания порождающих аномалии геологических тел или даже поднятие субстрата основного состава. Они отвечают Южно-Эмбенскому и Центрально-Устюртскому поднятиям и Копетдагу и все имеют запад-северо-западное простирание.

8. Линейно вытянутые аномалии положительной корреляции имеют разное простирание, хотя преобладают запад-северо-западное, северо-северо-восточное и меридиональнос. Эти аномалии приурочены к отдельным участкам региональных разломов, большинство из которых было известно и ранее. Вблизи них вскрыты скважинами основные породы. Вероятно, это участки глубинных разломов, по которым внедрялись основные магматические породы в пермское и триасовое время.

 9. Области отсутствия корреляции приурочены к Карабогазскому и Каракумскому сводам.

10. Таким образом, областям с разным характером геологического развития отвечают разные типы соотношения гравитационного и магнитного полей. При этом в зонах, где активно проявлялись тектонические движения, корреляция высокая: отрицательная — в интенсивно прогибавшихся районах, положительная — там, где движения сопровождались магматизмом. Там же, где земная кора стабилизировалась, — в срединных массивах — корреляции между магнитным и гравитационным полями нет.

СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ КОСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ И КОСМОФОТОГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ

Как показано в предыдущих главах, материалы съемок Земли из космоса содержат информацию о структуре глубоких слосв земной коры. Это позволяет привлечь при региональном геологическом изучении территорий новый комплекс сведений, не использовавшихся ранее, и существенным образом уточнить прогнозы месторождений полезиых ископаемых. Однако традиционные геологические карты, составлявшиеся исключительно по данным наземных исследований, не всегда удобны для представления той новой геологической информации, которую приносят космические методы. Такое положение вызвало появление на свет нового семейства геологических картографических документов — космогеологических карт и нового вида региональных геологических работ космофотогеологического картирования.

Изучение геологической информативности материалов космических съемок показало, что в зависимости от уровня генерализации они содержат существенно различную геологическую информацию. Так, снимки континентального уровля генерализации (с разрешением на местности около 1000 м) помогают установить основные структурно-геологические особенности крупных областей земной коры, провести и уточнить объективное тектоническое районирование, наметить крупные глубинные структуры, геологическое значение которых в ряде случаев остается пока проблематичным. Снимки регионального уровия генерализации (сразрешением порядка 100 м) дают возможность выяснить делимость крупных регионов земной коры на структурные блоки, различающиеся характером тектонических структур и особенностями геологической истории, а также выделить новые, ранее не картировавшиеся элементы геологического строения, в том числе и глубинного (главным образом крупные разломы земной коры, дуговые и кольцевые структуры). Эти материалы позволяют провести или уточнить районирование территории по условиям формирования месторождений тех или иных полезных ископаемых. По сиимкам локального уровня генерализации (с разрешением в первые десятки метров) можно существенно уточнить структуру перечисленных выше элементов геологического строения и в ряде случаев оконтурить крупные естественно-генетические ассоциации горных пород. По особенностям тектонических структур и вещественного состава пород на этих снимках можно выдедять участки, благоприятные для концентрации полезных ископаемых. Строение таких участков может быть уточнено уже по МКС детального уровня генерализации и по материалам аэрофотосъемок.

Исходя из различий в информативности материалов космических съемок рассмотренных уровней генерализации, объединением «Аэрогеология» были разработаны основные положения методики построения космогеологических картографических документов по данным дешифрирования материалов космических съемок. Прежде всего данные дешифрирования различных видов снимков излагаются на различных видах карт геологического содержания. Преимущественно тектоническая и неотектоническая информация, содержащаяся на снимках континентального уровня генерализации, отражается на космотектонических картах масштаба 1 : 5 000 000—1 : 2 500 000. По данным дешифрирования снимков регионального и локального уровней генерализации строятся космофотогеологические карты масштаба 1 : 2 500 000—1 : 500 000. Наконец, результаты дешифрирования снимков детального (частично локального) уровня генерализации лучше всего показывать на обычных геологических картах масштаба 1 : 500 000—1 1 : 200 000, дополнив их легенду некоторыми специальными условными знаками.

Космотектонические карты строятся с целью дать новую интерпретацию тектонического строения региона на основе новых данных, полученных путем дешифрирования материалов космических съемок. Отсюда исходят и основные пути построения легенд космотектонических карт. В основу их обычно берутся легенды тех или иных тектонических карт изучаемого региона. Наиболее предпочтительны для этой цели карты регионально-тектонического районирования, поскольку последнее наиболее выпукло выступает на континентальных космических снимках. Тектоническая часть легенды космотектонических карт дополняется условными знаками, отражающими отдельные элементы дешифрирования — линейные, кольцевые, дуговые структуры (как правило, ранжированные по их геологическому значению), а также может содержать некоторые геофизические данные, отражающие глубину проникновения отдешифрированных структур в земную кору. Примером космотектонической карты может служить Космофототектоническая карта Арало-Каспийского региона [1978].

Космофотогеологические (ҚФГ) карты строятся для того, чтобы суммировать геологическую информацию, получаемую при дешифрировании матерналов космических съемок регионального уровня генерализации, и ввести ее в геологический обиход. Легенды КФГ-карт можно строить, руководствуясь двумя очевидными принципами, двумя подходами. Можно ограничиться анализом самого изображения. Элементы изображения при этом разделяются по геометрическим особенностям, надежности опознавания, виду применявшихся материалов, способам отражения в рельефе, ландшафте и т. д. Второй путь — интерпретационный: выделяются опознанные на снимках те или иные элементы геологического районирования или структур в традиционном их толковании, как, например, на Космофототектонической карте Арало-Каспийского региона. Оба подхода для КФГ-карт недостаточны: первый — по причине построения легенды по формальным признакам и недостаточной геологической ее содержательности, второй — потому, что легенда в основных своих чертах неизбежно повторила бы обычные легенды тектонических карт, лишь пропущенные через некий «фильтр», определяемый возможностями дешифрирования.

При разработке основных принципов легенд КФГ-карты была сделана попытка избежать недостатков обоих подходов. На картах показываются обнаруженные на космических снимках элементы изображения, геологическая природа которых устанавливается путем сопоставления с имеющимися геологическими материалами или предполагается по аналогии (так называемые космогеологические объекты) в их взаимоотношениях друг с другом. Таким образом, дана только геологическая информация, полученная по космическим снимкам, и карты в этом отношении являются «фактологическими». Целевое сопоставление новых данных с разнообразными геоморфологическими, геологическими, тектоническими, геофизическими, минерагсническими и другими построениями может быть проведено читателями карты.

КФГ-картирование представляет собой самостоятельный вид геологических исследований, цель которого — расшифровка глубинного геологического строения крупного (≥106 км²) участка земной коры на основе дешифрирования материалов космических съемок с использованием результатов геофизического зондирования и ранее полученных геологических материалов. КФГ-картирование заключается в геологическом дешифрировании комплекта материалов космических съемок разных уровней генерализации (преимущественно континентального, регионального и локального) и геологической интерпретации данных дешифрирования. При интерпретации используется вся имеющаяся геологическая, геофизическая и геохимическая информация, которая требуст переосмысливания (а геофизические данные - и переинтерпретации) в свете данных дешифрирования и является материалом, обосновывающим геологическое значение и характеристики выделенных при дешифрировании объектов и структур. Обычно КФГкартирование сопровождается относительно небольшим объемом полевых геологических и геофизических наблюдений с целью сбора материалов о поверхностном геологическом выражении наиболее типичных космогеологических структур. Цикл работ по составлению ҚФГ-карты занимает 2—4 года.

На КФГ-картах изображаются в основном те элементы геологических структур, которые дешифрируются на МКС разных уровней генерализации и получают ту иля иную геологическую интерпретацию. Такие космогеологические объекты разделяются на три основные группы: линейные, кольцевые и площадные.

К числу линейных структур относятся континентальные, региональные и локальные разломы разных рангов, в том числе разграничивающие тектонические и структурные блоки различных порядков или рассекающие их без существенной трансформации внутренней структуры. Многие разломы на основании данных дешифрирования могут иолучить геодинамическую характеристику. Часто предусматривается разделение разломов по надежности опознавания на снимках и регистрация глубины их проникновения в земную кору по данным геофизического зондирования.

Кольцевые структуры разделяются на главнейшие генетические типы: пликативные, плутонические, вулканические, диапировые, импактные и др. Тип кольцевых структур определенным образом коррелируется с их поперечником и глубиной заложения в земной коре. На КФГ-карты выносится также регистрационный материал по выражению кольцевых структур в особенностях аномального геомагнитного и гравитационного полей, а также по способу отражения кольцевых структур в рельефе и ландшафте (поднятия, депрессии, кольцевая гидросеть и т. д.). Своеобразная группа кольцевых структур отражает не вскрытые на дневной поверхности или погребенные под молодыми осадками геологические тела: крупные массивы плутонических пород, вулканические сооружения и очаги, поднятия кристаллического фундамента платформ или складчатых зон и т. п.

Площадные космогеологические объекты разделяются на две основные категории. Первую представляют формационно-структурные комплексы, обладающие определенными характеристиками изображения на материалах космических съемок. Такие комплексы распространены преимущественно в горно-складчатых областях и отвечают основным структурным этажам земной коры: кристаллическому фундаменту — «гранитный» слой; разновозрастным складчатым комплексам с различной морфологической характеристикой складчатости, развивающейся в толщах различного литологического состава, — верхи геофизического «сранитного» слоя; покровным комплексам, представленным недислоцированными или слабо дислоцированными чехлами плит или вулканическими покровами.

Совершенно новые возможности открывает реальность прямого картирования на региональных и локальных космических снимках сочетаний формационных типов горных пород со степенью и характером их дислоцированности. Это направление исследований имеет глубокие корни в самом понятии «геологическая формация», тесно увязывающем вещественные свойства горных пород с тектоническими особенностями их формирования. Вспомним, например, что флишевым толщам свойствен определенный, ни в каких других формациях не повторяющийся стиль дислокаций; для континентальных вулканических формаций известково-щелочного ряда характерны вулкано-тектонические кальдерные и вулкано-плутонические структуры; геосинклинальные карбонатные толщи обычно образуют грубо покоробленные массивы, аналогичные по структуре таковым в варисцийских, ларамийских и альнийских складчатых системах; в зеленосланцевых толщах, как правило, развиты изоклинальная складчатость или чешуйчато-надвиговые структуры; офиолитовые толщи характеризуются шарьяжными и олистостромовыми структурами с протрузиями серцентинитов и т. д. Видимо, неотъемлемым свойством геологической формации, кроме положения в геотектоническом цикле, является и достаточно определенный характер дислоцированности слагающих ее горных пород. Можно говорить, очевидно, и о закономерных ассоциациях тектонических структур, или «тектонических формациях», и об их картировании, причем картировании, независимом от геологического. Этому направлению изучения формаций уделялось до сих пор относительно мало внимания.

Опытные работы, проведенные коллективом объединения «Аэрогеология», показали возможность выделения по МКС при КФГ-картировании закономерных сочетаний формационных и дислокационных особенностей горных пород в отдельных, зачастую ограниченных разломами тектонических блоках или зонах. В результате этих работ была разработана особая формационно-структурная легенда космофотогеологических карт масштабов 1 : 2 500 000—1 : 500 000. В разработке легенды участвовали В. Н. Брюханов, В. А. Буш, В. Е. Гендлер, Е. Л. Елович, С. П. Лебедев, Л. М. Натапов, А. Л. Ставцев, В. А. Фараджев, Н. И. Филатова и др.

Основное изобразительное средство карты — цвет использован для обозначения характера дислокаций, а вещественные комплексы, в которых дислокации проявлены, показаны крапом. Основные типы дислокаций и вещественных комплексов сведены в табл. 7. При этом рыхлые отложения могут быть дополнительно расчленены по генетическому принципу на морские терригенные, лагупно-морские галогенные, озерные, аллювиальные, аллювиально-пролювиальные, эоловые пески бугристые, эоловые пески грядовые, морсны и т. д.

Плутонические (нестратифицированные) комплексы разделены по составу на дунитгарцбургитовые, щелочно-ультраосновные, габбро-влагиогранитные, известково-щелочные гранитоидные, ультракислые субщелочные и щелочные. Состав пород показан цветом. Соотношение плутонических пород с вмещающими их структурно-вещественными комплексами показано различными типами «матрасной» окраски. По этому показателю выделены плутонические тела, вскрытые и не вскрытые на дневной поверхности, поля преимущественного распространения плутонических тел, прорывающих вмещающие толщи, и поля преимущественного развития вмещающих пород, инъецированных не выделяющимися при дешифрировании интрузиями.

Принципы построения легенды вещественно-структурных комплексов КФГ-карт масштаба 1:2 500 000-1:500 000

					Преобладающий вещественный состав (крап)										
					Осадочные										очно-
				HpoB	Платформенные, орогенные					Геосинклинальные				вулкацо- генные	
Преобладающий характер дислокаций (цвет)					Терригениые нерас- членениые	Терригенные серо- цветные	Терригенные пестро- цветные и красно- цветные молассы	Карбонатные	Соленосные	Территенные флише- вые и флишоидные	Карбонатные	Терригеныце грау- вакковые к аспадиые	Террягенныс я крсм- нистые жерасчлечел- ные	Терригенио-вулха- ногенные	Терригенно-вулка- ногенно-кремнистые
Ненарушенное горизонтальное A или слабо наклоненное залегание					A_2	A_3	A ₄	A ₅							
Складчатость	прерыви- стая	брахиформная диапировая сублинейная	B C D			B_3	B ₄ D ₄	В ₅ D ₅	С ₆ Д ₆	•					
	ажу. Я	пологонаклонные (до 15°) моноклинали	E			E ₃	E ₄	<i>E</i> ₅			E ₈				
	проме точна	гребневидная коробчатая	F G			F 3	F_4 G_4	F ₅ G ₅			F_8 G_8				
	полная	лицейная открытая (50—60°)	H							H,	H _B	H ₉	H ₁₀	H ₁₁	H ₁₂
		изоклинальная днегармоничная	I K						K ₆	$\frac{I_7}{K_7}$		1 ₉ K ₉	110	$\frac{I_{\rm ft}}{K_{\rm ft}}$	I ₁₂ K ₁₂
Дислокации	еские	первичные	L												
	нулкано тектони	переработанные блоко- во-складчатыми движе- ниями	М												
	адчато- ирывные	мозаичные блоково- складчатые	N	:			N ₄	N ₅			N ₈	,			
	CKJ Pa3	чешуйчато-надвиговые	0			<i>O</i> 3	04	05		07	08	0 ₉	0 ₁₀	011	O_{12}
	сложные, верасчлененныс Р сложные глубоко метаморфи- зованных толщ														

Матрица из строк и столбцов табл. 7 должна быть «заселена» реально существующими сочетаниями формаций и дислокаций в диагональной полосе от левого верхнего угла (сочетание рыхлых нелитифицированных осадков с горизонтальным залеганием) к нижнему правому (сочетание глубоко метаморфизованных толщ с овоидными структурами глубинпой складчатости или нерасчлененными сложными дислокациями). Фактически добиться этого удается лишь в ограниченной мере. Причин этому по меньшей мере две: во-первых, в легенде в один ряд поставлены дислокации собственно тектонического происхождения с дислокациями вулкано-тектонического и метаморфогенного типов; во-вторых, пока не существует достаточно надежно разработанной классификации реально встречающихся в природе ассоциаций складчатых и разрывных структур, отражающей в определенной последовательности историко-тектонический процесс усложнения внутренней структуры слоистых толщ литосферы. Предложенный способ

_	Преобладающий вещественный состав (крап)																						
	Литифицированные										Me	таморфич	еские	ты, чарнокиты, сы, чарнокиты, болиты) иты, сланцы члененные члененные									
	Вулканогенные									Умеренно мета- Глубоко метаморфизо-													
	Платфој	рменные	е Геосиякликальные				морфизованные			ванные			l										
-	{елочно-базальто- выс	Трапновые	. Известково-щелоч- яые нерасчленение	Кислые (трахили- паритовые, липари- то-дицитовые)	Средние и основные (андезито-базальто- вые)	Островодужные (андезито-базальто- вые)	Контрастные (спи- лито-кератофиро- вые)	Толентовые (спи- лито-диабазовые)	Зеленосланцевые апотеррисенные	Зеленосланцевые аповулканотенные	Мраморо-сланисво- кварцитовые	Лейкократовые (гранито-гнейсы, кристаллические сланцы)	Меланожратовые (гнейсы, чарнокиты, амфиболиты)	Гнейсы, мраморы, кварциты, сланим	Нерасчленениые								
						H ₁₈	H ₁₉	H ₂₀	H ₂₁	H ₂₂	H ₂₃			:									
						K ₁₈	I ₁₉ K ₁₉	I ₂₀ K ₂₀	J ₂₁ K ₂₁	I ₂₂ K ₂₂	1 ₂₃ K ₂₃	-											
	L ₁₃	L ₁₄	L ₁₅ M ₁₅	L ₁₈ M ₁₆	L ₁₇ M ₁₇	M 18		}															
		N ₁₄				N ₁₈	N ₁₉	N ₂₀															
						<i>O</i> ₁₈	0 ₁₉	<i>O</i> ₂₀	O_{21}	O ₂₂	O ₂₃												
						ų	P _{ig}	P ₂₀	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄ R ₂₄	P ₂₅ R ₂₅	P ₂₆ R ₂₆	P ₂₇ R ₂₇								

является лишь первой попыткой такого рода и, безусловно, нуждается в дальнейшей теоретической и практической разработке.

То же касается и классификации вещественных комплексов. Кроме намеченной в основных чертах естественноисторической последовательности смены геосинклинальных формаций (субокеанических) формациями континента (орогенными и платформенными), приходилось учитывать реальные возможности дешифрирования вещественного состава на космических снимках и вводить такие нестрогие в формационном смысле понятия, как карбонатные отложения вообще или сероцветные терригенные шельфовые отложения.

Вторую категорию площадных объектов составляют различного рода тектонические блоки, выделяемые по особенностям фотоизображения и (или) по характерным ассоциациям дешифрируемых на снимках линейных и кольцевых структур с учетом направления структур и количества на единицу поверхности. Такие участки на территориях платформ обычно отвечают в различной мере поднятым или опущенным блокам фундамента, а в горно-складчатых блоках — поперечной структурной зональности, как правило не отражающейся на существующих геологических и тектонических картах. Такие тектонические блоки могут быть показаны на КФГ-картах различного рода штриховками.

Методика КФГ-картирования в областях распространения платформенного чехла требует особой разработки. Дешифрирование платформенных линейных и кольцевых структур само по себе дает весьма значительный прирост геологической информации по сравнению с традиционными геолого-геофизическими построениями. В то же время площадные космогеологические объекты, образуемые вешественно-генетическими подразделениями верхней части чехла плит, как правило, связаны с геолого-геоморфологическим строением недислоцированных покровных отложений и не раскрывают глубинной структуры платформенного чехла и кровли складчатого фундамента. В этих случаях целесообразно составлять для территорий плит две КФГ-карты: карту рыхлых отложений осадочного чехла (по данным дешифрирования площадных космогеологических объектов и геолого-геоморфологической и неотектонической их интерпретации) и карту по результатам дешифрирования линейных и кольцевых космогеологических объектов на основе тектонической интерпретации геолого-геофизических данных о глубинной структуре плит. В качестве основы космогеоструктурных карт целесообразно взять структурные карты в изогипсах с раскраской по глубине залегания кровли фундамента или наиболее изученного горизонта осадочного чехла, переинтерпретированные с учетом расположения отдешифрированных линейных и кольцевых структур. Особыми знаками может быть показана геолого-геофизическая информация, известная по данным предшествующих исследований и раскрывающая природу отдешифрированных линейных и кольцевых структур (оси антиклиналей и синклиналей, ундуляции их шарниров, расположение локальных структур осадочного чехла, магнитовозмущающих тел в фундаменте и т. д.).

Таким образом, КФГ-карты содержат наряду с известной геолого-геофизической информацией также принципиально новые сведения. На КФГ-картах более полно, чем на обычных геологических, отражается глубинное строение земной коры, а также поверхностной геологической структуры. Это и определяет большую ценность КФГ-карт для прогнозно-металлогенических построений, поскольку традиционные их методы основываются преимущественно на вещественном составе геологических тел, а структурные особенности расположения этих тел в пространстве учитываются в меньшей мере.

Опыт применения КФГ-карт при прогнозных и поисковых работах показал возможность с новых позиций осветить закономерности размещения минерального сырья, наметить новые зоны, перспективные для поисков рудных месторождений, нефти, газа, каменного угля и других полезных ископаемых. Проведенные в таких зонах специальные поисковые работы, при которых использовалось дешифрирование детальных космических снимков и аэроснимков, а также геологические работы с использованием вертолетов уже привели к открытию ряда перспективных рудопроявлений, представляющих объекты для детальных поисков и разведки. Кроме того, КФГ-карты представляют собой основу для новых тектонических, историко-геологических и научных построений, углубляющих наши знания о геологическом развитии Земли.

ПРОБЛЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ

Геологические карты — это итоговые документы исследований, концентрирующие сумму геологических знаний о соответствующих регионах.

Легенды и принципы составления геологических карт, принятые в СССР, в целом соответствуют принципам и методике, разработанным В. Смитом, Ж. Кювье, Ал. Броньяром и Ч. Лайелем в 1790—1830 гг. и лежащим в основе современного международного геологического картографирования. В легендах современных геологических карт сохраняется противоречие между способом изображения осадочных и плутонических формаций: цветовая закраска полей распространения осадочных комплексов указывает на время их формирования, тогда как для плутонических пород она отражает их состав. Однако возрастная закраска осадочных формаций доминирует на геологических картах, поэтому они являются прежде всего геологорическими.

Первые материалы дистанционных исследований земной поверхности — полученные в конце XIX и начале XX в. с аэростатов, а позднее с дирижаблей и самолетов фотоснимки — показали широкое распространение разрывных нарушений, не изображавшихся на существовавших тогда геологических картах, а также динамическое единство большинства дешифрируемых на снимках нарушений. Уже тогда появились замечательные работы В. Хоббса [Hobbs, 1904, 1911], заложившие основы изучения разрывной тектоники. Однако эти результаты, улучшив качество геологических карт и топографической основы, на которой они составлялись, не изменили их существа.

Та информация, которую дают космические снимки, ведет к полному преобразованию методики мелкомасштабного геологического картографирования. До сих пор единственно реально возможным путем составления мелкомасштабных геологических карт было суммирование и обобщение результатов средне-и крупномасштабных геологических съемок (а раньше — материалов маршрутных исследований). Составление сводных геологических карт и листов Геологической карты СССР масштаба 1 : 1 000 000 основывалось (и сейчас основывается) на сведении воедино результатов геологических съемок масштабов 1 : 200 000 и 1 : 50 000. Эти карты, построенные в результате обобщения материалов различных исследователей, собранных в разные годы, представляют собой модели строения земной поверхности, на основе которых планируются дальнейшие исследования, проводятся прогнозные оценки регионов на различные типы минерального сырья, составляются тектонические и металлогенические карты. Появление материалов космических съемок впервые позволило сопоставить эти модели с прямой, независимой и объективной информацией.

Результаты такого сопоставления, как правило, оказываются малоутешительными. Мы провели детальное сопоставление материалов космических съемок и сводных государственных геологических карт масштабов 1:1000000 и 1:200000, а также более мелкомасштабных карт для территорий Большого и Малого Кавказа, Тянь-Шаня, Памира, Туранской плиты. Выяснилось, что более половины геологических контуров, изображенных на геологических картах, не находят никакого соответствия на космических снимках Земли и, наоборот, более половины линейных и площадных геологических структур, отчетливо дешифрируемых на космических снимках различных типов, никак не отражены на существующих геологических картах. Даже гигантские пластины и блоки плутонических пород основного состава (габбро и габбро-амфиболитов), целиком слагающие приводораздельную часть Большого Кавказа — хребет Чимгисклде, не изображены и не показаны ни на одной геологической карте (включая и листы геологических карт масштабов 1:200.000 и 1:50.000) и вообще ни на одной геологической карте Кавказа, изданной за последние 50 лет. Эти структуры были относительно точно откартированы лишь Ф. Ю. Левинсоном-Лессингом в 1909-1910 гг., затем забыты и вновь открыты при дешифрировании космических снимков. В легендах существующих геологических карт нет унифицированных знаков для изображения геодинамической природы разрывных нарушений — раздвигов, пологих поддвигов и шарьяжей; нет знаков для изображения линеаментов неясной тектонической природы, концентрических структур, сутурных зон складчатых областей, олистостромовых комплексов, меланжа и многих других важнейших геологических объектов, как правило хорошо дешифрируемых на космических снимках.

Изложенное показывает, что необходима ревизия существующих геологических карт с обязательным исправлением по данным дешифрирования космических снимков наиболее грубых ошибок в рисовке геологических контуров. Карты должны составляться на космофотоосновах соответствующих масштабов, выполненных в проекциях составляемых карт, с широким использованием данных дешифрирования имеющихся космофотоснимков, высотных и обычных аэрофотоснимков, космофотосхем, космофотокарт и других дистанционных материалов.

На мелкомасштабных геологических картах целесообразно показывать реально залегающие на поверхности геологические тела и комплексы, включая четвертичные отложения. Карты, на которых четвертичные отложения условно сняты, могут составляться как дополнительные.

На мелкомасштабных геологических картах должны быть объективно отражены системы главнейших линейных дислокаций, дешифрируемые на космических и других дистанционных снимках, с указанием динамики движений. Зоны раздвигов, левых и правых сдвигов, сбросов и взбросов, крутых и пологих надвигов, шарьяжей должны показываться специальными, отчетливо читаемыми на картах обозначениями.

На геологических картах необходимо показывать специальным знаком концентрические структуры, дешифрируемые на космических снимках и аэрофотоснимках. Для типизации структур и определения времени их формирования рекомендуется применять методику конседиментационного анализа мощностей одновозрастных отложений внутри дешифрируемых концентрических структур и вне их пределов. При нартировании складчатых областей (и складчатого фундемента илиформен ных областей) деласообразно особенно наглядно выделять гланиейшие сутурные зоны, маркируемые офиолитовыми и веленосланцевыми формационными комплексами (последние, как и плутонические формацие, слевует выделять цветом). Должна быть огражена объективная информация о отруктурном положение этих комплексов к налозвлениях ладения их тектопических контактов.

Олистостромовые комплексы складчатых областей, которые обычно можно дешифрировать на коемических и высотных снимнах, на геомогических картах лучше эсего показывать яркам цветным храном по основной закраске, соответствующей возрасту олистостромовых формаций. Рекомендуется тщательно их индексировать по узким интераалам времени, соответствующим эпохам формирования соотостром, как вравното кратковременным.

Необходимо проведение исследований по корреляция формы выходов из поверхность плутонических гранитовдных массивов с петрохимическими данными об их составе (подробное см. ниже). Особо нажным в металлогеническом отношении представляется зыделение на картах плагиогранитовых, тонклыг-трондьемитовых, банатитовых, иснчонитовых, нордмаркитовых, здамеллитовых, грейзеловых, петочно-гранитовых, Ромоскевитовых, иордмаркитовых, здамеллитовых, грейзеловых, петочно-ультраословных влуголических комплексов и химберлитовых ассоцианий пород.

Мелкомасштабные теологические карты, составленные на основе дешифрирования дистанционных данных, будут более объективными, тоячыми, детельными, чем сущелтвующие карты. Они дадут материал для составления новых картт техтовических в неотектринческих, металлокосных хонцектрических структур, металлогонических. ¹⁴ аличие чозыя карт возволит полное и успешиее прогнозировать месторождения положимых искобнемых, даст новый важный имтериал, необходимый при гидрогослогических и изженерно-геологических исследованиях, будет способствовать делонейских развитию теоретической геология.

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПРИ СТРУКТУРНО-ТЕОЛОГИЧЕСКИХ БЕСЛЕДОВАНИЯХ

Всажожности использования влогозональных азображевий Земли, толученных со спутника «Ландеэт-1», их информатилность в разных слектральных диапазонах уже обсуждалясь вами (Пания, Скобелев, 1976; Геологическое..., 1978). Сейчас накопился новый и более полный материал, эснованный на дешифрировании снимков, сделанных многозональными фотокамерама МКФ-6 с космического корабля «Союз-22» и МКФ-6М с орбитальной стакции «Салют-6». Ниже рассматриваются особенности примесения этих многозональных сеников на примере тестового участка, охватылающего западную и цен трамьную части Памяро-Тяньшавьеного сближения — Памиро-Алей (рис. 12, 13).

Северная граница участка проходит по зоне Южно-Ферганского разлома, огделяющего новейний (N—Q) свод Алайского хребть от Ферганской владяны и каркирустся крупными конусэми вынося. Южная граница проходит южнее зоны Северо-Памирского вадвига.

Центральную часть снимка закимает Алайский хребет, который на юго союри зелся с Алайской долиной -- межгорной впединой, разделяющей новейшие мегасаеды Тянь-Шаня к Памира Рена Кызынсу, смещенная на востоке, в шировой части Алайской долины, к северу, занаднее пропытивает себе киньонообразное русло (до 500 м шириной) на краях сводов Памира и Гянь-Шана и служит их остественным разделом. Считоется, что в этой части пространственно совмещаются зоны Южно-Тяльшаньского и Бахшекого так называемых глубинных, ным краевых, разломов. Последний сбычко считают радвитом.

Сложенные разпообразными породами, в основным палеозойского возрасти, относяцимаея к классу геосинкланальной формация. Северный Памир в Южный Тань Швис образуют силадчатые сооружения, которые имеют общие черты строения "Мушкесов, 1915; Нализкия, 1926; Марховский, 1935; Тубин, 1960].

На снимке исображена то часть Памиро-Алая, вля которой наиболее характерны карбонатно-главнскые толяца силура – девоны (для Алая) и карбона – верми (для Памира). В меньшой степени развиты вулканогенно-территенные к вулканоссиные породы нарбона – перми (по переферин Алая и отчасти в центре) и вулкьногенно терри генные триас-юрские толяци (по седерному краю Памира). Различиемые на снимках изтрузивные мессивы на южном борту Алан представляют собой субвулканические линосси. 52



Рис. 12. Фотоснимок Памиро-Алая, сделанный камерой МКФ-6 с космического корабля «Союз-22» В верхнем левом углу — конусы выноса в долине р. Сох, в верхнем правом — Алайская долина

ные тела позднего палеозоя. Шарьяжные пластины составляют основной элемент структуры Памиро-Алая. Собранные в пакеты пластин, они образуют каркас новейшей структуры — складки основания [Шульц, 1948], в соответствии с которыми деформируется мезозойско-кайнозойский покров. Палеозойские своды Памира и Алая разделены полосой деформированных в альпинотипную структуру мезозойско-кайнозойских, исключительно осадочных пород, слагающих Заалайский хребет — внешнюю фронтальную часть Северного Памира. На эту структуру по Северо-Памирскому надвигу надвинуты палеозойские толщи Памирского свода, который перед своим фронтом сминает толщи мезозоя—кайнозоя, надвигая их по Вахшскому надвигу [Губин, 1960] на отложения предтяньшаньского борта Алайской долины.

Для сравнения информативности использовались цветные (синтезированные из трех) и черно-белые отпечатки снимков в шести диапазонах, увеличенные по сравнению с оригиналом в 2, 4 и 6 раз.

Литологическая контрастность различных по возрасту комплексов пород наряду с их значительной (до 200—500 м) мощностью позволяет достаточно уверенно различать их на космических снимках [Трифонов и др., 1973; Геологическое..., 1978], выделять внутри комплексов маркирующие горизонты и посредством этого достаточно уверенно расшифровывать геологическую структуру.

На синтезированных изображениях отчетливо выделяются комплексы пород с разной цветовой гаммой. Цвето-тоновая характеристика нижнемеловых красноцветов, обнаруженных вдоль южного подножия Алайского хребта (так называемый гиссарский тип отложений), на снимках практически не отличается ни от карбонатно-глинистых толщ верхнего мела—палеогена, ни от четвертичных образований (в том числе лёссов и лёссовидных суглинков), мелкоземы которых заведомо обогащены карбонатным материалом, поскольку непосредственно связаны с разрушением исходного комплекса пород. В то же время «гиссарская фация» красноцветов резко отличается от одновозрастных «внешне-памирских» образований [Губин, 1960], для которых исходными были в первую очередь породы вулканогенно-осадочных красноцветных толщ мынтекинской и сорбулакской серий (T—J)] [Борнеман, Овчинников, 1936]. При этом вблизи карбонатно-глинистых палеозойских толщ Северного Памира наблюдается заметное посветление в окраске нижнемеловых красноцветов «внешнепамирского» типа (см. рис. 12). Космические снимки в данном случае подтверждают резкое фациальное различие молассовых толщ



Рис 13 Схема дешифрирования снимка

1 — снег и облака, 2,3 плейстоцен-голоценовые образования 2 — аллювнально-пролювиальные, 3 — преимущественно пролювиальные, 4 - моренные толщи среднеплейстоценового оледенения, 5 - пролювиальноделювиальные я лёссовые тол щи среднего плейстоцена, 6 неоген четвертичные конгломераты бактрийского (N₂-Q) ком плекса, 7 - мелпалеогеновые образования, 8 — вулканогенно-терригенные толщи «мынтгекинской свиты» (Р-J), 9 — палеозойские (PZ₂) образонания многеосинклинального (карбонатно-терригенного) ряда, 10 поздненалеозойские (PZ₃) вулканогенно терригенные образования, 11 - гранитоиды позднепалеозойского возраста, 12 — геологичсские грани цы, 13, 14 — фотомаркирующие разновозрастных горизонты толш, 15 — разломы с неустановленным характером переме щения, 16 — сбросы, 17 — над виги, 18 — троговые долины, 19 — пролювиальные конусы вы носа, 20-22 - комплексы да леозойских отложений с различ ной окраской толщ, соответству ющих различным формационным тинам отложений

«гиссарского» и «внешнепамирского» типов, т е резкое различие и разобщенность источников сноса

Более метаморфизованные породы мезозоя — кайнозоя северной окраины Памира по окраске на снимке ближе к палеозойским вулканогенным и метаморфическим толщам Алайского хребта и Северного Памира, чем к одновозрастным образованиям в южных предгорьях Алая Гранитоидные интрузии позднего палеозоя на склонах Алайского хребта практически идентичны по цвету нижнемеловым песчаникам в Заалайском хребте. Карбонатно-глинистые и терригенные образования миогеосинклинального ряда содержат мощные карбонатные толщи, рассеянные примеси карбонатного материала и поэтому имеют более светлую окраску. Весьма характерно, что обогащенные карбонатами делювиальные плащи подчеркивают различие между существенно глинистыми и существенно карбонатными пачками Наконец, образования финальной серии геосинклинальных толщ с кислыми гранитоидными интрузиями и субаэральным вулканизмом, в основном средним и кислым, имеют, как правило, более интенсивные темные красноватые тона, чем молассовые толщи

Это различие обусловлено разной степенью окисленности железа, входящего в состав мелкоземов грубообломочных осадочных вулканогенно-осадочных образований, а также в глинистые породы [Наливкин, 1956] Мало измененные закисные и окисные формы железа придают породам темные оттенки, тогда как многократно переотложенное и осажденное в водной среде лимонитизированное железо придает им светлую (на синтезированных в красных цветах снимках желговатую) окраску Это отчетливо проявляется в выведенных на дневную поверхность и образующих одни и те же элементы рельефа палеозойских образованиях Памира и Тянь-Шаня Не меньшую роль в цвето-тоновой характеристике дешифрируемых комплексов играет и примесь карбонатного материала, как правило рассеянного в массе глинистых пород или входящего в состав мелкоземов осадочных груботерригенных разностей

Слоистые толщи, кроме того, приобретают осредненную окраску за счет делювиальных плащей из наиболее легко разрушаемых пород (например, серых сланцев) Если мощности различных по цвету и прочности пород значительно (в 2—3 раза) превышают разрешение снимка, то в условно-цветных и черно-белых изображениях они дешифрируются по особенностям цвета и микрорельефа Делювиальные плащи, по-разному смещенные в зависимости от микрорельефа, в деталях могут искажать изображение геологических границ, что, однако, не мешает выявлению основных черт геологической структуры Так, различные по цвету геологические образования приводораздельной части Заалайского хребта отождествляются с покровными пластинами нижнемеловых красноцветных песчаников, залегающих на верхнемеловых темно-серых глинисто-карбонатных толщах

Наибольший эффект синтезированные крупномасштабные космические снимки МКФ-6 дают при изучении современной структуры, позволяя решить достаточно сложные задачи В этом случае благодаря своей обзорности снимки выступают как новый высокоэффективный вид информации о напряженной альпинотипной складчато-разрывной структуре и глубоко расчлененном рельефе

В западной части Заалайского хребта на снимках отчетливо видно, как белые (палеоген — верхний мел) и темно-красные (нижний мел) контрастные толщи образуют систему складок и разрывных дислокаций В этой системе гипсоносные толщи приурочены к сильно пережатым синклинальным частям структуры (на снимках видны переходы от нормально залегающих верхнемеловых—палеогеновых карбонатно-глинистых гипсоносных толщ в зоны тектонического дробления) Нижнемеловые толщи песчаников, слагающие деформированные антиклинали, надвинуты вдоль оси к северу на смежные синклинали Нижнемеловые песчаники нередко образуют бескорневые пластины, как бы плавающие на верхнемеловых—палеогеновых отложениях Предполагалось [Губин, 1960, Захаров, 1970], что гипсовые тела зоны Вахшского надвига представляют собой днапиры тыловой зоны растяжений пластин, выжатые по надвиговым плоскостям, которые фиксируют предположительно юрскую галогенно-глинистую толщу, служащую основой для скольжения пластин и пакетов нижнемеловых песчаников Метасоматическое замещение карбонатов гипсами и насыщение пород растворами гипса и соли были достаточно изучены в Таджикской депрессии Н Ф. Ломоносовым [1971]

Описанные в геологической литературе как две дихотомирующие складки [Григорьев, 1949, Поршняков, 1973], выполненные отложениями мезозоя — кайнозоя, эти структуры четко прослеживаются на снимках южных склонов Алайского хребта, а их рисунок определяется сочетанием рельефа с надвигами толщ палеозоя на мезозойско-кайнозой-

ские. Структуры представляют собой эрознонно расчлененные надвиговые пластины, в которых сорванные своды антиклиналей, сложенные породами палеозоя, перекрывают синклинали, выполненные мезозойскими толщами.

Если элементы стратифицированных толщ распознаются на снимках достаточно отчетливо, то выявление интрузивных массивов вызывает значительное затруднение. Например, субвулканические линзовидные тела щелочных гранитоидов южного склона Алайского хребта имеют сравнительно небольшие размеры, что при наличии относительно изометричной (чаще в виде вытянутых брахител) «слоистости», обусловленной точечно-полосчатым рисунком микрорельефа, делает их мало отличимыми от тектонических структур. На наш взгляд, такой рисунок свидетельствует о динамометаморфической природе или по крайней мере о переработке подобных гранитоидных массивов. Эффузивно-вулканогенные толщи имеют сходный микрорельеф, но полосчатость приобретает значительную линейную вытянутость.

По-видимому, для картирования гранитоидных массивов и метаморфических сланцев большое значение имеют различия увлажненности залегающих на них рыхлых отложений и растительного покрова, которые существенно проявляются лишь в летний период. Поэтому для картирования интрузивных массивов и других геологических образований. индикатором которых служит почвенно-растительный покров, оптимальным в аридных областях типа Средней Азии будет такой подбор космических изображений, при котором обеспечивается наибольший контраст почвенно-растительных сообществ, т. е. комплекс летних снимков.

Высокое разрешение снимков, полученных с помощью камеры МКФ-6, позволяет уверенно выделять специфические морфогенетические образования разного возраста: ледниковые, аллювиальные, пролювиальные и другие в четвертичных отложениях; позднечетвертичные нарушения, в том числе и сейсмоактивные; структурные элементы мезозойско-кайнозойских толщ, перекрытых мощным (до 100—200 м) чехлом рыхлых четвертичных образований. По существу, это новая область применения космических снимковизучение современных геологических процессов как основа для некоторых методов поисков месторождений полезных ископаемых и инженерно-геологических изысканий

На западном окончании Заалайского хребта и несколько западнее, в восточной части хребта Петра Первого, отчетливо выделяются оползневые тела, длина которых составляет несколько десятков километров, а ширина — километры — первые десятки километров. Все эти тела приурочены к фронту надвигов или шарьяжных пластин и имеют ярко выраженное смещение в сторону молодых (четвертичных) впадин, заполненных среднеплейстоценовыми отложениями. При полевых исследованиях, проводимых с использованием аэрофотоснимков обычных масштабов или без снимков, как правило, фиксируются только более мелкие, осложняющие основное тело оползни и ступени.

Обратимся теперь к относительной геологической информативности снимков МКФ-6 в различных спектральных диапазонах. Выполненные исследования подтверждают основные закономерности отражения геологических объектов орогенических областей, выявленные на сканерных изображениях, полученных со спутника «Ландсэт-1» в различных зонах спектра [Панин, Скобелев, 1976]. Вместе с тем обнаружен ряд новых особенностей.

Наименьший объем геологической информации, на наш взгляд, содержится в диапазоне 460 — 520 нм. В этом диапазоне выделяются коренные образования (темный тон) и плащ рыхлых четвертичных отложений с развитым на нем почвенно-растительным покровом. Светлым, почти белым тоном отличаются эти образования, приуроченные к речным долинам и перигляциальным областям. На равнинных участках четвертичные образования не дифференцируются по морфогенетическим типам и характеризуются таким же темным тоном, как и коренные породы горного сооружения.

На изображениях в диапазоне 520—560 нм четвертичные образования начинают дифференцироваться по литологии как в горных районах, так и на прилегающей равнине. Выделяются слабо дислоцированные коренные образования с различной увлажненностью. В следующей зоне спектра (640—680 нм) дифференциация литологических разностей четвертичных отложений усиливается. Выделяются морфогенетические типы аккумулятивного рельефа. Улучшается выраженность разных по водонасыщенности пластов коренных пород, четче обозначаются литологические разности коренных образований в горной части района.

Таким образом, снимки, сделанные в видимой части спектра, могут использоваться при инженерно-геологических, гидрогеологических и других поисковых работах, в которых важное значение имеет литологический состав образований на поверхности Земли. В спектральной зоне 700—740 нм ландшафтный рисунок поверхности наименее дифференцирован. Четвертичные образования сохраняют относительно светлый тон изображения, а водотоки рек и обильно увлажненные аллювиальные отложения становятся темными. Основная информация снимков относится к крупным морфоструктурным элементам рельефа, которые отражают глубинное строение территории. Поэтому снимки в этом спектральном диапазоне целесообразно использовать при различных неотектонических и тектонических исследованиях, при сейсмотектоническом районировании территории и т. п.

На снимках в диапазоне 790—890 нм отчетливо выражены микро- и мезоформы рельефа, геологическое строение горных равнинных участков. По информативности эти снимки близки к цветному изображению и содержат некую суммарную геологическую информацию о регионе. Более низкое разрешение, чем в видимой зоне 600—700 нм, делает их несколько менее удобными для работы в масштабах крупнее 1:500 000.

Таким образом, снимки в разных спектральных диапазонах несут специфическую геологическую информацию. Сопоставление этой информации и получаемой с синтезированных условно-цветных или кодированных черно-белых изображений показывает, что суммарная информация, содержащаяся в синтезированном изображении, не равна сумме информаций с разноспектральных снимков. В общем спектрозональное синтезированное изображение создает некоторое преимущество в передаче и визуальном восприятии геологических объектов. Наиболее пригодны для обработки синтезированные снимки с цветопередачей, близкой к естественным цветам природных образований.

Специфика цередачи геологической информации снимками разных спектральных диапазонов, их высокая разрешающая способность делают материалы космических съемок типа полученных со станции «Союз-22» незаменимым источником геологической информации при геологосъемочных, геологопоисковых работах, а также при неотектонических и сейсмотектонических исследованиях. Применение этих материалов может также повысить эффективность интерпретации теофизических длиных. Особеяность фотоснимков с «Союза-22» — возможность денифрирования активных разломов, сложно дислоцированных отложений, комплексов измененных пород и гранитоидов.

Сделанные выше выводы и рекомендации справедливы не только для Памиро-Алая, но и для других орогенических областей. Космофотоснимки, сделанные с помощью камеры МКФ-6, позволяют выделять и изучать там множество разнообразных геологических объектов. Эти снимки могут быть рекомендованы в качестве основы для геологических исследований и разноцелевого картирования в геологии, для поисков месторождений полезных ископаемых, при изучении геоморфологии и современных геологических процессов в масштабах от 1:1 000 000 до 1:200 000.

Особое значение приобретают многозональные космические снимки при проведении поисковых работ на минеральное сырье. Они позволяют выявить структурную приуроченность тех или иных рудопроявлений, ограничить участки металлометрического опробования, геохимических поисков, валунного и шлихового опробования.

Известно, что месторождения минерального сырья приурочены к определенным типам осадочных или вулкано-плутонических формаций, слагающих крупные тектонические структуры земной коры. Они локализуются в более тесные парагенезисы с определенными ассоциациями горных пород, конкретными структурами (например, с гранитоидными массивами или массивами ультраосновных интрузий с характерными дайковыми комплексами, зонами контактовых изменений и т. п.) [Смирнов, 1969]. Цветовые отличия горных пород, зависящие от содержания литофильных элементов, проявляются на синтезированных изображениях в оттенках цветового тона, характеризующего формационный тип пород в целом. Использовать цветовые отличия выгоднее, чем оттенки черно-белого изображения, так как они на порядок лучше различаются глазом [Космическая..., 1975].

В районах, где горные породы в большей мере перекрыты почвенно-растительным покровом различной мощности, например в горно-таежных и степных, многозональная съемка приобретает еще большее значение. Изображения в инфракрасных диапазонах способны передавать различное состояние растительного покрова [Космическая..., 1975; Космическая..., 1979]. Поэтому синтезирование условно-цветных изображений из инфракрасного и других диапазонов. позволяет выделить участки, например, с угнетенной растительностью, на которых геоботанические поиски должны проводиться с металлометрическим и геохимическим опробованием, позволяющим локализовать участки с повышенным содержанием микроэлементов в почвах.

На многозональных снимках, как было показано выше, уверенно определяются генерации четвертичных образований, их генезис и источники сноса, что позволяет более точно проводить поиски россыпных месторождений.

выявление и картирование массизов плутонических пород. 9 их петрохвмеческая диагностика

Космоческие съемки дают общарный материал для изучения шаутонических млосьнов фанерозойских складчатых облистей и силидэетых сооруженой позанего докомбран. Монее отчетливо выявляются илутенические массилы в питах древних плотформ, где породы чешатали воздействие высоких давлений в температур. Поутонические формации существенно по разному высонцят на коомических симписа, силтых в различных слектральных диапазоках в разное время дии и года, в разных богодися условиях. Начбожее четко их гравицы зидны общино на симиках, выполненных в споктральных диагазоках 0.6 -0.7 и 0.7- 0.8 мам.

Тональность, карактеризующая плутовические моссные на восынческих синыхах, чаще всего отражает ве цвет горгых пород, которые их слагиот, и цвет придозерхностно измененных вород, кор вызотривания, груктов, почи, эзотительных сообщести, маркируюных эти массивы. Поэтому нередко плонзада распростривения меленократовых понод основного и ультраосноярого состава, ночти не нокущетка ристительностью, яштандыт HE COCMANECRESS CHEMIERS IN ROCMODOCOMORTARIAS CHATATCALLO GOLCE CACLERING, NEM DAOщаци широкого развчиня принятондных формалий. Это харантерио, в чистности, для космофотоскемы западыми вайонов США, гда области разватал эринцисканского комплехоа офиолитов, голубых и зеленых сленцов, горучахк, меланжа и опистостромов резно стин заются своем более светаля фототоком от расположенных востояное районов Касводных гор и Сьевра-Невады, виделикацияся на сканерных косминеские снимах со спусняков «Лавдеэт» более темким фототоном (ряс. 14). Позтому при переичной диал нострке возможного состева ллутонических массквов до денным носмнуютана съсмоя более вожную виформацию дест, как правило, язучение формы регодов илутопическах массивов на замлук зовержность, а цвет в фототен несут дополнительную, хоти к существскную анформацию.

Форма тел плутенических чассное и луякаютляутовическох вомаленсов тесно стязана с кристаллизацией всисства слутонов, с тооданямическими условиями их восцрения и аспытанными ими тектопическими деформацкими, с формой сроза тель научена, с его морфологическим выражением в рельефе и степенью облаженности. Но соотнешенею границ плутонов с дислоканиема имесснующих нород в по стелени дловобдованность тел плутенов средя массноов шлугочических нород можно выделять доскладчатые, свыка нематические и посткинежатические лаутоки. Особую группу представляют вэрывные комплеком, формирование которых может быть результегом как экзотензого воздействый (поделие метоорита, сериондсьный разыв), ток к эксотенных тренессов (трубки варыях, зруаствиме вулкано-плусонические структуры, делазаеновые «эрывные структуры). Для воримания геологического строевие смладчатых областей чрезевнойно важил янформация о сутурьна швах схладчатых областей, сложенных офиолатоными и зелсиославневыма формациямы и верегко обравляемых одыстострововыми комплексами. Кач привало, сусуреве чивы хорошо дешифовоуются на исхальных и десальных зосмических синчися, причем окасывается возможным значительно более точно, чем это свелено на существующих теалогаческих картах, прогоздить выходы на новерхность и обреденить структурное положение корнозых и бескорновых офисантовых алнохточных пластин. чевкуй и блоков з разрезах складчитых волсон.

Для перякчной дивіностики плутонических моссивов, дешифрируемых на хосмвнеских снимках, необходимо использование объективного отвестельно-морфилостоеского подхода. Сообенно это касается миссивов сранитондных дород о матсивов, о которых воследозатель но имеет примой геоголической и перрохимической информации. Висаривнимеск илутоны резко розличны то своей морфологии. Их изображения на снимках по форме моймо разделить на три большие группы — концентранскимо, брахиформио-удавненные и ливейные массивы. В каждой труппы — концентранскимо, брахиформио-удавненные и яняейные массивы. В каждой труппе для удобства морфологической диагнос тики изми начелены три подгрупны, кождоя но консрых разложена но четыре морфологических типа. Послением дань самостоятельные назвалия, отрежающие выеводе схол-

Рис. 14. Космофиторния запарной части США, смонтированной из сканорных синикон, чалученных в яндимой вриской части спритра в ангустя-- эктибри 1972 г.

Светини фотологом отнегляво прослеживанства поло Берентина хребтев и примикатива к нам с востояв долга в лепреоста. Он каракт-ризуется ималокия развитали порот францисковского концесси. Росположенные мотерине рабены Каскадиет, по в Снерра-Секада выделяются сомуой пологой тезов покрывающих призодорации. Наскадите сор. Козбты склиение относнуществение поуханисти оферменсостява и можнопровония граниторичан случение.





Рис. 15. Морфологические типы массивов гранитоидов (по данным дешифрирования космических снимков и мелкомасштабных аэрофотоснимков)

I — линейные плутоны: I.1 ~ I.4 — синкинематические массивы: I.1 ~ «эмея», I.2 — «гусеница», I.3 ~ «Аракон», I.4 — «корень», I.5 ~ I.8 — посткинематические массивы зон проплавления в раздува: I.5 ~ «стручок», I.6 — «бусы», I.7 – «четки», I.8 — «ожерельс», I.9—I.12 — посткинематические щелевые структуры эаполнения: I.9 — «игла», I.10 — «стрела», I.11 — «топор», I.12 ~ «клин». И брахиформные плутоны: II.1—II.4 — массивы заполнения (конформные): II.1 ~ «лук», II.2 ~ «

ство облика плутонов на космических снимках с предметами, животными или геометрическими фигурами.

В группе линейных плутонов (I) выделены подгруппа синкинематических массивов — «змея», «корень», «дракон», «гусеница» (см. рис. 15, I.I-I.4), подгруппа посткинематических массивов зон раздува и зон проплавления литосферы над «горячими точками» геологического прошлого — «стручок», «бусы», «четки», «ожерслье» (I.5-I.8), подгруппа посткинематических щелевых структур заполнения — «игла», «стрела», «топор», «клин» (I.9-I.12).

Группа брахиформных плутонов (II) состоит из подгруппы массивов заполнения (конформных) — «лук», «щит», «бумеранг», «седло» (см. рис. 15, II.1—II.4), массивов проплавления (дисконформных) — «амеба», «клякса», «мешок», «пень» (II.5—II.8), массивов зон взрыва и раздвига — «труба», «звезда», «лабиривт», «паук» (II.9—II.12).

В группе концентрических структур (III) выделяются подгруппа сводовых поднятий, включающая морфологические типы «круг», «овал», «шестигранник» и «восьмерка» (рис. 15, III.1—III.4), подгруппа массивов депрессионных структур — «кубок», «медуза», «тарелка», «кольцо» (III.5—III.8) и подгруппа массивов вихревых структур — «вихрь», «источник», «воронка», «конский хвост» (III.9—III.12).



«щит», П.3. «бумеранг», П.4.— «седло»; П.5.—П.8.— массивы проплавления (дисконформные): П.5.— «амсба», П.6. «клякса», П.7.— «мешок», П.8.— «пень»; П.9.—П.12.— массивы зон взрыва и раздвига: П.9.— «труба», П.10.— «звезда», П.11.— «лабиринт», П.12.— «паук». П. — кокцентрические к изометрические плутоны: ПП.1.—П.4.— массивы сводовых поднятий; ПП.1.—

III — концентрические к изометрические плутоны: III.1—III.4 — массивы сводовых поднятий: III.1 — «круг», III.2 — «овал», III.3 — «шестигранник», III.4 — «восьмерка»; III.5—III.8 — массивы изометрических депрессий: III.5 — «кубок», III.6 — «медуза», III.7 — «тарелка», III.8 — «кольцо»; III.9—III.12 — массивы вихревых структур: III.9 — «вихрь», III.10 — «источник», III.11 — «воронка», III.12 — «конский хвост».

Многие из выделенных морфологических типов массивов характерны для определенных петрогенетических тилов плутонических формаций со своей специфической металлогенией. На космических снимках хорошо прослеживаются сутурные зоны складчатых поясов и формационные комплексы субдукционных зон геологического прошлого. Направление первоначального наклона субдукционных зон фиксируется закономерным изменением состава к форм гранитоидных массивов: от вытянутых удлиненных форм плагиогранитных альбититовых массивов («змея», «дракон»), через черве- и бумерангообразные формы тоналитовых комплексов, приплюснутые амебообразные формы адамеллитовых массивов к трубчатым, строго овальным и концентрическим формам тел шелочных гранитоидов. Дешифрируемые на космических снимках формы тел гранитных плутонов позволяют делать предварительные прогнозы не только о химизме, но и о металлогенической специфике массивов. Так, в Кызылкумах к районам развития на поверхности или на исбольшой глубине адамеллитовых массивов (тип «амеба», рис. 16) иногда приурочено золотое оруденение, локализующееся в черносланцевой формации «пестрого бесапана», тогда как тоналитовые массивы (например, Бокалинский массив гор Букантау, тип «бумеранг», рис. 17) в этом отношении стерильны. Медно-порфировое и меднополиметаллическое оруденение связано обычно с гипабиссальными плутонами монцони-





Рис. 16. Мелкомасштабный высотный аэрофотоснимок центральной части гор Ауминзатау (Юго-Западные Кызылкумы)

Сложно изрезанная неправильная удлиненно-приплюснутая форма массива Ауминза в западной части горной гряды (тип «амеба») характерна для адамеллитовых массивов гранитоидов *Рис.* 17. Мелкомасштабный высотный аэрофотоснимок северной части гор Букантау севернее известняковой гряды Ирлир (Центральные Кызыл-кумы)

Удлиненная бумерангообразная, слегка изогнутая форма Бокалинскоготоналитового массива с правильными овально изгибающимися очертаниями характерна для многих тоналитовых массивов складчатых областей, обычно стерильных в отношении рудной минерализации, трассирующих зоны крупных и протяженных тектонических швов



Рис. 18. Космический снимок Кольского полуострова, полученный со спутника «Метеор-30» 16 августа 1980 г. в красной части спектра

В центральной части полуострова четко прослеживаются концентрические массивы апатитоносных нефелиновых сиенитов Хибинских гор

и широтно орнентированная цепочка овально-концентрических массивов щелочных гранитоидов — возможный след проплавления континентальной литосферы Балтийского щита при ее прохождении над «горячей точкой» — восходящей в геологическом прошлом струей дифференциатов мантийного вещества тового и сиенито-диоритового состава. С массивами такого типа, легко распознаваемыми на космических снимках (морфологические типы «гусеница», «корень», «дракон»), связаны крупнейшие медно-порфировые месторождения Чили, Перу, США, Мексики (Чукикамата, Эль-Теньенте, Эль-Сальвадор, Бингем), месторождения Малазийского медно-порфирового пояса на Филиппинах. К тому же типу относятся и многие месторождения СССР, в частности Алмалыкского рудного района Срединного Тянь-Шаня (Кальмакыр), Центрального Казахстана (Бошекуль, Коксей), Закавказья (Каджарак, Агарак).

Тип «амеба» характерен также для золотоносных адамеллитов Франции и запада США. Для типов «бусы», «четки» характерно заполнение лейкократовыми гранитоидами с оловорудной минерализацией (массивы Рудных гор, колымские, буреинские, сихотэалинские массивы, массивы Нигерии).

Особый интерес представляет тип «стручок», который часто фиксирует на снимках массивы апатитоносных нефелиновых сиенитов и щелочных гранитондов (иногда с медноникелевым оруденением). Эти концентрические массивы проплавления, протягивающиеся в виде закономерно ориентированных цепочек на Кольском полуострове (рис. 18), в районе Ветреного пояса Беломорья, в Финляндии, Швеции, Норвегии, а также в Южной Африке (провинция Карру, массив Инсизва), возможно, формируются в результате проплавления континентальной литосферы восходящими струями дифференциатов мантийного вещества, а их размещение маркирует направления перемещений литосферных плит над «горячими точками» мантии в геологическом прошлом.

Тип «мешок» характерен для тел сиенито-диоритов и их лейкократовых дериватов с развитием скарнового и грейзенового вольфрамового и молибден-вольфрамового оруденения (Срединный Тянь-Шань, Зирабулакские горы, Центральный Казахстан). Тип «труба» типичен для высокофтористых литиевых щелочных гранитоидов, часто с редкоземельным и тантало-ниобиевым оруденением.

Легко опознаются на космических снимках и офиолитовые комплексы различных металлогенических типов: 1) платиноносные формации, образующие своеобразные изометрические структуры, напоминающие на снимках груды перевернутых битых тарелок; 2) пластинообразные тела альпинотипных офиолитовых разрезов с хромитами в ненарушенных нижних гипербазитовых частях, с никеленосными корами выветривания на серпентинитах, с ванадием и титаном в клинопироксенит-габбровых частях разрезов; 3) мусорные зоны меланжа и олистостромовых комплексов, фиксирующие на космических и аэрофотоснимках границы между главными тектоническими единицами складчатых областей.

Изложенное показывает, что использование космических снимков для морфологической диагностики плутонических массивов дает геологам информацию, во многих случаях более объективную, чем информация существующих геологических и формационных карт. Она может и должна широко использоваться при любых петрологических и прогнозно-металлогенических исследованиях.

МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ Интерпретации космических снимков на примере алтая

Дешифрирование космических изображений среднего разрешения со спутников «Метеор» позволило́ выделить на территории Алтая несколько кольцевых мегаструктур диаметром 225—250 км, внутри которых отчетливо проявляются концентрические линии меньшего диаметра. Две такие кольцевые мегаструктуры — Алейско-Синюшинская и Теректинская — располагаются в бассейнах рек Иртыш и Катунь на территории Рудного и Горного Алтая. Первая имеет несколько меньший диаметр и как бы наложена на вторую (рис. 19).

На черно-белых снимках внешние границы кольцевых структур выглядят размытыми зонами более светлого фототона шириной 10—25 км. Так же выделяются два линейных разлома северо-восточного простирания, обнаруженные ранее по морфоструктурным данным и косвенным геологическим признакам [Диденко, Кочнева, 1975]. Внутренние концентрические линии кольцевых мегастуктур выглядят более четкими узкими полосами, разделяющими полосы с разноориентированными малыми формами рельефа, а на отдельных участках подчеркиваются дуговыми отрезками долин рек. Для обеих мегаструктур характерна разомкнутость колец в западной части региона, где отчетливо видно, как внешние дуги мегаструктур ограничиваются долиной р. Иртыш (Иртышским глубинным разломом).



Рис. 19. Схема металлогенической (геохимической) зональности Юго-Западного Алтая с элементами кольцевых мегаструктур (А) и гипсометрический профиль и геохимический разрез по линии I—I (Б). Составил В. Д. Баранов

1, 2 — дуги кольцевых структур: 1 — внешние, 2 — внутренние; 3 — линейные разрывные нарушения по геологическим данным; 4 — терригенные, карбонатно-терригенные формации, гранитоиды, безрудные, иногда с полиметаллической и золоторудной минерализацией; 5—10 — металлогенические (геохимические) зоны и подзоны с минерализацией; 5 — медной (а) и медноколчеданной (б), 6 — медно-свинцово-цинковой, 7 — свинцово-цинковой, свинцовой и железорудной, 8 — оловянно-вольфрамовой, молибден-вольфрамовой, редкометальные зоны, связанные преимущественно с калиевыми гранитами, 9 — золоторудной, 10 — медно-кобальт-никелевой с хромом, связавной с ультраосновным и основным магматизмом; 11 — сбазальтовый» слой

Нетрудно проследить положение отдешифрированных кольцевых элементов в рельефе Алтая. Внешняя граница Теректинской структуры отмечается хребтами Иолго, Самульгинские Белки, Кызылурт и долинами рек Ак-Алаха, Кара-Алаха, Урыль, Бухтарма. Эта граница несколько нарушается субширотным поднятием Северо-Чуйских Белков и Южно-Чуйского хребта. Внутренние концентрические линии Теректинской структуры совпадают с верховьями рек Катунь и Урсул. Внешняя граница Алейско-Синюшинской структуры перекрывает Теректинскую структуру и проходит по нижнему течению Бухтармы, хребтам Ульбинскому, Коргонскому, Бощелакскому. Внутренние кольцевые линии трассируют среднее течение р. Малая Ульба, хребты Коргонский и Тегерекский.

Анализ рельефа рассматриваемых структур показал, что каждая из них имеет ступенчато-блоковое строение с закономерным ритмичным повышением гипсометрических отметок с запада на восток. В Алейско-Синюшинской структуре они повышаются от 300 до 2500 м, а в Теректинской — от 500 до 3500 м. Высота (амплитуда) ступеней составляет 300—500 м. Максимальные гипсометрические отметки приходятся на центральные и восточные участки структур. Геоморфологически обе структуры образуют сложное Алтайское сводовое поднятие, состоящее из двух наложенных один на другой односторонних кольцевых горстов.

В геологическом строении кольцевые структуры проявлены не очень отчетливо. Их внешние дуги пересекают геологические образования Алейского и Синюшинского антиклинориев, Быструшинского и Белоубинского синклинориев в Рудном Алтае, Талицкого и Тегерекского поднятий и Коргонского прогиба в Горном Алтае [Атлас..., 1978]. Внешнее кольцо Алейско-Синюшинской структуры на отдельных отрезках совпадает с поперечными разломами субширотного и северо-восточного направлений, сквозными по отношению к структурно-формационным зонам Рудного и Горного Алтая. С простиранием внешней дуги совпадает зона распространения девонского андезитового вулканизма восточной части Рудного Алтая и Горного Алтая. К линии внешнего кольца тяготеют мульды, выполненные отложениями андезито-терригенной формации девона, наложенные на докембрийские образования Тегерекского поднятия.

При сопоставлении положения кольцевых структур с палеотектоническими схемами [Атлас..., 1978] видно, что наиболее устойчивые участки Алейско-Теректинского поднятия, охватывающего северо-западные части Рудного и Горного Алтая в раннедевонское время, вписываются в границы внешних дуг современных кольцевых структур. В раннедевонскую и, вероятно, силурийскую эпохи зоны орогенных на Горном Алтае и раннегеосинклинальных на Рудном Алтае прогибов с накоплением известково-терригенных алевролито-аргиллитовых отложений располагались по периферии дугообразных границ кольцевых поднятий. Конечно, в это время в конфигурации поднятий и прогибов существенную роль играли и прямолинейные разломы северо-западного и особенно широтного простираний, однако в целом Алейско-Теректинское и Талицкое поднятия представляли собой сочетание двух кольцевых конседиментационных горстов.

В позднеэмское—раннеэйфельское время, по данным палеотектонического анализа, Алейско-Синюшинская кольцевая структура была зоной концентрически расположенных подиятий и прогибов, где накапливались осадочно-вулканогенные толщи андезитового и липаритового состава. В последующие эпохи геосинклинального развития кольцевые элементы региональных структур все более затушевывались прямолинейно вытянутыми блоковыми приразломными структурами тила прогибов и поднятий. Вновь элементы кольцевого и концентрического строения проявились при образовании гранитоидных массивов. Особенно отчетливо это отмечается для собственно гранитной орогенной формации. Внутреннее кольцо Алейско-Синюшинской кольцевой структуры отражается в расположении нескольких таких массивов по бортам Белоубинского синклинория, выполненного отложениями базальто-липаритовой и флишоидной формаций девона.

Возраст магматических проявлений в Теректинской структуре более древний, чем в Алейско-Синюшинской. Это позволяет предположить разновоэрастность заложения и развития структур. Так, базальто-липаритовая, дацито-липаритовая и андезитовая формации Теректинской кольцевой структуры имеют возраст преимущественно эм-эйфельский, а Алейско-Синюшинской структуры — живетско-франский. Отмечается также более древний возраст некоторых массивов редкометальных гранитов по сравнению с таковыми в Алейско-Синюшинской структуре.

Структура гравитационного поля рассматриваемой территории характеризуется постепенным увеличением отрицательной аномалии силы тяжести в редукции Буге с запада на восток в соответствии с повышением гипсометрии рельефа и увеличением степени кристаллической зрелости земной коры. Структура этого изменения, представленная изолиниями гравитационных аномалий, в общем вытянутых в северо-восточном направлении, включает и дуговые элементы, приуроченные к участкам описываемых кольцевых структур. Некоторые структурные элементы поверхности Мохоровичича, выявленные различными исследователями [Щерба, 1975] путем интерпретации гравиметрических данных, также совпадают с положением кольцевых структур. На фоне погружения этой поверхности на юг и юго-восток от 42 до 55 км к периферии кольцевых структур происходит относительное увеличение мощности земной коры на 8—10 км. Увеличивается также мощность гранитно-метаморфического слоя и уменьшается — «базальтового». Структуры поверхности «базальтового» слоя практически не отражают положения кольцевых разломов, будучи вытянутыми с северо-запада на юго-восток и образуя чередование линейных прогибов и поднятий, ундулирующих по простиранию. По-видимому, «корни» кольцевых структур находятся в наиболее глубинных частях земной коры. Но эти весьма предварительные и общие выводы требуют уточнения в процессе специального изучения.

Региональное геохимическое картирование и статистический анализ всего фактического материала об эндогенных рудопроявлениях различного состава и масштаба показывает, что структура геохимической зональности Алтая характеризуется определенными чертами концентрического расположения металлогенических (геохимических) зон (см. рис. 19), контакты которых полого падают от периферии к центру в соответствии с общей структурой размещения магматических формаций [Овчинников, Баранов, 1974]. В центральной, ядерной части Алтайской металлогенической зоны выделяется область распространения железного и существенно цинково-свинцового оруденения, а ближе к периферии — комплексного медно-свинцово-цинкового, медного и медноколчеданного оруденения. Эти области сидерофильного и халькофильного оруденения, генетически связанного с базальт-липаритовым, дацит-липаритовым и андезитовым вулканизмом, окаймляются по периферии и сменяются на глубину оловянно-вольфрамовым (молибденвольфрамовым) и редкометальным оруденением, генетически связанным с нормальными и несколько повышенной щелочности гранитами натрий-калиевого типа.

Известная асимметричная линейная зональность Юго-Западного Алтая, выраженная в смене геосинклинальных и орогенных формаций и фаций с юго-запада на северовосток, в свете новых данных должна рассматриваться как дисимметрия в концентрической зональности Алтайской металлогенической зоны. Эта дисимметрия выражена, в частности, в закономерном изменении состава вулканитов базальт-липаритовой (дацит-липаритовой) формации от существенно натрового до существенно калиевого. Аналогично изменяется состав редкометальной гранитной формации [Щерба и др., 1979].

В соответствии с изменением состава магматических формаций происходит смена типов медного, полиметаллического и редкометального оруденения. В юго-западной части металлогенические зоны медного и полиметаллического состава относятся к колчеданному, иногда оловоносному типам, на северо-востоке эти зоны представлены малопиритовыми типами медных и свинцово-цинковых месторождений. Комплексные медно-свинцово-цинковые месторождения приурочены к юго-западной части металлогенической зоны. В составе редкометального оруденения, связанного с гранитным магматизмом, дисимметрия зональности проявлена в том, что с юго-запада на северо-восток парагенезисы сменяются от оловянно-вольфрамово-редкометальных (тантал — ниобий — цезий) до молибденово-вольфрамово-редкометальных (тантал — ниобий — редкие земли) [Щерба и др., 1979].

Учитывая пологое центростремительное падение металлогенических зон в соответствующих рудоносных формациях, пространственную модель металлогенической зональности можно представить в виде синклинальной структуры с последовательной сменой металлогенических зон по вертикали (снизу вверх: золото-сурьмяно-мышьяковая редкометальная — медно-полиметаллическая) и с их фациальным изменением с югозапада на северо-восток (дисимметрия). Элементы дисимметрии в зональности можно связать с палеосейсмофокальной зоной типа зоны Беньофа, разделявшей два блока земной коры, в герцинское время различавшиеся по строению: блок с континентальной или переходной корой на северо-востоке (Горный и Рудный Алтай, Калба) и блок с океанической или субокеанической корой на юго-западе (Чарская зона). При этом можно предполагать различие в скорости преобразования коры континентального и переходного типа: по периферии кольцевых структур процесс кратонизации (гранитизации) протекал интенсивнее, чем в их внутренних частях. Можно предноложить далее, что цилиндрические или конические рудомагматические системы, периодически выражавшиеся на поверхности то кольцевыми прогибами в стадии растяжения, то сводовоблоковыми поднятиями в стадии сжатия [Щерба, 1975], имели корневые очаги в сейсмофокальной зоне на разной глубине, что в большой мере определяло их магматическую и металлогеническую специализацию.

Влияние кольцевых разломов на масштаб концентрации оруденения можно оценить при рассмотрении размещения суммарных запасов меди, свинца и цинка в Рудном Алтае, где наряду с влиянием прямолинейных зон разломов очевиден элемент кольцевого периодического размещения зон с повышенными концентрациями металла.

Таким образом, структура геолого-формационного расчленения глубинного строения, металлогенической зональности и размещения рудных концентраций Алтая определяется сочетанием линейных и кольцевых зон разломов, дешифрируемых на космических снимках. По сравнению с поперечными разломами широтного простирания влияние кольцевых элементов структуры, возможно, является более общим, региональным [Овчинников, Баранов, 1974].

5"

СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ

Общие положения¹

Важнейшей областью применения космических снимков в орогенических областях является изучение структур фундамента, скрытых мезозойско-кайнозойскими толщами осадочного чехла. В зависимости от конкретной геологической обстановки и стиля дислокаций складок покрова, геофизической изученности территории прогнозирование глубинного строения на основе космических снимков может проводиться с разной достоверностью. Так, в Таджикской депрессии по геологическим данным предполагался значительный срыв по юрским соленосным толщам осадочного мезозойско-кайнозойского чехла с эпипалеозойского фундамента [Захаров, 1970]. Дискордантность структурных планов чехла и основания подтверждается магнитометрическими и гравиметрическими данными [Белеловский, 1964] и проявляется в рельефе подошвы земной коры [Кулагина и др., 1974]. Разномасштабные космические снимки отразили дискордантность разноглубинных структурных планов Таджикской депрессии, но в то же время показали связь складок основания и складок покрова и зависимость распределения последних от структуры основания [Макаров и др., 1974; Макаров, Соловьева, 1976; Геологическое..., 1978].

Комплексирование геологической и геофизической информации с дешифрированием разномасштабных космических снимков позволило более однозначно установить тектоническое соотношение Памира и Тянь-Шаня. Северная граница зоны их сочленения, по геологическим представлениям совпадающая с долиной р. Сурхоб-Кызылсу, образована двумя глубинными или краевыми разломами — Южно-Тяньшаньским и Вахшским. Первый из них проводится по правому борту долины Сурхоб-Кызылсу и трактуется обычно как глубинный, почти вертикальный, несколько наклоненный под Тянь-Шань дизъюнктив (взброс или сброс). На поверхности с этим разломом связывают границу комплекса в основном метаморфических палеозойских пород Тянь-Шаня и перекрывающих их по подножию Гиссарского хребта мезозойских отложений [Атлас..., 1968], а также почти километровый тектонический уступ, выраженный в рельефе [Чедия, 1972].

Вахшский надвиг [Губин, 1960; Суворов, Самыгин, 1965; Атлас..., 1968] проводится по левому борту долины р. Сурхоб-Кызылсу вдоль подножия хребта Петра Первого и отделяет так называемые внешнепамирские фации мезозойских отложений от гиссарских.

На мелкомасштабном космическом изображении долине р. Сурхоб-Кызылсу соответствует один линеамент. На крупномасштабных изображениях этого района, переданных со спутника «Ландсэт-1», структура читается очень отчетливо. Зона интенсивных дислокаций, выраженных малыми линеаментами, приурочены к северному склону хребта Петра Первого, где эти линеаменты практически совпадают с границами отдельных надвиговых (складчато-надвиговых) чешуй и приуроченных к ним оползневых структур [Скобелев, 1977; Скобелев, Флоренский, 1975]. В центральной части хребта, между Гармом и Таджикабадом (Хаит), линеаментная зона смещается к югу, к водоразделу хребта. Трапециевидная (в плане) форма зоны небольших по протяженности линеаментов наводит на мысль о наличии под этой частью хребта Петра Первого блока палеозойских пород Южного Тянь-Шаня. Это не противоречит и геофизическим данным [Кулагина и др., 1974; Кулагин и др., 1976]. На карте плотности сейсмического фона [Нерсесов и др., 1974] этому участку соответствует максимальная плотность очагов мелких слабых землетрясений. Это также подкрепляет наши предположения о существовании в этом районе резкой тектонической границы на небольшой глубине и гипотезу И. Е. Губина [1960]. Анализ скоростных разрезов и схем глубинного строения земной коры [Кулагина и др., 1974] и геологической природы выделенных по геофизическим данным структур показал, что горные породы Тянь-Шаня (скорость продольных волн V_p=5,3 км/с) смещены в сторону Памира и находятся на глубине около 5-10 км. Ниже их расположены горные породы, скорость сейсмических волн в которых близка к скорости их в комплексе палеозойских пород Памира (V_P=6,1 км/с). Эти образования выдвинуты к северу примерно до подножия Южного Тянь-Шаня (до Южно-Тяньшаньского разлома).

Таким образом, на основании рассмотренных данных фактически существующим в верхних горизонтах земной коры оказывается только Вахшский надвиг, который в поверхностной геологической структуре представляет собой сложную зону чешуй, а на

¹ Раздел написан С. Ф. Скобелевым.

глубине – некоторую границу раздела между осадочными толщами мезозойских пород хребта Петра Первого и палеозоидами Южного Тянь-Шаня, под которые поддвинут «Памирский» блок пород.

Южно-Тяньшаньский разлом в такой трактовке представляет собой поверхностную флексурную зону — крыло складки основания, осложненную на поверхности разрывами, сбросами в зоне горизонтального растяжения, которая отражает выступ мантийных пород под всей зоной сочленения Памира и Тянь-шаня. Это предположение удовлетворительно согласуется с результатами дешифрирования мелкомасштабных изображений, а также с тем, что породы Памира более метаморфизованы, чем породы Тянь-Шаня, что неоднократно отмечали многие исследователи, начиная с И. В. Мушкетова [1915].

Таким образом, изображения Земли из космоса в комплексе с геологической, геохимической и геофизической информацией позволяют проводить пространственную корреляцию структур во всем объеме земной коры. При этом космические изображения служат основой для изучения взаимоотношений структур в плане, тогда как информация, полученная наземными методами (в основном геофизические данные), характеризует глубины распространения деформаций [Геологическое..., 1978].

Для областей новейшей орогении в связи с особенностями геологического строения и практическима задачами целесообразно применение комплекса разномасштабных изображений Земли из космоса, с тем чтобы закономерности, познанные на отдельных тестовых участках, на которых возможно проведение комплексных геофизических исследований (например, в межгорных и предгорных впадинах), перенести в районы с более сложной геологической ситуацией, учитывая их специфику.

С помощью аэрокосмических снимков можно изучать парагенезисы складчато-разрывных структур и слагающие их формации горных пород. Геологические структуры на изображениях из космоса дешифрируются в большинстве случаев по комплексу признаков, которые не являются прямыми или косвенными в принятом при дешифрировании аэрофотоснимков понимании этих терминов, но в принципе непосредственно характеризуют геологическое строение отснятой территории. Существенной особенностью дешифрирования даже крупномасштабных космических снимков, имеющих высокое разрешение (20-100 м), является то, что такие признаки, как цвет породы, особенности ее макроструктуры и характер выходов на поверхность, т. е. признаки, обычно считающиеся прямыми при дешифрировании аэрофотоснимков, на космическом изображении проявляются достаточно редко. Значительно чаще дешифровочными признаками оказываются те свойства толщ, которые при полевых исследованиях относятся к косвенным характеристикам. Это характер делювия или элювия, микрорельеф, характер почвенно-растительного покрова, особенности мезорельефа и выраженность в нем тех или иных толщ, усредненные характеристики пород, входящих в состав этих толщ. Иными словами, это те признаки, из которых складывается облик значительных по мощности (обычно на порядок выше, чем предельное разрешение снимка) и состоящих из разных пород пачек, свит, серий и других литолого-стратиграфических подразделений [Трифонов и др., 1973; Геологическое..., 1978].

Для дешифрировання геологической структуры важным оказывается характер четвертичного и современного осадконакопления, поскольку благодаря последнему можно отличать синформные и антиформные структуры, впадины и поднятия. Зоны флексурноразрывных деформаций, нарушающие эти структуры, проявляются на космических изображениях любого масштаба в виде линеаментов и линеаментных зон, иначе говоря, в виде линейной упорядоченности структурных элементов земной коры. Но линейная упорядоченность структурных элементов не обязательно связана с разрывными деформациями, в большей степени она может служить выражением пластических деформаций — структур течения. На космических изображениях структурные рисунки такого типа наблюдаются в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня, Загроса, Сулейман-Кирхтарских цепей и в ряде других мест. Напротив, гомогенные древние кристаллические массивы щитов в районах с достаточно хорошей обнаженностью имеют на космических изображениях крупного масштаба полигональные рисунки, которые перемежаются с каплевидными и шевронными.

Подобные структурные рисунки пластических деформаций, но меньших размеров, характерны для метаморфических толщ высоких степеней метаморфизма. При этом полигональные рисунки отражают высокую степень гомогенности среды, тогда как шевронные — наличие тонкослоистых механических разнородных сред и обязательное присутствие прослоев повышенной механической жесткости. Кроме того, если первые характерны для заключительного этапа пластического течения горных пород в результате многократно повторяющихся тектонических нагружений, давления и температуры в течение длительного времени, т. е. связаны в основном уже с физико-химическими превращениями вещества, то вторые свидетельствуют о начальных стадиях пластического течения вещества, при которых возникновение множества сколовых поверхностей (так называемого кливажа скола вли кливажа течения) на следующей ступени увеличивает механическую пластичность толщ в зонах динамометаморфизма [Паталаха, 1970].

Структуры основания проявляются на поверхности Земли и соответственно на коемических изображениях различным распределением новейших отложений, областей эрозии и аккумуляции и различным, по упорядочяенным расположением структур покрова и других образований. Согласно принципу генерализации геологической структуры на разномасштабных изображениях отчетливо выявляются основные, определяющие современную геологическую структуру региона тектонические элементы земной коры, а также наложенные на них второстепенные структурные единицы. Последние нередко бывают выражены в структуре поверхности — мезоструктуре — более резко, чем ее главнейшие элементы, подобно тому как волны различной частоты, налагаясь друг на друга, или увеличивают свою амплитуду, или же уменьшают ее. При проведении геологических и геофизических исследований второстепенные, доступные непосредственному наблюдению наложенные структуры обращают на себя внимание четкостью выражения в деформациях поверхности и верхних слоев земной коры, в то время как более крупные элементы тектонического строения выявляются лишь в результате региональных обобщений, которые, как правило, сводятся к анализу пространственных взаимоотношений разновозрастных тектонических структур. В этой связи на современном уровне проведения региональных геологических исследований необходимо комплексирование данных наземных наблюдений с данными разномасштабных космических съемок. Последние позволяют непосредственно изучать тектонические взаимоотношения структур в пространстве по рисункам их пространственно-генетических ассоциаций, поскольку на космическом изображении земной поверхности независимо от исследователя уже зафиксирован результат взаимодействия множества элементов геологической структуры как развивающейся целостной системы. Однако решение задачи пространственной корреляции структуры с помощью космических изображений возможно только на основе системного подхода, который предполагает выделение главных и второстепенных делей исследования и в соответствии с этим анализ структуры системы, выделение ее главных и второстепенных элементов, их связей и взаимодействий.

Анализ систем предполагает также логический подход к исследованию, когда система берется в своей наиболее развитой фазе и из нее выделяются наиболее простые, всеобщие элементы. На космических изображениях такими элементами являются фотообразы основных форм рельефа, зон современной (и четвертичной) эрозии и аккумуляции.

Аэрокосмическое изображение отражает современную структуру поверхности Земли и земной коры. Это же состояние развития геологической системы отражают и структурные карты, построенные по геофизическим данным и данным бурения, а также собственно геологические и геоморфологические карты. Комплексирование данных о современной структуре позволяет получить наиболее полное представление о геологическом строенни земной коры региона и построить наиболее точную его модель, которая служит основой при различных палеогеографических и палеотектонических реконструкциях. Сопоставление результатов изучения современной структуры с историко-геологическими данными приводит к представлению процесса в его развитии и, следовательно, к более надежному прогнозированию определенных геологических ситуаций в зависимости от целей исследования.

Рассмотрим некоторые аспекты применения космических снимков при структурногеологических исследованиях в горно-складчатых областях на примерах северного горного обрамления Ферганской впадины и Северо-Востока СССР.

Разломы и офиолиты северного обрамления Ферганской впадины¹

Регион характеризуется сложным геологическим строением, различным в западной и восточной частях, и наличием многочисленных разновозрастных разрывных нарушений. Западная часть региона (Чаткальский сектор) имеет блоковое строение, в то время как для восточной (Баубашинский сектор) характерно наличие покровов и чешуй. В связи

^{&#}x27; Раздел написан И. И. Войтовичем,



Puc. 20. Схема разрывной тектоники северного обрамления Ферганы по результатам дешифрирования космических снимков

1-линеаменты, отождествленные с разломами; 2-линеаментные зоны; 3-ультрабазиты; 4-габбро-серпентиновый меданж. Объяснение римских цифр-в тексте

с этим была возможность сравнить дешифрируемость разломов на двух соседствующих площадях разного геологического строения.

Дешифрировались космические снимки масштаба 1:1 000 000. Составлена схема отдешифрированных разломов (ркс. 20), которая сравнивалась со схемой разломов по данным наземных съемок. Литолого-стратиграфические и интрузивные комплексы на снимках такого масштаба картируются с трудом. Опознаются лишь крупные массивы карбонатных пород, иногда позднепалеозойские молассы. Разломы выделяются лучше. В Чаткальском секторе наиболее легко опознаются разломы северо-восточного, близкого к широтному простирания (Центрально-Чаткальские). Они отличаются светлым фототоном за счет развития зон осветленных брекчированных пород и известково-железистых брекчий. По смене светлых полос, отвечающих известнякам, более темными, соответствующими эффузивам и песчаникам, хорошо различаются Атойнакский разлом и его западные продолжения (Мискенский, Сокурбельский и др.), а также расположенная несколько южнее Падшаатинская группа разломов. В некоторых местах расширения выходов карбонатных пород видны флексурные изгибы и «притыкание» тонкой штриховки светлых пород к темным.

В юго-западном направлении система Кассанских разломов образует «конский хвоет», а затем по выходе на Ангренское плато (на северо-восточных краях Кураминской структурно-фациальной зоны) она терняется. Сходными с указанными дешифровочными признаками обладают разломы верховьев р. Чаткал, ограничивающие с севера Афлатунский синклинорий. Кроме того, в бассейне р. Чаткал по снимкам зафиксированы два крувных разлома, не выявленные геологической съемкой. Один из них проходит почти параллельно современному руслу Чаткала, несколько южнее его, а другой прослеживается в карбонатных толщах вдоль левого борта долины реки. В районе устья р. Чаначсеверный оба разлома сочленяются. Из системы северо-западных разломов наиболее четко опознаются Кушартский, Коксарекский, Северо- и Южно-Чаначский.

Восточнее Чаначских разломов выделены два новых субпараллельных разрыва северо-западного направления, причленяющихся на юго-востоке к Атойнакскому разлому. Крупный разрыв длиной около 80 км выявлен в юго-западной части региона на границе Кураминской и Чаткальской зон. Геологическими съемками здесь обнаружено несколько коротких дугообразных сбросов и взбросов, ограничивающих с северо-востока выходы эффузивов минбулакской свиты среднего карбона.

Субмеридиональные разломы, представленные главным образом крутыми сбросами, не образующими мощных зон измененных пород, на космических снимках распознаются плохо. Из этой системы более или менее достоверно фиксируются Акташские сбросы, образующие одноименный грабен на северном склоне Чаткальского хребта. Кумбельский, Ачикташ-Даванский и Раватский сбросы в виде единых линий на космических снимках не просматриваются. Ачикташ-Даванский разлом совпадает с линеаментом II, прослеживающимся с севера на юг от Таласского хребта, через Сандалашский хребет и через долину р. Чаткал до водораздела Чаткальского хребта. Кумбельский разлом является северной, а Раватский — южной составляющей сумеридионального линеамента
III, прослеженного почти параллельно линеаменту IV. Последние устанавливаются по комплексу признаков: смене фототона, фрагментам разрывов, субпараллельным пересекающимся системам трещин-полосок и др.

Кроме субмеридиональных, в Чаткальском секторе по космическим снимкам выделяются два линеамента северо-запад — юго-восточного направления (см. рис. 20). Линеамент I прослежен от р. Чанач-южный вдоль северо-восточного края Каратерекского поднятия до устья р. Сандалаш и далее к северо-западу, до верховьев р. Каракорум-Кёксу в Пскемском хребте. На северо-западном окончании этого линеамента среди терригенно-карбонатных толщ среднего палеозоя закартирован выход метаморфических сланцев докембрия. Расположенный к юго-западу от него линеамент VII обрывает линеаменты субмеридионального простирания (II и III) и прослеживается с юго-востока на северо-запад на расстояние до 100 км.

В Баубашатинском секторе наиболее интересной структурной линней, фиксирующейся по космическим снимкам, является зона габбро-серпентинитового меланжа (IV), развитого во фронте Каракорумского надвига (см. рис. 20). На снимках серпентиниты выделяются серым фототоном, несколько боле темным, чем на сересуйском флише, но светлее близлежащих амфиболитов майлисуйской серия. Возможно, здесь еще помогает своеобразный ландшафт: мочажины, озерки, многочисленные родники, оползни, блестящая поверхность обломков серпентинитового элювия. С северо-запада на юго-восток габбросерпентинитовый меланж пересекается линеаментом VIII, прослеженным от верховьев р. Карасу-западная на стыке Атойнакского и Чаткальского хребтов до правобережья р. Майлису. Как и предыдущие линеаменты, он улавливается на снимках по комплексу признаков. В южной части поверхностным отражением его являются смена флишоидной толщи молассой (смена фототона), изгибы пачек и слоев, в средней части он совпадает с Акбельской зоной разломов, отделяющих разрезы Майлисуйской и Сересуйской структурно-формационных зон, а на северо-востоке он проходит через массив ультрабазитов. Восточной ветвью этого линеамента является линеамент V, который ограничивает крайние с востока выходы ультраосновных и метаморфических пород и является, по существу, границей Майлисуйской и Сересуйской аллохтонных зон с баубашатинским автохтоном.

Незначительный по протяженности линеамент северо-запад — юго-восточного простирания (VI) прослежен в крайней восточной части территории (см. рис. 20). К северу от Отузартской впадины он отделяет имеющиеся здесь фрагменты разрезов Срединного Тянь-Шаня от южнотяньшаньских, а к югу он гасится тектоническим покровом. Разрывные структуры — сбросы и сбросо-сдвиги, которые, как указывалось выше, смещают надвиги, на космических снимках распознаются плохо. Из них более или менее достоверно выделяются некоторые разломы Баубашатинской группы, имеющие северо-восточное, близкое к широтному простирание. К северу от них выделено несколько проблематичных субмеридиональных разломов, которые не фиксировались геологической съемкой. Не удалось также распознать очень контрастную группу Оялминско-Балыкуртских покровов на правобережье р. Нарын, в северной части Баубашатинского сектора, сложенных кремнисто-вулканогенно-сланцевыми толщами, перекрывающими светлые массивнослоистые известняки.

В результате дешифрирования космических снимков получен ряд существенно новых данных по разломной тектонике региона. Установлена более высокая степень дешифрируемости территории блокового строения по сравнению с территорией чешуйчато-покровного строения. Подтверждено наличие основных систем разломов, выявленных наземными наблюдениями, а также выделены новые разломы, не устанавливаемые геологической съемкой. При этом замечено, что лучше других на космических снимках распознаются разломы типа взбросов, образующие на местности зоны дробления и гидротермального изменения пород.

По комплексу признаков выделена зона габбро-серпентинитового меланжа и уточнено ее положение в общей структуре региона. Установлено восемь линеаментов секущего направления по отношению к основным системам разломов. Видимо, это глубинные структуры, природу и характер которых можно будет установить только с привлечением данных геофизики, геохимии и др. Бесспорно, что более широкое использование материалов космических съемок позволит получить намного больше новых данных о разломах и вообще о геологическом строении этой территории.

Горно-складчатые области Северо-Востока СССР1

Исследованный район охватывает юго-восточную часть Яно-Колымской складчатой системы мезозонд. Хасынскую дугу Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и западную ветвь Тауйско-Тайгоносской позднемезозойской складчатой зоны [Геология..., 1970]. В строении региона доминируют мощные и сложно дислоцированные песчаноглинистые тоящи пермской, триасовой и юрской систем (верхоянский комплекс), пронизанные крупными батолитоподобными интрузиями гранитоидов позднеюрско-раннемелового возраста (колымский комплекс), мел-палеогеновые вулканиты кислого, среднего и основного состава и интрузия ранне- и позднемеловых гранитов, гранодиоритов, диоритов и габбро (охотский комплекс). Орогенные впадины выполнены континентальными осадками позднеюрско-раннемелового и неоген-четвертичного возраста. Крупные глубивные разломы северо-западного, северо-восточного и широтного простираний, которые ограничивают важнейшие структурно-формационные зоны мезозоид и Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, имеют длительную историю развития и, как правило, в той или иной мере активизированы в новейшую и современную эпохи.

Дешифрировались космические изображения, полученные со спутников «Метеор». Выделенные на снимках линейные и кольцевые элементы (рис. 21) ограничивают блоки с различной высотой вершинной поверхности, контролируют расположение и морфологию долин, образуют геоморфологические уступы и рвы и т. п. Тектоническая природа таких элементов следует из общего анализа структурных зон [Глушкова, Смирнов, 1977]. Тем не менее в поле отыскивались структурные подтверждения выделенных линеаментов, свидетельствующие о наличии разрывных нарушений: зоны дробления, зеркала и борозды скольжения, специфическая минерализация.

Отдешифрированные линейные элементы можно разделить на три групы: линеаменты — единичные разломы большой протяженности, сопровождаемые узкими зонами повышенной трещиноватости; системы линеаментов — кулисообразные группы близких по простиранию разломов, разделенных десятками километров; линеаментные зоны сравнительно узкие полосы больщого числа сближенных разломов и иных линейных нарушений.

Детрино-Бохапчинский линеамент северо-восточного простирания врослеживается от среднего течения р. Челомджа вдоль р. Детрин на правобережье р. Бохапча. Линеамент маркируется расположенными на одной линии долинами рек и высокими неотектоническими уступами. К нему приурочены локальные купольные структуры. Характерна интенсивная трещиноватость поверхности в полосе 10—15 км. Местами к линеаменту приурочены границы вулканических покровов и нарушения складчатых структур. В северовосточной части он совпадает со скрытым магмоконтролирующим Бохапчинским глубинным разломом.

Янский линеамент прослеживается вдоль среднего и верхнего течения р. Яны и через верховья рек Хурэн и Кулу в виде узкой полосы неотектовических дислокаций и интенсивной трещиноватости. Высота блоков с разных сторон от этой полосы нередко различается на 200—500 м. Линеамент является северо-восточной границей Инского района пологих дислокаций, контролирует расположение вулканических полей, интрузий гранитоидов и субвулканических тел. Он выражен в рисунке гранитационного поля [Шило и др., 1979].

Умарский линеамент прослеживается в восточной части территории вдоль рек Бохапча и Нявленга. Он выражен линейными долинами, протяженными геоморфологическими уступами и почти на всем протяжении разделяет блоки, различающиеся интенсивностью новейших поднятий (относительное воздымание западного крыла достигает 100 м). Линеамент является неотектоническим проявлением одноименного глубинного разлома [Симаков, 1949].

Кулу-Хурэнская система линеаментов состоит из нескольких сближенных параллельных нарушений протяженностью 20—100 км. Ширина системы достигает 30 км. Ее элементы проявлены уступами, линейными седловинами и прямолинейными отрезками долин рек Кулу, Унга-Хинике-Интриган, Хурэн, Дегдекан. Отмечаются участки интенсивной трещиноватости. На северном краю вулканического пояса система контролирует положение и форму меридионально удлиненных вулканических полей, гранитоидных и диоритовых интрузий, субвулканических тел и даек. Часто встречаются вулкано-плутонические купольные и кольцевые структуры. Система выделяется и по комплексу грави-

¹ Раздел написан В. Н. Смирновым и С. В. Левашовой.



Рис. 21. Линеаменты, кольцевые и круговые структуры Северного Приохотья и бассейна верхнего течения р. Колымы, отдешифрированные на космических снимках со спутников серии «Метеор»

1—3 — линеаменты: 1 — нижнекорового и верхнемантийного заложения, четко (а) и слабо (б) проявленые на изображениях, 2 — верхнекорового заложения, 3 — неопределенного заложения, четко (а) и слабо (б) проявленные на изображениях; 4, 5 — линеаментные зоны: 4 — нижнекорового н верхнемантийного заложения, 5 — неопределенного заложения; 6 — сбросовые уступы и грабены; 7 — зоны повышенной сейскичности; 8—12 — структуры центрального типа: 8 — куполообразные, 9 — концентрические, 10 — созданные вулканогенными образованиями преимущественно кислого (а), среднего (б) и смещанного (в) состава, 11 — плутонические, образованные интрузиями кислого состава, 12 — неясного происхождения. Линеаменты: Я — Янский, Д-Б — Детрино-Бохапчинский, У — Умарский; системы линеаментов: К-Х — Кулу-Хурэнская, А-Я — Армаво-Усачная; линеаментные зоны: И-Я — Иня-Ямская, Ч-Я — Челомджа-Ямская; круговые структуры: О — Омчанская, С — Сеймчанская

метрических признаков [Шило и др., 1979]. Участок высокой сейсмической активности с землетрясениями энергетических классов $K \leq 13$ свидетельствует о современных подвижках.

Армано-Ясачная система состоит из нескольких параллельных линий протяженностью 30—80 км. Система выражена на юге прямолинейными отрезками долин, а на севере чаще неотектоническими уступами высотой до 1000 м. К ней приурочены отдельные древние разрывы, дайки и субвулканические тела.

Челомджа-Ямская линеаментная зона протягивается от истоков р. Челомджы до среднего течения р. Ямы. Она служит северной границей Ямо-Тауйской системы неотектонических впадин и состоит из серии сближенных в полосе шириной 20—30 км линий, длина которых колеблется от 30 до 150 км. Линии следуют поперек главных рек Охотского склона и соответствуют неотектоническим уступам, линейно вытянутым водораздельным седловинам и каньонам малых водотоков. В целом это неотектоническая ступень с опущенным на 800—1200 м южным крылом. Она является поверхностным выражением одноименной зоны глубинных разломов [Ващилов, 1963], разграничивающей структурно-формационные зоны вулканогенного пояса и контролирующей размещение интрузий и вулканических структур.

Иня-Ямская линеаментная зона расположена по южному склону Охотско-Колымского водораздела. Для нее, как и для предыдущей зоны, характерны четкая выраженность в рельефе и участки интенсивной трещиноватости. К Иня-Ямской зоны тяготеют границы вулканических полей (особенно палеогеновых базальтов) и блоков мезозойского фундамента Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

На исследованной территории дешифрируется много концентрических структур диаметром 15—50 км (см. рис. 21). По морфологии вершинной поверхности все они определяются как купола с центробежным рисунком гидросети. Выделяются купола с центральными интрузиями, с окраинными интрузиями или вовсе без интрузий. Купола есть и в вулканогенных полях Охотско-Чукотского пояса, и в снежных с ними складчатых сооружениях Яно-Колымской зоны, но преобладают в мезозоидах. Здесь широко развиты купольные структуры, по-видимому криптовулканические, выраженные аномалиями магнитного поля. Более сложное строение имеют купольные структуры в зоне сочленения Охотско-Чукотского пояса с мезозоидами — Сеймчанская и Омчанская.

Сеймчанская структура находится между верхними течениями рек Сеймчан и Гедан, имеет форму овала и размеры 36 × 48 км. С северо-запада и юга она ограничена прямолинейными разломами, а в других местах — дуговыми нарушениями. Они выражены в рельефе уступами, долинами и седловинами на водоразделах. Структура находится в пределах Охотско-Чукотского пояса и сложена главным образом вулканогенными породами верхнего мела, а на юго-западе - глинистыми сланцами и песчаниками верхнего триаса, нижней и средней юры. В центре структуры находится Лево-Сеймчанский гранитоидный массив позднемелового возраста, в направлении которого заметно общее повышение рельефа. На северо-западе выходят граниты Омчанского массива. Секущие и радиальные разломы выражены в рельефе и разделяют блоки разной высоты. Вместе с тем радиальные разломы контролируют размещение позднемеловых вулканитов, их проникновение к центру структуры. В сс пределах дешифрируются также локальные купольные и кольцевые образования дизметром до 8 км (редко до 16 км). Они выделяются по дугообразному окаймляющему рисунку гидросети, а купола, кроме того, по радиально-центробежному рисунку гидросети и увеличению высот к центру. К большинству куполов приурочены выходы интрузивных тел, но некоторые подобные образования совпадают с кольцевыми магнитными аномалиями, возможно связанными с интрузиями, скрытыми на небольшой глубине. Концентрические элементы выполняют также роль контактов между вулканогенными и осадочными толщами, интрузиями и вмещающими породами.

Омчанская кольцевая структура диаметром 45 км расположена в междуречье Дет-рина и Анмангынды. На северо-западе, северо- и юго-востоке ее ограничивают прямолинейные разломы, связанные между собой дуговыми нарушениями, определяющими округлую в целом форму структуры. В отличие от Сеймчанской Омчанская структура сложена преимущественно осадочными породами пермо-триаса, и лишь в западной части они перекрыты меловыми вулканическими образованиями. В южной части структуры залегают граниты Омчанского массива. Внутреннее строение ее определяется сочетанием дуговых и купольных элементов с прямолинейными нарушениями секущего и радиального расположения. Как и внешние ограничения структуры, они проявлены расположением речных долин, седловин на водоразделах, уступов и резких пересибов склонов. Большое значение имеет система субширотных секущих нарушений. Амплитуды новейших вертикальных смещений по ним достигают 300 м. Радиальные разломы делят структуру на шесть сегментов, определяют проникновение продуктов вулканической деятельности к центру структуры, размещение интрузивных и субвулканических тел. Заметную роль в распределении вулканических образований играют также внутренние и внешние дуговые нарушения: к ним приурочены контакты вулканогенных толщ. Локальные купола диаметром до 10 км выделяются на снимках по тем же признакам, что и в Сеймчанской структуре. Большинство куполов совпадает с выходами интрузивных тел.

Итак, сложная блоковая новейшая структура региона определяется сочетанием крупных долгоживущих разломов, дешифрируемых на космических снимках в виде линеаментов и линеаментных зон. Характерно широкое развитие купольных и кольцевых структур разных порядков. С ними связаны распределение и форма интрузивных и вулканических проявлений мелового возраста. По отношению к складчатым структурам мезозоид купольные и кольцевые образования, как правило, дискордантны. Вероятно, они имеют магматогенную природу.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ ДИСТАНЦИОННОЙ СЪЕМКИ

ТЕПЛОВАЯ СЪЕМКА

Дистанционная тепловая съемка фиксирует тепловое излучение поверхности Земли, которое определяется температурой, излучающими свойствами и условиями теплообмена на поверхности, распределением источников тепла и процессами теплопереноса в недрах, а также распределением теплофизических свойств горных пород.

Поэтому с помощью дистанционной тепловой съемки можно осуществить: а) поиски таких полезных ископаемых, которые над местами своего залегания нарушают естественное геотермическое поле вследствие протекающих в них экзотермических реакций (нефть, газ, сульфидные полиметаллические и другие руды); б) поиски участков и определение интенсивности питания, разгрузки и глубинных перетоков подземных вод; в) поиски погребенных структур и разломных нарушений земной коры, которые характеризуются наличием геологических тел с различными теплофизическими свойствами; г) литологофациальное картирование пород поверхностного слоя посредством изучения тепловой информации.

Зарубежные исследователи уже не раз применяли дистанционную тепловую съемку земной поверхности с самолетов и искусственных спутников Земли в так называемых окнах пропускания атмосферы в ИК-диапазоне (3,5—14 мкм) и так называемую радиотепловую съемку в СВЧ-диапазоне (0,3–10 см) для решелия теологических задач В США подобные работы проводились с 1965 г. по комплексным программам ERSP, ERAP, ERTS, Skylab, Landsat и др.

К выполненным в указанном направлении работам относятся: картирование областей молодого вулканизма и выявление скрытых участков вулканической активности [Brennan, Liniz, 1971], поиски выходов термальных вод и субмаринной разгрузки подземных вод [Cassinis et al., 1971], выявление границ пород. содержащих сульфиды, и пород с различной теплоемкостью [Amad et al., 1971; Jones, 1970], оценка влияния больших городов на тепловой режим окружающих районов, съемки горящих угольных залежей [Чембровский, Казаров, 1974] и др.

По признанию американских специалистов, недостаточная разрешающая способность ИК-радиометров (1,0—0,2 К; 80—100 м) пока ограничивает применение орбитальной термографии для широких геологических исследований.

Для дистанционного изучения тепловых полей Земли перспективной является так называемая радиотепловая съемка. Она представляет интерес благодаря потенциальным возможностям получения информации о подповерхностных слоях, что невозможно осуществить при съемках в ИК-дианазоне. Но результаты радиотепловой съемки изменяются в зависимости от влажности, засолоненности и минерального состава горных пород и поэтому требуют детальных эталонных наземных привязок. Разрещающая способность используемых для этой съемки СВЧ-радиометров, работающих на орбитальных аппаратах, является, по зарубежным данным [Чембровский, Казаров, 1974], еще более низкой (0,4—3 К; 2—3 км), чем для ИК-радиометров.

В СССР в течение последних лет дистанционную ИК-съемку применяли для картирования вулканов Камчатки и районов гидротермальной активности [Гусев и др., 1972; Шилин, Гусев, 1969], выявления участков избыточного увлажнения и выхода подземных вод [Шилин и др., 1971], изучения термальной структуры ландшафта степей [Виноградов и др., 1974]. Радиотепловую СВЧ-съемку с самолетов и ИСЗ использовали для определения влажности грунтов [Башаринов и др., 1969], для контроля возгораемости торфяных болот [Артемов и др., 1974].

Общим недостатком существующих методов дистанционных тепловых съемок с самолетов и ИСЗ для поисков полезных ископаемых, судя по опубликованным материалам, является отсутствие строгих теоретических основ и методики комплексной геологической интерпретации полученных данных.

Поэтому в Институте геологических наук АН УССР были проведены исследования по обоснованию теории и методики дистанционных тепловых съемок земной поверхности и их комплексной геологической интерпретации с помощью ЭВМ для поисков нефти, газа, сульфидных руд, участков питания и разгрузки подземных вод [Лялько и др., 1979].

физико-математическая модель тепломассопереноса и процессы формирования поискового геотермического сигнала на месторождениях полезных ископаемых

Тепловой режим месторождения полезных ископаемых, особенности которого определяют поисковый температурный сигнал, зависит от процессов генерирования и переноса тепла.

В верхней части земной коры тепло распространяется путем кондукции, т. е. без перемещения вещества, и путем конвекции. Так как конвективный тепловой поток прямо пропорционален скорости движения флюнда, процесы миграции должны рассматриваться как фактор теплопереноса.

На месторождениях некоторых полезных ископаемых происходят процессы, сопровождающиеся выделением тепла в залежь, в вышележащие горные породы или перераспределением теплового потока. Эти процессы вызывают образование повышенного теплового потока, что ведет к формированию температурных аномалий в недрах и на поверхности Земли. Кроме того, в приловерхностной части земной коры (выше «нейтрального» слоя), подвергающейся влиянию периодического солнечного нагрева, важную роль в формировании теплового режима играет тепловая инерция горных пород.

Из каждой залежи происходит миграция химических соединений или элементов, входящих в состав полезного ископаемого. В результате вокруг залежи образуется область существования вещества, входящего в состав полезного ископаемого, — ореол рассеяния. Основными факторами, определяющими образование ореолов, являются состав и состояние полезных ископаемых, геологическая и климатическая обстановка, состав вмещающих пород, воздействие подземных вод, влияние температуры и давления [Геология..., 1960].

Над залежами нефти и газа в перекрывающих породах образуются газовые ореолы, вызванные непрерывным поступлением углеводородных газов и паров из залежи.

Размеры ореолов рассеяния в приповерхностных слоях над месторождениями рудных полезных ископаемых могут достигать десятков и сотен метров. В случае омывания рудных тел подземными водами (гидрогеохимические ореолы) размеры ореолов увеличиваются [Алексеев и др., 1968; Антонов, 1968].

Рассмотрим тепловые процессы, происходящие в наиболее изученных месторождениях нефти, газа, сульфидных руд и подземных вод.

Нефтегазовые месторождения. Вертикальная миграция углеводородов происходит из каждой залежи нефти и газа. Если залежь перекрыта плотными породами, то миграция осуществляется только диффузией. При наличии разломных нарушений в кровле, обычно приуроченных к сводовым частям залежи, нефтегазоносный флюид переносится более интенсивно конвективным путем. В результате этих процессов вокруг залежи углеводородов образуется ореол рассеяния, распространение которого зависит от размера месторождения и отмеченных факторов. Газонасыщенность горных пород обычно постепенно увеличивается по мере приближения к нефтегазоносной залежи [Антонов, 1968; Бурштар, 1973].

Однако существуют нефтегазовые месторождения, где газовые ореолы рассеяния выражены очень слабо, а иногда над залежью формируется бактериальная аномалия [Геология..., 1960]. Это приводит к неоднозначности интерпретации результатов газовой съемки в привоверхностных слоях и на земной поверхности.

В толшах осадочных пород происходит окисление углеводородов, которое может осуществляться при взаимодействии их с сульфатными подземными водами. Под действием сульфатредуцирующих бактерий сульфаты реагируют с органическим веществом, образуя углекислый газ, а сернистые соединения реагируют с водой. Но эти процессы могут протекать только при температурах ниже 70—100 °C, т. е. до глубин 2—3 км. На больших глубинах возможны два вида окисления углеводородов: первый — химическое окисление сульфатами при температурах 150—200 °C и выше с образованием углекислого газа и сероводорода, второй — с участием кислорода, выделяющегося в результате естественного радиолиза подземных вод [Вовк, 1973; Соколов, 1971].

В зонах свободного водообмена и аэрации окисление углеводородов, мигрирующих из нефтяных и газовых залежей, осуществляется как непосредственно химически, так и с помощью специфических микроорганизмов.

Таким образом, процессы окисления углеводородов происходят не только в залежах, но и в перекрывающих пластах. Они зависят от интенсивности поступления окислителя и сопровождаются выделением тепла [Гуревич и др., 1972]. Характерно, что распределение свободного кислорода изменяется от 21% на земной поверхности до единиц процентов на глубине 20 м и до нуля на глубинах свыше 100 м [Высоцкий, 1954].

Температурная аномалия в своде продуктивных структур может достигать 10—15 °С. По мере приближения к земной поверхности она уменьшается [Чекалюк и др., 1974; Van Orstrand, 1935; Terry, Burney, 1941]. По контуру нефтегазовых залежей иногда фиксируются кольцевые отрицательные аномалии теплового потока. Некоторые исследователи объясняют их влиянием естественной конвекции под действием геотемпературного градиента, образующей восходящий поток флюидов в центре залежи и нисходящий — по периферии [Сардаров, Суетной, 1975].

Кондуктивный теплоперенос происходит повсеместно. Тепловой кондуктивный поток определяется температурным градиентом и теплопроводностью горных пород. Распределение теплового потока зависит от теплофизических свойств горных пород. Таким образом, геологическое строение района, форма и условия залегания пластов пород с различной теплопроводностью определяют тепловые потоки и особенности геотермических условий.

Экспериментально доказано, что почти все горные породы в той или иной мере проницаемы для углеводородных газов [Соколов, 1948].

Латеральная миграция углеводородов происходит преямущественно по водоносным пластам, в то время как интенсивная вертикальная миграция возникает в связи с нарушенностью слабопроницаемых пластов разрывами, трещинами или в связи с наличием литологических окон. В зависимости от характера заполнения и неотектонической обстановки разрывные нарушения могут служить в одних случаях путями миграции, в других — экранами. Многие исследователи именно этим объясняют положительные тепловые аномалии над месторождениями нефти и газа [Думанский, Кульчицкий, 1967; Van Orstrand, 1926, 1934]. Особенности движения флюидов на нефтегазовом месторождении влияют на характерные черты геологических условий.

Таким образом, миграция углеводородов и естественная конвекция в залежи являются процессами, определяющими особенности теплового поля (рис. 22). Наряду с процессами теплопереноса на тепловое поле месторождения влияет распределение тепловых источников.

Процесы окисления протекают с выделением тепла. Об этом свидетельствуют их следы в виде смол, асфальтенов, микроорганизмов на контакте залежи углеводородов с подземными водами и в ореоле рассеяния.

Для процесса окисления (до CO₂) нефти и газа в залежах и их ореолах рассеяния (под влиянием омывания кислородсодержащими водами и вследствие деятельности микроорганизмов) характерны следующие экзотермические реакции [Ашимор, 1966]:

 $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 843$ кДж; метан $C_2H_6 + 3,5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 1619$ кДж; этан $C_3H_* + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 2205$ кДж. пролан

Нефть, окисляясь до CO₂, выделяет 2,1 · 10¹⁰ Дж тепла. «Период полураспада нефти принято считать равным 10⁷—10⁸ лет» [Чекалюк и др., 1974]. Если нефтесодержащие пласты имеют мощность 300—400 м, то энергия окисления нефти может увеличить фоновый тепловой поток из недр на 8,4—25 мВт/м².

Интенсивность процессов окисления зависит от интенсивности подачи кислорода, поэтому можно предположить, что по мере приближения к земной поверхности процесс выделения тепла будет происходить все активнее. По-видимому, значительное количество тепла выделяется при окислении углеводородов в зоне ореола рассеяния, особенно при восходящей миграции углеводородов в зоне интенсивного водообмена и в зоне аэрации, богатых кислородом и микрооргацизмами

Ореол рассеяния распространяется от залежи до земной поверхности, пересекая водоносные горизонты. В зонах пересечения с водоносными горизонтами и аэрации существуют условия более интенсивного поступления окислителя. В приповерхностных зонах над залежами содержание углеводородов резко уменьшается, а кислорода резко возрастает (особенно на глубинах до 10 м) [Высоцкий, 1954], что свидетельствует об окислении углеводородов. Таким образом, в залежи и в горных породах над ней происходит генерация тепла, что, в свою очередь, определяет характер теплового поля.

В усилении поискового геотермического сигнала существенную роль играют процессы микробиологического окисления мигрирующих углеводородов в приповерхностных Рис. 22. Влияние экзотермических процессов и естественной конвекции в нефтегазовых залежах на геотемпературное поле

1, 2 — температурные аномалии, вызванные: 1 — совместным влиянием тепловых источников и конвекции в залежи, 2 — влиянием только тепловых источников в нефтяной залежи, $3 \rightarrow 5$ — пласты 3 — нефтенасыщенные, 4 — водонасыщенные, 5 — нефтеводонепроницаемые. Приняты тиновые исходные данные $\Lambda q \cdot m = 105 \text{ мВT/m}^2$, v = 5 см/год, $\lambda = 1,68 \text{ Вт/(м} \times \text{град})$, $T_{\text{m}} - T_{\text{m}} = 15 ^{\circ}\text{C}$, $\Lambda T = [\Delta q \cdot m + C - v \times (T_{\text{m}} - T_{\text{m}})] \times z/\lambda$



слоях над нефтегазовыми залежами, что обеспечивает прогрев земной поверхности до аномалий величиной в первые градусы, фиксируемые дистанционной ИК-съемкой [Ля-лько и др., 1979].

Месторождения полиметаллических сульфидных руд. Исследования, проведенные на различных месторождениях [Лахтионов, Тархов, 1967, 1970; Гинзбург и др., 1976], показали, что основными факторами, определяющими геотермический режим, являются большая теплопроводность сульфидных руд (пирита, сфалерита, галенита и др.), достигающая 8—10 Вт/(м × град), и окисление их в приповерхностных слоях и на глубине («электроокисление»). В литературе [Лахтионов, Тархов, 1967; Калашников, 1975] отмечается, что измерениями, проведенными на месторождениях, зафиксированы отрицательные температурные аномалии ниже уровня рудного тела и положительные — выше рудного тела. Исследованиями, проведенными Ю. А. Калашниковым на Рудном Алтае, обнаружены температурные аномалии + 5°C на глубине 100 м над рудным телом. Когда тело выходит на земную поверхность, то на глубине 200 м температура под рудным телом на 4°C ниже, чем в окружающих породах.

Мощность рудных тел изменяется от единиц до сотен метров. Влияние экзотермических реакций окисления сульфидов на образование тепловых аномалий может оказаться значительным лишь при достаточном количестве кислорода, т. е. в приповерхностных частях земной коры. Н. И. Боев, В. В. Гордиенко, Р. И. Кутас [1977] исследовали тепловой режим сульфидных месторождений Украины. Они указывают, что тепловая аномалия в зоне сульфидного оруденения может достигать 11—83,2 мВт/м², и отмечают значительную роль движения подземных вод в процессах, влияющих на распределение температур и тепловых потоков. Например, аномалия теплового потока на Беганьском месторождении объясняется восходящим движением подземных вод по трещиноватым зонам, сопровождающим разломы. Это месторождение характеризуется выделением тепла в рудном теле и повышенной теплопроводностью руд. Выделение тепла происходит при окислении сульфидных руд и составляет около 7,96 • 10⁵ Дж/моль, или (3,35— 8,38) • 10⁵ Дж на килограмм исходного продукта.

Основные реакции можно записать так:

2FeS₂ + 7O₂ + 2H₂O \rightarrow 2FeSO₄ + 2H₂SO₄ + 7,96 · 10⁵ Дж — окисление пирита; PbS + 2O₂ \rightarrow PbSO₄ + 8 · 10⁵ Дж — окисление галенита; 7xS + 2O \rightarrow 7xSO + 7 66 · 40⁵ Нии – окисление с Хагерията

ZnS + 2O₂ → ZnSO₄ + 7,46 · 10⁵ Дж — окисление сфалерита.

В полиметаллических месторождениях выделение тепла может достигать (0,419 — 4,19) • 10¹³ Дж/м³ при содержании металлов до 10—20%. Если процесс окисления происходит в слое мощностью 100 м за время около 1 млн. лет, то плотность теплового потока составит 12,6—126 мВт/м², что сравнимо с величиной глубинного теплового потока [Боев и др., 1977]. Как показывают натурные измерения [Лахтионов, Тархов, 1967, 1970], повышение температуры над залежью может достигать долей градуса на земной поверхности и нескольких градусов на глубинах в десятки метров (рис. 23).

Геологические тела с повышенной теплопроводностью (рудные тела, соляные штоки, дайки и др.). Если геологическое тело характеризуется повышенной по сравнению с вме-



Рис 23 Влияние залежей полиметаллических сульфидных руд на геотемпературное поле

I = температурная аномалия (на графике), 2 — рудное тело, 3 — вмешающие породы. Приняты типовые исходные данные $\lambda \approx 1,69~{\rm Br/(m\cdot rpad)},~\Delta q = 41.9~{\rm mBr/m^2}$

Рис. 24. Влияние зон тектонических нарушений, которые заполнены отложениями с теплопроводностью, существенно отличающейся от фоновой теплопроводности вмещающих горных пород, на геотемпературное поле

температурная аномалия (на графике), 2 каменная соль, 3 — вмещающие породы (в разрезе).
 Расчет проведен по формуле

$$\Delta T = \frac{\lambda_{\rm p} - \lambda_{\rm n}}{\lambda_{\rm g} + \lambda_{\rm n}} \cdot \frac{\Gamma d^2 h}{16 h_{\rm p}^3} z$$

щающими породами теплопроводностью, то и тепловой поток в нем будет относительно повышенным. При этом над рудным телом образуется положительная температурная аномалия, а под ним — отрицательная. Если теплопроводность руд (или других геологических тел) втрое больше теплопроводности вмещающих горных пород, то температурная аномалия в приповерхностных слоях может достигать единиц градусов (рис. 24).

Подземные воды. Одним из основных факторов, перераспределяющих тепловой поток в земной коре и влияющих на поле температур, является перенос тепла подземными водами. Вертикальное движение подземных вод по ослабленным зонам разломов или фильтрационным «окнам» и фильтрация по наклонным водоносным пластам вызывают образование тепловых и температурных аномалий. Эти аномалии могут достигать единиц градусов в приповерхностных слоях при скоростях движения подземных вод, и счисляемых метрами в год.

Наличие в недрах залежей полезных ископаемых формирует в земной коре температурную аномалию, т. е. поисковый геотермический сигнал, который может быть зафиксирован в приповерхностных слоях и на земной поверхности. В сложных природных условиях тепловой сигнал в зависимости от геологических особенностей района может усиливаться или искажаться сопровождающими процессами. Например, конвективный теплоперенос подземными водами может уменьшать тепловой сигнал залежи и смещать температурный максимум, а соляной шток может вызвать температурную аномалию, соизмеримую с полезным сигналом. Поэтому необходимо количественно оценить влияние каждого из упомянутых процессов на геотермический режим месторождения.

Схематизация природных условий

Для каждого типа месторождений характерны свои особенности в процессах выделения и переноса тепла.

Процессы выделения тепла в основном характерны для месторождения углеводородов и полиметаллических сульфидных руд. На месторождении сульфидных руд они происходят только в залежи, на нефтегазовых месторождениях — также и в перекрывающих залежь породах за счет окисления мигрирующих к поверхности углеводородов.

В месторождениях нефти и газа существует естественная конвекция в самой залежи. Это явление в некоторых случаях может вызвать положительную тепловую аномалию 80 над центром залежи и некоторое понижение теплового потока на периферии. Так как поверхность Земли подвергается воздействию солнечного нагрева с суточным и годовым периодом, то в пределах месторождения выделяются две зоны с характерным геотермическим режимом: верхняя (выше «нейтрального» слоя), где температура меняется периодически, и нижняя, с установившимся температурным режимом, где годовые изменения температур незначительны.

Модели тепломассопереноса. Процессы теплопереноса на месторождениях могут быть описаны двумерным нестационарным уравнением теплопроводности с учетом конвекции. Пренебрегая тепловыми эффектами при изменении давления и считая, что температура флюида совпадает с температурой скелета породы, запишем

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \left(x, \ z \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \left(x, \ z \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - c \rho v_x \left(x, \ z \right) \frac{\partial T}{\partial x} - c \rho v_x \left(x, \ z \right) \frac{\partial T}{\partial x} + B \left(x, \ z, \ t \right) = c_0 \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t},$$
(6.1)

где T — температура; λ , c_0 , ρ_0 — соответственно коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность горных пород; v_x и v_z — проекции скорости фильтрации флюнда на горизонтальную и вертикальную оси координат x и z; c и ρ — теплоемкость и плотность флюнда; B(x, z, t) — плотность распределенных источников тепла (тепловыделение в залежи или в ореоле рассеяния); t — время.

Начало координат совмещаем с земной поверхностью. Тогда рассматриваемая область ограничится координатами -a < x < a, 0 < z > b. Границы области (-a, a, b) выбираются так, чтобы тепловым влиянием залежи на них можно было пренебречь.

Граничные условия на земной поверхности должны учитывать теплопередачу конвекцией, радиацией, излучением, а также затраты тепла на фазовые переходы почвенной влаги. В случаях, когда предметом изучения является влияние теплового баланса или его составляющих на термический режим земной поверхности и приповерхностных слоев, необходимо учитывать сложность процессов теплообмена на границе земная поверхность -- воздух.

Д. А. Куртенер и А. Ф. Чудновский [1969] показали, что граничное условие на земной поверхности при теплопередаче конвекцией, радиацией, изучением с учетом затрат на испарение почвенной влаги может быть представлено в виде граничного условия третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = N(t) [T_{a}(t) - T_{u}], \qquad (6.2)$$

где N (t) — параметр, учитывающий теплообмен на поверхности; T_{s} — эквивалентная температура воздуха; T_{π} — температура поверхности.

Если же при изучении процесса теплопереноса в недрах имеются данные о температурах в приповерхностных слоях, измеренных в глубоких скважинах, то можно использовать граничное условие первого рода [Куртенер, Чудновский, 1969; Чудновский, 1976]. Учитывая, что изменение температуры со временем на поверхности Земли можно приближенно выразить суперпозицией гармонических функций, запишем

$$z = 0, T(t) = T_0 + \sum_{i=1}^{2} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i),$$
 (6.3)

где A_i — амплитуда температурных колебаний; $\omega_i = 2\pi/\tau_i$ — круговая частота; τ_i — период колебаний; φ_i — начальная фаза; τ_i — 1 год, τ_2 — 1 сут.

Остальные граничные условия можно записать следующими выражениями:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$
 на границах $x = \pm a$ и
 $-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q_r(x)$ на границе $z = b$.

На границах $x = \pm a$ нет перетока тепла в горизонтальном направления; тепловой поток, не искаженный нефтегазовой залежью, направлен вертикально вверх. На нижней границе задаем глубинный кондуктивный тепловой поток в соответствии с реальным его распространением в недрах Земли.

Сформулированная задача теплопереноса в общем случае может быть решена численно, однако иногда возможны упрощения, позволяющие получить аналитические решения, удобные для практических оценок.

6 Заказ 588

Упомянутые факторы — источники тепла, зоны аномальной теплопроводности, процессы естественной конвекции, движение подземных вод — вызывают температурную аномалию, которая в зависимости от вида полезного ископаемого может использоваться как поисковый сигнал или являться шумом, затрудняющим обнаружение полезного сигнала.

В первом случае использование модели дает расчетные характеристики температурной аномалии, которые должны приближаться к наблюдаемым. Во втором — эти расчетные данные должны учитываться путем введения соответствующих поправок. Например, учет влияния движения подземных вод в горизонтальном водоносном пласте позволяет ввести поправку на положение залежи относительно максимума температурной или газовой аномалии.

Тепловой баланс земной поверхности и формирование понскового сигнала. Рассмотрим тепловой баланс земной поверхности и роль глубинного теплового потока в его формировании, в том числе роль теплогенерации на месторождениях углеводоро- и дов (рис 25) Тепловой баланс земной поверхности можно представить формулой [Куртенер, Чудновский, 1969]

$$(1-r)q_{\rm ps} = q_{\rm pg} + q_{\rm s} + q_{\rm s} + q_{\rm s}, \tag{6.4}$$

где *г —* альбедо земной поверхности; q_{рх} — поток суммарной коротковолновой радиации; q_{рл} — эффективное длинноволновое излучение; q_в — поток тепла в воздух; q_n — тепловой поток, расходуемый на испарение; q_n — тепловой поток в почву.

Вся информация о глубинном строении земной коры и процессах переноса в ней флюидов, о залежах полезных ископаемых содержится в тепловом потоке почвы (q_n) , который можно расчленить на следующие генетические составляющие: 1) глубинную, возникающую глубже залежи полезного ископаемого (q_r) ; 2) полезную, образующуюся за счет процессов, происходящих в самой залежи полезного ископаемого (q_{non}) ; 3) вторичную, возникающую в пластах, перекрывающих залежь полезного ископаемого (q_{non}) ; ссли процессы генерации тепла связаны непосредственно с полезным ископаемым, то эта составляющая усиливает полезный сигнал, в противном случае опа создает помехи, искажающие полезный сигнал; 4) периодически изменяющуюся $(q_{нзм})$, обусловленную неравномерным прогреванием земной поверхности Солнцем в течение суток и года; 5) конвективную $(q_{кв})$, образующуюся за счет привноса (выноса) тепла в данный участок земной коры движущими флюидами.

Месторождения полезных ископаемых имеют обычно относительно небольшие размеры (несколько километров), что позволяет принять условие равенства синхронных значений параметров, определяющих теплообмен между поверхностью Земли и атмосферой, конвективной (q_{xs}), периодической (q_{issm}) и глубинной (q_c) составляющих теплового потока почвы для аномального участка поверхности над залежью полезных ископаемых и фонового участка, удаленного от залежи.

Сравнивая уравнения теплового баланса для обоих участков и выражая их составляющие через температуры поверхности, получим

$$\Delta T = T_{an} - T_{\phi on} = \frac{q_{\pi_{an}} - q_{\pi_{\phi on}}}{M_1 + a + B_1}, \qquad (6.5)$$

где T_{aH} , $T_{\phi oH}$ — температуры земной поверхности на аномальном и фоновом участках; $q_{\Pi_{aH}} q_{\pi_{\phi oH}}$ — тепловой поток в почве для аномального и фонового участков; M_1 — коэффициент, определяющий длинноволновое излучение и зависящий от упругости водяного пара в атмосфере, от облачности, температуры воздуха; a — коэффициент теплоотдачи от поверхности Земли в воздух; B_1 — коэффициент, определяющий тепловой поток, расходуемый на испарение.

Если экспериментальные исследования температуры земной поверхности выполняются в однотипном ландшафтно-климатическом районе, в пределах которого расположены аномальные и фоновые по тепловому потоку в недрах участки, то разность синхронных значений потоков тепла (температур) на этих участках на земной поверхности (при предполагаемом равенстве остальных составляющих теплового баланса) может быть объяснена процессами, связанными с наличием определеного типа теплогенерирующих полезных ископаемых. Принимая, что на фоновом участке, удаленном от залежи, полезный и вторичный потоки тепла пренебрежимо малы, и учитывая равенство (6.4), запишем выражение для температурной аномалии на поверхности Земли

$$\Delta T = T_{\text{wn}} - T_{\text{pon}} = \frac{q_{\text{mos}} - q_{\text{pr}}}{M_1 + a + B_1} = \frac{q_{\text{mos}} + q_{\text{pr}}}{N}.$$
(6.6)



Puc. 25. Модель формирования радиационных температур земной поверхности над нефтегазовыми залежами

1 — нефтегазовая залежь, 2 — зона биохимического окисления в поверхностных слоях над залежью, 3 — граница зоны теплового влияния залежи, 4 — радиационная температура поверхности Земли, 5 глубинный тепловой поток

Из этого выражения следует, что температурная аномалия на поверхности Земли прямо пропорциональна интенсивности тепловыделяющих процессов, связанных с полезными ископаемыми.

Учитывая формулу (6.3) и полагая, что $q_{pa} = \varepsilon \sigma T_{n}^{4}$, радиационный баланс на границе земная поверхность — атмосфера можно описать соотношением [Шилин и др., 1976]

$$R = q_{ps}(1 - r) - \sigma T_{s}^{2} + \omega T_{a}^{4} = q_{s} + q_{a} + q_{a}, \qquad (6.7)$$

где σ— постоянная Стефана-Больцмана; ε - степень черноты земной поверхности (обычно ε=0,94÷0,99); T_в— температура воздуха; T_п— термодинамическая температура земной поверхности.

Рассматривая упрощенный случай одномерного нестационарного кондуктивного теплопереноса с граничным условием (6.7), можно определить температуру на границе земная поверхность — атмосфера [Шилин и др., 1976]:

$$\Delta T = \frac{R \cos\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{\omega} \left(\rho_{\rm B} c_{\rm B} \sqrt{a_{\rm B}} + \rho_0 c_0 \sqrt{aa}\right)}, \tag{6.8}$$

где ΔT — отклонения температуры от среднесуточных значений; R — радиационный баланс; ω — круговая частота вращения Земли; $\rho_{\rm B}$, $c_{\rm B}$, $a_{\rm B}$ соответственно плотность, теплоемкость и коэффициент турбулентного обмена приземного воздух; $a_0 = \lambda/(c_0\rho_0)$ — коэффициент температуропроводности грунта; ρ_0 , c_0 , λ — соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность слоя грунта, учавствующего в теплообмене с атмосферой.

Из выражений (6.7) и (6.8) следует, что температурные контрасты различных природных объектов, находящихся в одинаковых метеорологических условиях, определяются вариациями альбедо (которое в прородных условиях может изменяться от 0,1 до 0,7, составляя в среднем 0,3) и параметра $\rho_0 c_0 \sqrt{a_0} = \sqrt{\rho_0 c_0 \lambda}$, называемого обычно тепловой инерцией. Наличие тепловой инерции почвы грунтов делает малоинформативными дистанционные тепловые нефтегазопоисковые съемки, проводимые при солнечном освещении, поскольку при этом поисковые геотермические аномалии искажаются за счет различного поверхностного нагрева и охлаждения участков земной поверхности.

Солнечная погода способствует (особенно в горных местностях) формированию на земной поверхности ложных (для поисковых целей) тепловых аномалий за счет так называемого топографического эффекта (разница температур освещенного и теневого склонов может превышать 15 °C) и затеняющего влияния отдельных облаков.

Дистанционный сигнал, радиационная температура земной поверхности $(T_{\text{рад}})_{\text{измеряются ИК-радиометрами, термодинамическая температура поверхности <math>(T_n)$ на тех же участках — контактными измерениями. Эти величины связаны зависимостью $T_n = -T_{\text{рад}}/\sqrt[5]{8}$. Значение ε в природных условиях обычно изменяется в пределах 0,99—0,94, следовательно, ошибка в определении термодинамической температуры при одном и том же значении радиационной температуры может достигать нескольких градусов.

Виды и последовательность работы при дистанционных геотермических поисках

Поисковые работы должны начинаться с мелкомасштабной ИК-съемките ИСЗ (в сочетании со съемками в других диапазонах спектра электромагнитных колебаний) крупного региона земной поверхности. На участках тепловых аномалий, выявленных по результатам такой съемки, должна проводиться крупномасштабная тепловая съемка с самолета и наземная привязка геотермических аномалий по профилям разноглубинных (до 10 м) скважин. Для этих аномальных участков рассчитываются математические модели тепломассопереноса в недрах и путем решения обратных задач (используя полученное распределение температур на земной поверхности и максимально привлекая результаты сейсмо-, электро-, грави- и магниторазведочных работ) определяется предполагаемая глубина залегания и мощность месторождения полезного ископаемого.

Количественный учет искажающего влияния экзогенных факторов на поисковый геотермический сигнал, измеряемый на поверхности Земли, можно осуществить сравнением данных дистанционной тепловой съемки с непосредственными и синхронными измерениями температур контактным методом на тех же участках при различных экспозициях и наклонах рельефа, типах почв и растительности, интенсивностях осадков, ветра, инсоляции, временах года, суток и т. д. На основании таких эксперментов, охватывающих возможный диапазон изменения экзогенных факторов, влияющих на радиационную температуру почвогрунтов, строятся таблицы поправок, которые вносятся в первичные результаты тепловой съемки.

В целях максимального уменьшения влияния поверхностных «шумов» на полезный геотермический сигнал дистанционная тепловая съемка земной поверхности должна проводиться:

 практически синхронно и с высокой точностью регистрации температуры вдоль профиля съемки на участке земной поверхности, соответствующем размеру залежи, т. е. около нескольких километров;

2) в предрассветные часы, когда земная поверхность успевает максимально остыть после предыдущего дня (таким образом сводятся к минимуму экзогенные температурные различия);

3) в весенне-осенний период, когда минимальна высота трав и культурных посевов;

 в длительный бездождевой и безветренный период, чтобы исключить влияние фильтрующихся осадков ветрового охлаждения и фазовых переходов;

 синхронно с прецизионными наземными измерениями температур на фоновых и аномальных участках месторождения.

При дистанционном изучении тепловых полей Земли с помощью ИК-радиометра его разрешающая способность по пространству должна быть не хуже 50 м, а чувствительность порядка 0,01—0,1 °C. Известные в настоящее время по опубликованным материалам ИК-радиометры характеризуются чувствительностью 0,1—1 °C. Детальное описание и методика работы с ними приведены в работе А. В. Ганкевича [1974].

Одновременно с дистанционным измерением температуры должна проводиться съемка в видимом диапазоне и спектрозональная съемка поверхности. Это необходимо для определения признаков дистанционного распознавания различных типов поверхности и растительного покрова, чтобы ввести поправки за разную степень черноты поРис. 26. Результаты синхронных измерений температуры на земной поверхности в предрассветные часы над Прилукским нефтяным месторождением в районе скважин геотермической съсмки

Цифры ва кривых – номера скважин



Рис. 27. Изменение поверхностной температуры в течение суток в центре залежи (сплошная линия) и за контуром месторождения (пунктир)

Площади *а* — Леляковская, б – Прилукская, *в* – Качановская, *г* — Руденковская Цифры на кривых — вомера скважин



верхности. Целесообразно тепловую ИК-съемку дополнить исследованием в СВЧдиапазоне, что позволит получить сведения о распределении температуры и влажности с увеличением глубины в приповерхностных слоях.

Для отработки поисковых критериев на нефть и газ при дистанционной тепловой съемке впачале следует провести наземные измерения температур в неглубоких скважинах на типовых участках, так называемых опытных площадях. Такими площадями могут быть участки над известными структурными и неструктурными ловушками, заполненными нефтью и газом.

Как уже отмечалось, положительные температурные аномалии в недрах над участками нефте- и газосодержащих пород сопровождаются температурными аномалиями на земной поверхности [Чекалюк и др., 1974; Лялько, Митник, 1975]. Такое явление может быть признаком для поисков нефтегазовых залежен и использоваться для разработки дистанционных методов.

Сравнивая тепловой баланс земной поверхности двух участков — над залежью и за ее контуром, близко расположенных друг от друга, с приблизительно одинаковыми экспозицией поверхности, типами грунта и растительности, отмечаем, что в одно и то же время температуры этих участков можно определять по различию значений тепловых потоков (обусловленных тепловыми процессами) из недр нефтегазовых залежей и перекрывающих слоев. Если теплофизические характеристики почв независимы от температуры, что практически всегда наблюдается в реальных условиях приповерхностной зоны, то величину температурной аномалии можно записать в виде формулы (6.5).

Для проведения экспериментальных исследований температуры поверхности выбраны Прилукская и Леляковская (нефтеносные), Качановская (пефтегазоносная) и Руденковская (газонефтеносная) продуктивные площади Днепровско-Донецкой впадины, где в 1974—1977 гг. проведена геометрическая съемка в неглубоких скважинах, с помощью которой установлены положительные температурные аномалии.

Измерения температуры земной поверхности на каждом участке выполнялись одновременно в трех пунктах, один из которых находился в центре залежи, второй за се контуром, а третий — в некоторой точке между двумя первыми. Пикеты располагались вблизи скважин геотермической съемки [Лялько и др., 1979].

Участки поверхности, на которых проводились исследования, выбирались однотипными по составу грунта, влажности, типу растительного покрова, ориентации и экспозиции склонов. Расстояние между крайними пикстами не превышало 4—5 км, поэтому метеорологические условия на момент съемки на этих точках можно считать одинаковыми.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальным для измерения температуры на поверхности Земли является интервал времени от 5 до 6 ч, соответствующий предрассветному времени. В эти часы скорость изменения температуры и влияние экзогенных факторов минимальны.

Значение температуриой аномалии, т. е. разность температуры поверхности Земли над залежью и за ес пределами, определяли по результатам, полученным в ночные и предрассветные часы (рис. 26). Температуру почв на участке определяли как среднеарифметическое показаний трех датчиков. При этом показания второго и третьего датчиков приводились ко времени регистрации показаний первого с помощью линейной интерполяции.

Полученные данные свидетельствуют о том, что температура земной поверхности над всеми исследованными месторождениями превышает температуру поверхности за их пределами, а значения температурных аномалий на Леляковской, Прилукской, Руденковской и Качановской площадях составляют 0,3—1,5 °C (рис. 27).

Эти результаты хорошо согласуются с материалами геотермической съемки в неглубоких скважинах [Лялько, Митник, 1975]. В июне 1977 г. на Прилукском месторождении измерения температуры поверхности выполнялись параллельно с геотермической съемкой на глубинах 1, 2, 3, 4 и 6 м. Графики, построенные по результатам исследований, ноказали хорошее совпадение температурных аномалий в неглубоких скважинах и на поверхности Земли. Характерные точки графиков — максимумы и минимумы прослеживаются на всех глубинах, вплоть до дневной поверхности.

Таким образом, тепловые и температурные аномалии в недрах, присущие нефтегазовым месторождениям, сопровождаются аномалиями на поверхности Земли. Температурные аномалии на поверхности составляют несколько десятых долей градуса и могут быть обнаружены известными методами. Хорошая корреляция поверхностных температурных аномалий с аномалиями на небольших глубинах позволяет рассматривать первые как поисковый признак на нефть и газ, а также использовать для дистанционных поисков тепловую съемку с летательных и космических аппаратов.

Основные природные факторы, искажающие поисковый геотермический сигнал

Анализ результатов дистанционных тепловых съемок, проведенных в различные сезоны и в разное время суток на нефтегазовых площадях Днепровско-Донецкой впадины, показал, что на термограммах отражены контрасты радиационных температур, обусловленные кусочно-однородным характером исследуемой поверхности.

В пределах таких однородных участков поверхности могут находиться мелкие неоднородности, имеющие линейные размеры от единиц до первых десятков метров, распределенные произвольно. Они также отражаются на термограммах. Наличие таких температурных контрастов, которые по размерам могут значительно превосходить приращение радиационной температуры, обусловленное глубинной геотермической аномалией, является одной из основных помех, искажающих полезный сигнал.

Рассмотрим основные метеорологические факторы, которые в совокупности с неоднородным характером земной поверхности создают помехи при дистанционной тепловой съемке.

Коротковолновое излучение — один из наиболее сильно действующих

Рис. 28. Искажающее влияние прямой коротковолновой радиации на результаты дистанционной тепловой съемки на Руденковской площади (маршрут № 8—7). Дистанционные измерения выполнены сотрудниками ФТИНТ АН УССР 1 февраля 1977 г. от 11 ч 21 мин до 11 ч 25 мин

а — оптический диапазон; б —— ИК-диапазон

Рис. 29. Искажающее влияние фазовых переходов на результаты дистанционной тепловой съемки

Термограммы[,] а — некаженная, б — неискаженная







искажающих факторов. Наличие прямой коротковолновой радиации вызывает значительные тепловые контрасты при переходе от одного однородного участка поверхности к другому и в пределах однородных участков за счет мелких неоднородностей (вследствие различий в теплопроводности, теплоемкости, увлажненности почвогрунтов) и освещенности, обусловленной облачностью, теневыми эффектами, которые могут полностью подавлять полезный геотермический сигнал. В таких случаях, как правило, наблюдается корреляция освещенности поверхности и ее термодинамической температуры (рис. 28).

Наличие рассеянной коротковолновой радиации при полной облачности также увеличивает тепловые контрасты, обусловленные неравномерностью прогрева земной поверхности неоднородных по физическим свойствам областей. Однако сильное ослабление падающей коротковолновой радиации за счет облачности, а также ее равномерное распределение по площади позволяют в ряде случаев при дешифрировании термограмм дистанционной съемки выделить полезный сигнал.

Отсутствие коротковолновой радиации в ночные и предрассветные часы, когда становятся минимальными все тепловые контрасты, обусловленные неравномерным нагревом земной поверхности в дневное время, создает оптимальные условия для проведения дистанционной тепловой съемки с поисковыми целями.

Ф а з о в ы є л є р є х о д ы, обусловленные промерзанием и оттаиванием почв, вызывают температурные контрасты, полностью подавляющие полезный геотермический сигнал. В качестве примера на рис. 29 приведена термограмма дистанционной съемки, полученная при оттаивании приповерхностного слоя почв в дневное время в условиях полной облачности.

Осадки и встер приводят к возникновению температурных помех, обусловленпых перавномерным конвективным теплообменом земной поверхности и атмосферы, изменением теплофизических свойств почв при увлажнении и испарении. Эти помехи можно устранить при дешифрировании. Кроме того, увеличение коэффициента турбулентного обмена между земной поверхностью и атмосферой одновременно уменьшает температурную аномалию на поверхностью и атмосферой одновременно уменьшает температурную аномалию на поверхности, обусловленную глубинным геотермическим сигналом. Таким образом, проведение дистанционной тепловой съемки в период неустойчивой погоды нецелесообразно. Специального внимания заслуживает вопрос о помехах, создаваемых растительным покровом. Последний не только создает неоднородность исследуемой поверхности и связанные с ней температурные контрасты, но и может быть своеобразным экраном (в случае интенсивного развития растительности) для длинноволнового излучения поверхности Земли. При полном перекрытии излучаемой поверхности растительностью (например, лесом) радиометр фиксирует излучение растительного покрова. При слабо развитом растительном покрове (например, при всходах озимых в октябре-ноябре) его экранирующее влияние на геотермический сигнал незначительное.

Для выяснения предельно допустимой степени перекрытия излучающей поверхности растительностью и для оценки влияния увлажненности почв на полезный геотериический сигнал требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований на опытных площадях.

Основы дешифрирования материалов дистанционных телловых съемок земной поверхности с нефтегазопоисковыми целями¹

В литературе [Куртенер, Чудновский, 1969; Чудновский, 1976] показано, что энергетический баланс, определяющий термодинамическую температуру земной поверхности, может быть представлен уравнением

$$q_{n} = N(t) [T_{n}(t) - T_{n}(t)], \qquad (6.9)$$

где N(t) — общий коэффициент теплоотдачи земная новерхность — атмосфера; T_9 — эквивалентная температура среды. Решая это уравнение относительно T_m получим

$$T_{a} = T_{a}(t) - \frac{q_{\mu}}{N(t)}. \tag{6.10}$$

Величины $T_{g}(t)$ и N(t) выражают влияние совокупности метеорологических факторов и свойств поверхности (альбедо, степень шероховатости, абсолютный коэффициент излучения и др.) на формирование температуры поверхности.

Значение q_n теплового потока в грунт, как уже отмечалось, наряду с составляющими, обусловленными экзогенными факторами, может включать составляющие $q_{\rm BT}$ и $q_{\rm пол}$, которые определяются тепловыделением при окислении природных углевородоров в недрах. Эти составляющие вызывают приращение температуры поверхности (являющееся поисковым признаком на нефть и газ), равное

$$\Delta T_{n} = \frac{q_{nr} + q_{not}}{N(t)} \,. \tag{6.11}$$

Для случая серой земной излучающей поверхности существует простая связь между ее термодинамической и радиационной температурами:

$$T_{\text{pag}} = \sqrt[4]{\epsilon} T_{s} = \sqrt[4]{\epsilon} T_{s}(t) - \frac{\sqrt[4]{\epsilon} q_{\pi}}{N(t)}.$$
(6.12)

Тогда значение соответствующего приращения радиационной температуры равно

$$\Delta T_{\text{pag}} = \sqrt[4]{\epsilon} \Delta T_{\text{n}} = \frac{\sqrt[4]{\epsilon} (q_{\text{gr}} + q_{\text{mog}})}{N(t)}.$$
(6.13)

Выделение этой величины на фоне зарегистрированных на термограмме тепловых контрастов является основной задачей при проведении дешифрирования результатов дистаиционной тепловой съемки с нефтегазопоисковыми целями.

Анализ результатов полевых наземных геотермических исследований в районах нефтегазовых месторождений, а также решение ряда задач теплопереноса на ЭВМ и АВМ показали, что распределение температурных аномалий в приповерхностных слоях и на земной поверхности в пределах областей с однородным видом поверхности описывается непрерывными гладкими функциями, осложненными флуктуациями. Распределение температуры резко меняется лишь при переходе от одного вида поверхности к другому.

¹ Раздел написан Л. Д. Вульфсоном.

Изучение результатов дистанционной тепловой съемки показало, что аналогичные закономерности характерны для функций, описывающих распределение радиационной температуры земной поверхности.

Учитывая отмеченные особенности функций распределения термодинамических (кинетических) и радиационных температур поверхности Земли при сопоставлении с аналитическими выражениями (6.4), (6.12), можно сделать вывод о том, что резкие изменения значений температуры обусловлены величинами N, T_3 , $q_{\rm HSM}$ н в. Эти параметры остаются постоянными (если исключить случайные колебания) в пределах однородных участков поверхности и могут резко изменяться при переходе от одного участка к другому. В то же время распределение суммы $q_{\rm пол} + q_{\rm BT}$ (6.4) и соответствующие ему приращения температуры описываются непрерывными функциями.

Применяемый метод дешифрирования основан на использовании различий в распределении радиационных температур, обусловленном упомянутыми факторами. Первый этап дешифрирования сводится к выделению однородных участков по типу поверхности и к сглаживанию кривых радиационной температуры в пределах этих участков по методу наименьших квадратов. Тем самым исключается влияние локальных неоднородностей, имеющих случайный характер, и определяются закономерности изменения радиационной температуры в пределах таких участков.

Второй этап заключается в приведении фрагментов термограмм, соответствующих различным по характеру поверхности участкам, к поверхности некоторого *n*-го участка, принятого за эталон. В соответствии с выражением (6.12) эта операция означает введе ние для (n + 1)-го фрагмента термограммы масштабного множителя

$$K = \frac{\sqrt[4]{\epsilon_{\pi}} N_{n+1}}{\sqrt[4]{\epsilon_{n+1}} N_{\pi}}$$
 (6.14)

и параллельный перенос на величину $\Delta T_{
m pag}$, равную разности постоянных составляющих функций, описывающих распределение на *n*-м и (*n* + 1)-м участках:

$$\Delta T_{\text{pag}}^{0} = \sqrt[4]{\varepsilon_{\pi}} \left(T_{\text{s}, n} - \frac{q_{\text{HSM}, n} + q_{\text{r}}}{N_{n}} \right) - \sqrt[4]{\varepsilon_{n+1}} \left(T_{\text{s}, n+1} - \frac{q_{\text{HSM}, n+1} + q_{\text{r}}}{N_{n+1}} \right). \tag{6.15}$$

Величина К вычисляется как отношение градиентов раднационной температуры $\left(\frac{\Delta T_n}{\Delta X_n}\right) \left| \left(\frac{\Delta T_{n+1}}{\Delta X_{n+1}}\right)\right|$, определенных на участках различных типов земной поверхности. Значение $\Delta T_{\text{рад}}^0$ можно определить в зависимости от вида приводимых фрагментов двумя способами: по разности радиационных температур $T_{\text{рад},n}$ и $T_{\text{рад},n+1}$ в окрестности границы, в пределах которой $q_{\text{пол}} + q_{\text{вт}} = \text{const}$, либо по разности $T_{\text{рад}}$ горизонтальных участков фрагментов, где $q_{\text{пол}} \div q_{\text{вт}} = 0$

Проведение второго этапа дешифрирования мозволяет устранить в первом приближении искажающее влияние совокупности экзогенных факторов, обусловленных видом поверхности, на поисковый геотермический сигнал.

Третий этап дешифрирования состоит в исключении неинформативных участков термограмм, обусловленных объектами, экранирующими поисковый сигнал (посадки, дороги, населенные пункты, водоемы и др.), и в экстраполяции закономерности изменения радиационной температуры изученных областей на смежные с ними неинформативные участки.

Описанные этапы дешифрирования показаны на рис. 30. На рис. 30, а изображена необработанная термограмма радиационной температуры поверхности, характерная для нефтегазовых месторождений. Четко выделяются температурные контрасты участков со следующими видами поверхности: поле со скошенным клевером; поля, засеянные озимыми; пашня; поле убранной пшеницы. В пределах этих участков протяженностью 500-800 м выделяются локальные искажения случайного характера.

На рис. 30, б показан результат первого этапа дешифрирования, сглаживания. На фрагментах термограммы, соответствующих полю с убранной пшеницей, нашне, полю с редкими озимыми, наблюдается скачкообразное изменение радиационной температуры при переходе от одного вида поверхности к другому.

В качестве эталона при проведении второго этапа дешифрирования выбран достаточных размеров участок поверхности с четко выражешным изменением радиационной температуры (поле убранной пшеницы). Значение масштабных множителей определялись последовательно сначала для фграгмента термограмм, соответствующего пашие, затем для поля с озимыми; соответственно они равны 0,66 и 1,85. Поправки для приведения



Рис. 30. Схема дешифрирования термограмм дистанционной тепловой съемки

а — необработанная термограмма; б - осредненные значения радиационных температур в пределах однородных по типам растительности участков, в — термограмма, ариведенная к эталонному участку. Цифры — виды новерхности: 1 - пашия; 2 — лесопосадка; 3 — убранная пшеница; 4 — лесопосадка; 5 + пашия; 6 — дорога; 7 — редкие озимые; 8 — дорога; 9 — стерия клевера; 10 — лесопосадка; 11 — озимые

фрагментов термограммы по постоянным составляющим для пашни, редких озимых, скошенного клевера и озимых равны соответственно 0,5; 0,9; —0,2 и 1,2 °C. Фрагменты термограмм после введения масштабных коэффициентов показаны пунктиром. Результаты второго и третьего этапов дешифрирования показаны на рис. 30, в.

Результаты площадных дистанционных тепловых съемок представляются в виде карт приращений радиационных температур (температурных аномалий) ΔT_{pag} . Значение ΔT_{pag} определяется для каждой дешифрированной термограммы относительно ее минимальной радиационной температуры. При построении карты необходимо привести кривые распределения ΔT_{pag} к одному виду земной поверхности. Для этого используется распределение температурных аномалий по вспомогательному маршруту дистанционной тепловой съемки, пересекающему все основные. Так вводятся масштабные множители для кривых, описывающих распределение ΔT_{pag} по основным маршрутам. Каждый множитель определяется из требования равенства приращений радиационных температур, соответствующих основному и вспомогательному маршрутам в точке их пересечения $K^1 = \Delta T_{pag, всп} / \Delta T_{pag, осп}$.

Некоторые вопросы теоретической интерпретации и численного решения обратных задач определения характеристик (интенсивности и области размещения) источника тепла по известным значениям внешней температурной аномалии, создаваемой данным источником на некоторой известной глубине, рассмотрены в работе В. И. Лялько и др. (1979).

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА

При радиолокационной (PJI) аэросъемке используется искусственный излучатель, приему подлежит отраженное излучение созданного электромагнитного поля савтиметрового днапазона, отчего РЛ-аэросъемку выделяют в группу активных. При радиолокационной съемке бокового обзора (РЛСБО) участок местности под самолетом исключают из обзора из-за плохого качества получаемого изображения. Отраженные от местности сигналы записываются на электронно-лучевой трубке в виде узкой линии, расположение объектов на которой определяется их наклонной дальностью, т. е. расстоянием от самолета до точки отражения импульсов (а не горизонтальной, как на топокартах); яркость светового пятна на строке пропорциональна интенсивности отраженного сигнала. Благодаря поступательному движению самолета получается непрерывное изображение местности вдоль маршрута. С электронно-лучевой трубки изображение фотографируется на пленку, скорость движения которой пропорциональна путевой скорости самолета. Указанная система получения РЛ-снимков обусловливает проекции изображения, отличающиеся как от центральной, используемой в аэрофотосъемках, так и от проекций сканерных снимков. А. В. Доливо-Добровольский [1976], проанализировав геометрию радиолокационных (а также других новых видов) аэроснимков, проекцию по строке изображения РЛ-аэроснимков предложил называть равнодальностной, проекцию по оси полета — равноскоростной. В новых типах РЛ-станций бокового обзора предусматривается частичная компенсация отклонений проекции РЛ-аэроснимков от ортогональной путем введения переменной скорости движения светового пятна по экрану электроннолучевой грубки и синхронизации скорости лентопротяжки с путевой скоростью самолета.

На выходе получают два снимка (с левого и правого бортов), разделенные нерабочей зоной, перекрываемой с других маршрутов. Масштаб получаемого изображения определяется параметрами станции и не связан прямо пропорциональной зависимостью с высотой полета. Заданные масштабы РЛ-аэросъемки с помощью системы «Торос» — 1:90 000 и 1:180 000, истинные масштабы изменяются как по строке изображения, так и по оси полета [Доливо-Добровольский, 1976]. Разработаны приемы трансформации РЛ-аэроснимков с переменным масштабом в изображение, приближенное к ортогональной проекции. В некоторых станциях используются съемки в более широком диапазоне изменения масштабов — от 1:100 000 до 1:500 000. Принципиально возможна РЛ-космосъемка, хотя ее применение сдерживается необходимостью установки на космических носителях Излучателей больщой мощности.

В настоящее время РЛ-аэросъемка широко внедряется в практику геологических исследований в Советском Союзе [Новые..., 1972; Комаров и др., 1973; Применение..., 1974, 1981; Комплекс..., 1978; Гальперов и др., 1979]. За рубежом этот метод используется не менее широко, причем не только в слабодоступных районах, где с его помощью обеспечено быстрое изучение больщих территорий, но и в районах, хорошо изученных ранее [Стрельников, 1971; Kirk, Walters, 1966; Simonett, 1966; Reeves, 1969; Sade-look..., 1970; Radar..., 1972].

Одной из особенностей РЛ-аэросъемки является возможность проводить ее в плохих мстеоусловиях, при сплошной облачности; помехой для нее являются только электрические заряды в грозовых облаках [Стрельников, 1972; Доливо-Добровольский, Стрельников, 19786]. Это определяет оперативность метода съемки и се значение для территорий со стабильно плохими для аэрофотосъемки метеорологическими условиями. В ряде районов РЛ-аэросъемка является чуть ли не единственным методом, обеспечивающим получение изображения значительных участков земной поверхности в течение одного летнего сезона. Так, осуществление Трансамазонского проекта стало возможным лишь после проведения американской фирмой «Вестингауз» РЛ-аэросъемки бассейна Амазонки, для которого из-за постоянно высокой облачности практически отсутствовали аэрофотоснимки. Большой объем геологических построений по территории восточной Панамы и восточной Колумбии выполнен на основе РЛ-аэроснимков (в этом районе из-за высокой облачности в течение 20 лет не могли провести аэрофотосъемку) [Viksne et al., 1969; Wing, 1971, MacDonald, 1973].

РЛ-аэроснимки по разрешающей способности сопоставимы с фотоснимками масштаба 1:400 000. Для получения фотоснимков с таким высоким уровнем генерализации изображения геологического строения надо использовать съемки с высотных самолетов с потолком полета около 20 км или космофотосъемки. Условия генерализации РЛ-изображения определяют целесообразность использования РЛ-аэроснимков для изучения относятельно крупных геологических объектов и их взаимоотношений в средних масштабах, при крупномасштабных исследованиях РЛ-аэроснимки являются дополнительным материалом для получения сведений о крупных геологических телах и структурах изучаемой территории (Стрельников, 1971, 1972; Доливо-Добровольский, Стрельников, 1978б). При благоприятных условиях РЛ-аэросъемка обеспечивает достаточно дробное расчленение разреза, выделение всех основных интрузивных тел, за счет высокой обзорности объективные сведения о крупных разрывных пликативных и блоковых структурах и их взаимоотношениях [Новые..., 1972]. Условия высокой генерализации приводят к более отчетливому проявлению в РЛ-изображениях геологических факторов формирования ландшафта, что, как и в случае космических снимков, определяет ведущую роль структурно-геологических признаков опознавания [Применение..., 1981].

На РЛ-аэроснимках очень четко проявляется рельеф местности [Стрельников, 1971, 1972], что связано прежде всего с условиями косого визйрования, в результате чего относительно небольшим превышениям рельефа соответствуют длинные тени. РЛ-аэроснимки иногда сравнивают с аэрофотоснимками, снятыми при низком стоянии солнца [Clark, 1971]. Однако РЛ-аэроснимки более предпочтительны. Во-первых, тенями наиболее четко поддерявляются то проемшетия в рельсфе, которые расположены периездикулярно волучателю. Положение солние на местности в определенные часы надачо, тогда как при РЛаэросъежке можно менять каправления маршрутов, добивансь канболее выгодного визирочания [Стрельнаков, 1974, 1972], выполнить свемку в двух взаямно осраждануларных направленных к т. д. Во-вторых, на аэрофотосъемку в утреньне и вечерние часы накладываются страцичения из-за сдабой освещенности местности, тогда как РЛ-ланаратура обеспецияатся целазволячие от времени съемки облученность, значения которой но профилко определениется диаграммой ваправленности антенач.

Другим фактором, определяющим более четкое изображение реаьефы на Р.Л.аэроснимке, язлиется отсутствие расселияя облучающих РД дучей в атмосфере (Цолино-Добровольский, Стрельников, 1978б]. В карофотоскемие изглениюю совощение создает метеются фон, саказальзающийся на домасянрующее рельеф распределение освещенчость почеруясстой. Влесте с тем в горных райочах длиниые радкочени, являющиеся одновременно с этик и мертвыми совани (яз-за созпадники ислучатели и приеминка е одной точке), служат помехой, так как дря этом значительные участки местиоста не изображаются и их надо изучать по снямкам с другого борта. Четког изображение рельефа определяет возрастание роли гноморфолисических аричисков опознавания, хотя и ограничивает их набор ко-за невысской разрешающей способлости и худших условий сторгоскопического виблюдания [Доливс-Добровольский, Стрельников, 19786]. Особенное значение приобретает повышение зеткости маобряжения рельсфа в сочетачии с высокой обзорностью РЛ авроснямков, чогда как область черкого наблюдения рельефа на аврофотоскимках оприличена нолем стереоскопикеского зредия, а в стерсоизображения на космофотоснямках тех же мосштабов набаюдоется сильно уплощенная модель местности (Доливо Добровольскай, Стрельников, 1976).

Более четкое изображение рельефа поззоляет в ряде случаев повысить изубящность дешифрирования на территориях развития рылкых отложений, облекающих расчлененный рельеф коренных пород. Тек, В. А. Стеростиным в предгорыях Копетдата по РУЗавреснимиам выявлен ряд брахиоструктур, терспективаных на нефть и сва (Невыс..., 1972). А. В. Целкос-Добровольским на территории Западного Прибалхашья отдениифрированы структуры исложенных мулы, каменке угольного покраста, закрытых рыхлыму отложевиями, Г. В. Гальперевым и А. В. Перновым выявлен рид кольцевых структур на закрытой территории Тургайского протиба (Гальнеров и др., 1979).

Длина-электроматичной волны определяет особенности се отражения. Одным из зажнейших факторов ивляется «переховатолть» отражившей поверхности (Цолкво-Добровольскай, Стрельсяков, 19786). Гладкче, блазкие к зеркальным позеркности (я для длян РЛ-золи количество таких поверхностей гораздо больше, чем для случая герофотосъемки) карактеризуются темными (до чоского) тонами изображения, капример залиры, незакреименные тамиы в селки (пра отсутствии резких соловых форм), лецян, горизсьтвльные скалізме повераности, мля, ягельвика, луговая растительность (при отсутствия отдельных куртия), болоть (при отсутствия резких гридово-моналениям форм) в т. н. По мере увеличения диффузности рассеявия тон РД-изобряжения становится более светлым. Для РЛ-аэроснымкоз диффузными отрамстелями являются. элювыяльно-делизиельные разеалы, адлюживаныне талечиным (инстуа устанивливиется заенсимость между тоном взображених и размерами обломком), луговая растительность при наличия кургии, грядово-мочажищные комплексы ся болотах, кустарнаки и т. а. Еще более светлами точали взображения харектеризчются так казываеные глыболые поверхности, в составе которых ссть вертикально стоящае объекты. И ним относятся у сояховых отражателя, остоственные (загорные серрасы, точнавы отдельности на крутых склоках и т. п.) в искусственные (металлические формы, релисы, сочетание асфальта а стен домов ч т. в), дес (рис. 31), крупносонбовче развеля.

Повмисенала влажность поверхность приходят к появлению сильно отражающих илонок и зыралниванию незокреплетных рызым отложений, что зывывает истемнение тога изображения (Доливо-Доброносъский, Стрельников, 19786).

На тон МЛ-изобряжения влияют также конффакционты отражения горных пород аля их нацикаторов и дла азоне ОЛ-лучей. Из теории известно, что величина воэффи ционта стражения пряме завлент от диальстрицеской гостолиной, магнитной процидаемости и вроводимости горных пород. Анализ этой зависимости в диалазоне частот Р.Лконебаний похальтвает, что ведущее зависиме имеет дложестрическая гостоянные; прово дивость существения лише для сильног роводяниих объектов, магнитала произваемость для больши части герлогических тех блиски к сдунице и существенно лише для ферромагинтака жилезных буд, и металлических технотенных объектов. Сильный, Р.Л-сигнал 92



Рис. 31. РЛ-аэроснимки территории развития нелинейных структур гнейсового комплекса лебяжинской свиты кейвской серии (Кольский полуостров, Большие Кейвы)

Гнейсы интрудированы многочисленными дайками и телами амфиболитов — линейными, кольцевыми, неправильной формы, четко выделяющимися в рельефе и в результате приуроченности к ним густых ельников характеризующимися светлыми сигналами РЛ-изображения (глыбовые отражатели)

от леса отчасти связан и с повышенной проводимостью живой массы леса, зимой при уменьшении проводимости контраст РЛ-сигналов от леса и луга сокращается.

Таким образом, РЛ-аэроснимки дают сведения о крупных чертах геологического строения района, при этом особенности изображения обеспечивают получение некоторых дополнительных сведений по сравнению с аэрофотоснимками более высокой резрешающей способности.

Использование РЛ-аэрофотоснимков позволило получить ряд новых данных о геологическом строении изучаемых территорий. Высокая обзорность снимков позволяет эффективно использовать их для суждений о рангах разрывных структур, о взаимоотношениях разрывной и пликативной тектоники и структурных форм разных этажей складчатости. При дешифрировании РЛ-аэроснимков были выявлены ранее неизвестные кольцевые структуры (вулкано-плутонического или вулкано-тектонического генезиса, структуры гранитообразования), которые после этого удалось опознать и на аэрофотоснимках [Применение..., 1974, 1981; Доливо-Добровольский, Стрельников, 1976; Гальперов и др., 1979].

В ряде районов применение РЛ-аэроснимков привело к выявлению ранее неизвестных структурных несогласий. Так, при изучении РЛ-аэроснимков Кольского полуострова А. В. Доливо-Добровольским [Новые..., 1972, Доливо-Добровольский, Стрельников, 19786; Применение..., 1981] установлен ряд структурных несогласий в сложноскладчатых структурах докембрийских толщ (рис. 32, 33). В ряде районов намечено коррелирующееся несогласие в основании глиноземистых толщ: в Аллареченском и Заимандровском районах в разрезе кольско-беломорской серии, в Больших и Малых Кейвах в основании кианитовых сланцев червуртской свиты, залегающих на лебяжинских биотитовых



Рис 32 Мелкомасштабная схема геологического строения восточной части Имандра Варзуг ской зоны и прилегающей части Терского блока (Кольский полуостров) Составлена во материалам дешифрирования комплекса многоканальных космических снимков полученных со спутника «Ландсэт»

Карелий 1-6 — назы имандра варзугской серии (сариолий) 1-2 — сейдореченская свита (1 верхняя подсвита — метаднабазы 2 — нижняя подсвита — кварциты кварцито песчаники алевролиты филлиты) 3-6 — рижтубская свита (3-5 — верхняя подсвита — метадиабазы диабазовые метапорфк риты метамандельштейны из них 3 — нерасчлененная 4.5 — верхняя и нижняя группы покровов по данным дешифрирования 6 — иижняя подсвита — аркозы и кварциты) 7-15 — кожплекс свит Малых Кейв (сумий) 7—10 — пурначская свита (7 — верхняя подсвита — метанзвестняки 8 — средняя подсвита — метадиабазы метамандельштейны 9 — горизояты метатерригенных пород в средней подсвите а также базальные горизонты разных свит на врезке рис 33 10 — нижияя подсвита — аркозы и кварцито посчаники с карбонатным цементом линзами конгломератов в основании в северном крыле изменен ные щелочным метасоматозом до амфиболсодержащих «конгломератовидных» пород) 11 12 — романов ская свита (11 — верхняя подсвита — метадиабазы метамандельщиенны амфиборо метамандельшиенны 12 — нижняя подсвита — аркозы я кварцяты с линзами конгломератов в основании) 13-14 — стрель нинская снята (13 — верхняя подсянта — амфиболито метадиябазм амфиболито метамандельштенны 14 — нижняя подезита — кварциты є конгломератами в основании) 15-16 — песцовотундровская свита - кварцяты на рис 33 кварциты и мелкогалечные контломераты) 17—22 лопин 17 — карелии — (15 ловий нерасчлененные 18 — червуртская свита кейвской серия — преимущественно кианитсодержащие сланцы 19 — лебяжинская свита кейвской серии — биотитовые гнейсы 20 — полмостундровская свита тундровоя серии — сланцеватые амфиболиты 21 — биотитовые гнейсы и сланцы нижней части разреза тувд ровон серии 22 — то же с прослоями двуслюдяных сланцев 23 24 — беломорский комплекс 23 — гранат биотитовые и силлиманитсодержащие гнейсы и сланцы верхов кольско беломорской серии 24 — кольско беломорская серия — амфяболовые гнейсы 25 -30 - интрузианые породы 25 - щелочные граниты форма ции щелочных гранитов (на рис 33 эта формация нерасчлененная) 26 — ще точные гранито гнеисы форма ции щелочных гранитов 27 28 - гранитоиды разных типов 29 - группа формации основных и ультраос повных пород 30 - формация мигматит гранитов 31-37 - отдешифрированные разрывные нарушения 31- по коремическим снимкам (нь рис. 33 по мелкомасцитабным космическим снимкам). 32-34- но РЛ аэроснимкам [на рис 33 по снимкам «Ландсэт» прямолинеяные разломы первого (32) второго (33) и третьего (34) рангов] 35 -- кольцевые разломы гранитных овалов 36 -- кольцевые разломы в связи с интрузней шелочных гранитав «в слепом залегании» 37 — прочие кольцевые разломы (на рис 33 раз домы овальных структур саамского гранитообразования) 38 — структурные линии 39 — отдешифрирован ные геологические границы 40 — поверхности несогласий

На врезке показано положение территории в сети разрывных нарушений южной части Кольского полуострова по данным дешифрирования телевизнояных космических сиников Дугообразно изогнутый линенный прогиб Имандра Варзугской зоны приурочен к системе дугообразных разломов отделяющих Терский сетмент гранитного овала В основаниях комплексов нород видны структурные несогласия



Рис 33 Среднемасштабная схема геологического строения восточной части Имандра Варзугской зоны (Кольский полуостров) Составлена по материалам дешифрирования РЛ аэроснимков

Условные обозначения см. на рис. 32

На врезке показано положение территории в сети разрывных нарушении дешифрирующихся по космическим снимкам (ср. с. рис. 32). В основаниях комплексов порол видны структурные несогласия

гнейсах, и т п С ним же коррелируется несогласие между кислыми и основными гранули тами в Сальнотундровской и Кандалакшско Колвицкой синклинорных зонах (устанавли ваемое по аэромагнитным данным), а также несогласне в Карельском Беломорье Этот уровень несогласий отвечает, по видимому, границе беломория и лопия Следующий уро вень коррелирующихся несогласий выделен в основании кварцитов и кварцитовых сланцев в верхах кейвской серии в Больших и Малых Кейвах Эту границу предлагается выде лять как границу лопия и сумия Выше по разрезу четко наблюдается еще одно структурное несогласие, отделяющее сумийский комплекс Малых Кейв, состоящий из трех осадочно вулканогенных циклов, каждый из которых также отделен от нижележащего несогла сием Ряд выделенных несогласий подтвержден угловыми несогласиями, замеренными при полевых исследованиях, выявлением древних кор выветривания и другими данными Есть и другие примеры выявления структурных несогласий по РЛ аэроснимкам Так, в пределах Авпалачей установлено азимутальное несогласие между сланцами Мар тинсбург и кварцитами Тускарора [Wise, 1967]

Использование РЛ аэросъемки привело к выявлению разломов и зон разломов,, объединению известных разломов в крупные зоны, уточнению их положения [Новые , 1972, Доливо Добровольский, 1978, Применение , 1981] Так, на территории Сально тундровского синклинория (Кольский полуостров) установлено юго западное продолже ние Урагубско Юовайвского разлома, фиксирующегося по широким зонам смятия, изме нению характера разрывной тектоники в контактирующих блоках (в юго восточной части хорошо видны складчатые структуры Сальных тундр, северо-западная часть имеет вид битой тарелки и, несомненно, имеет иную историю геологического развития), по приуроченности к этой зоне узких приразломных синклиналей, выполненных высоко глиноземистыми толщами, и по другим признакам В восточной части Кольского полу острова на РЛ аэроснимках видно исключительное сходство морфологии ряда массивов щелочных гранитов (рис 34) Стрельнинского, Пурначского, Каневского, предполагае



Рис. 34. РЛ-аэроснимки массивов щелочных гранитов

а — Пурначского массива (видно двухъядерное строение интрузии); б — предполагаемого массива в слепом залегании, перекрытого метаэффузивами и проявленного в рисунке разломов. Расположение массивов см. на рис. 33

мого массива в слепом залегании. Все эти массивы находятся в одной линейной зоне, наблюдение которой стало возможным благодаря высокой обзорности РЛ-аэроснимков.

По РЛ-аэроснимкам выделен также ряд крупных пликативных и блоковых структур [Доливо-Добровольский, Стрельников, 1976; Применение..., 1981]. Так, например, на РЛ-аэроснимках территории Кольского полуострова хорошо видны гранито-гнейсовые купола и более сложные структуры реоморфического типа, напоминающие гнейсовые овалы (по Л. И. Салопу), в качестве блоковых кольцевых структур выделяются ареалы гранитообразования разного возраста (рис. 35). На РЛ-аэроснимках Карелии четко дешифрируется центральная часть Калевальского гранитного овала. На территории Казахстана видны Жалгыз-Джельтауская овальная структура фанерозойского гранитообразования, южная часть Чуйской овальной структуры срединного массива, к периферии которой приурочены дугообразно изогнутые наложенные мульды каменноугольного возраста, а также мелкие кольцевые структуры вулкано-плутонического происхождения. Отдешифрированные по РЛ-аэроснимкам Северного Приохотья неотектонические депрессии обрамляют периферию Охотского овала, выявленного А. В. Доливо-Добровольским по космическим снимкам.

На РЛ-аэроснимках обычно более четко, чем на аэрофотоснимках, видны вулканоплутонические и вулкано-тектонические структуры. Иногда они впервые выявляются по РЛ-аэроснимкам, и только потом удается опознать их положение на аэрофотоснимках. Так было, например, при изучении Кураминского хребта, где выявленные кольцевые структуры этого типа потенциально рудоносны (Применение..., 1974, 1981]. Ряд вулканотектонических и вулканических структур изучались по РЛ-аэроснимкам Камчатки [Новые..., 1972], Охотско-Чукотского вулканогенного пояса [Бабкин, Литовченко, 1976], Забайкалья, Армении, Тунгусской синеклизы [Комплекс..., 1978] и других регионов. 96



Рис. 35. Р.Л-аэроснимки, показывающие внутреннюю структуру метаморфических комплексов пород

а — западное окончание Кейвской структуры (черные полосы — кварциты и кварц-мусковитовые сланцы, светлые — амфиболиты и метамандельштейны; видны структурные несогласия); б — щелочные граниты Западно-Кейвского массива (видны спаянные воедино изометричные ядра — центры гранитообразования); в — гемисинклинальное осложнение линейной структуры восточной части Имандра-Варзугской зоны (гемисинклиналь находится между куполами щелочных гранитов, занимающих правый и левый верхние углы снимка; светлые полосы — кнанитовые сланцы и метаэффузивы, темные — кварциты и конгломераты; видны структурные несогласия; расположение см. на рис. 33)

Высокая обзорность РЛ-аэроснимков использовалась для проведения палеотектонических реконструкций, в частности в свете представлений глобальной тектоники. Так, изучение РЛ-снимков Центральной Америки и севера Южной Америки позволило установить в этом районе разрывные нарушения, разделяющие крупные блоки, приразломные структуры, типы движений, которые согласуются с общими представлениями о движениях микроплит [Wing, 1971]. В дальнейшем предполагается использовать для РЛ-аэросъемки поляризованные волны; это расширит объем получаемой информации [Simonett, 1966]. Интересны также съемки в разных диапазонах длин волн [Dellwig, 1969]: использование радиовысотомерного диапазона позволит получить изображение местности со снятой растительностью а диапазона длин волн больше 1 м — отражения от коренных пород, покрытых рыхлыми отложениями.

СПЕКТРОМЕТРИРОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Как известно, различные геологические объекты имеют различную отражательную способность, и в качестве характеристики этой способности используется величина спектрального альбедо, или спектрального коэффициента отражения (СКО). Изучение СКО различных комплексов горных пород позволяет отличить их друг от друга, и этот признак с необходимыми поправками может быть использован для дистанционного опознавания и картирования комплексов горных пород с помощью многозональных аэро- и космосъемок. Однако, прежде чем использовать этот метод, необходимо собрать банк данных о СКО горных пород, полученных на разных расстояниях от измеряемых объектов, в разных условиях их обнаженности и при разном характере поверхностных изменений. Работа эта далека от завершения.

Ниже приводятся новые результаты наземного спектрометрирования горных пород. Исследованы наиболее распространенные породы Родопского массива в Южной Болгарии, а именно магматические (риолиты, гранодиориты, различные граниты) и метаморфические (различные виды гнейсов, амфиболиты, мраморы, пегматиты) породы и тесно связанные с ними метаморфизованные ультрабазиты (рис. 36—38). Измерения СКО проводились спектрометром ИСОХ-020. Прибор имеет двадцать спектральных каналов в диапазоне 400—800 нм; ширина отдельных каналов 10—12 нм, входной угол зрения 13°.

Эксперименты проводились как в полевых, так и в лабораторных условиях. В полевых условиях были спектрометрированы естественные обнажения пород, как недавние, так и покрытые пылью и растительностью. В лабораторных условиях были спектрометрированы образцы размером 9×12 см с естественной неравномерной шероховатостью. Дополнительно одна из сторон образцов была отшлифована. В качестве источника света использовалась ксеноновая лампа. С целью доведения до минимума влияния света, диф-





0,4

0,5

0,7

0,6

0.8

R. MKM



Рис. 37. Объединенные спектральные кривые вулканитов, гранитоидов и метаморфического комплекса

а — вулканиты: 1—2 — в лабораторных условиях (1 — шероховатая и 2 — полированная поверхность) 3 — в полевых условиях, 4 — объединенные 1—3, 6 — гранитоиды в лабораторных условиях: 1 — биотитовые, 2 — двуслюдяные, 3 — граноднориты, 4 — объединенные 1—3, в — метаморфический комплекс (объединенная кривая лабораторных к полевых измерений всех видов гнейсов, амфиболитов, мраморов, метаморфозированных ультрабазитов и пегматитов)



фузно рассеиваемого окружающими предметами, приборы и образцы ставились на черной непрозрачной матовой ткани. Расстояние между прибором и образцами подбиралось таким образом, чтобы в поле зрения прибора попадала максимально большая часть измеряемой поверхности.

Все вулканические породы характеризуются низкими коэффициентами отражения. Для кислых пород величина СКО в спектральном интервале 402—802 нм варьирует от 22,8 до 35,3% (см. рис. 37, а). При полевых измерениях увеличение СКО находится в тех же пределах, но в лабораторных условиях разница увеличивается до 14% для шероховатой поверхности и уменьшается до 7% для полированной. Для среднебазитовых пород СКО резко уменьшается [Spiridonov et al., 1980].

При полевых измерениях в диапазоне 501—597 им наблюдается быстрое увеличение значений СКО, что в известной степени обусловлено травяной растительностью. То же самое относится и к значениям СКО в интервале более 700 нм (см. рис. 37, б). В умеренных широтах наиболее часто встречаются вулканические породы, большей частью покрытые почвой и растительностью. В этом случае благоприятными диапазонами, в которых наблюдается постоянство отражения, являются интервалы 402—440 и 700—802 нм. Наиболее неблагоприятными являются быстро изменяющиеся значения СКО в интервале 500—700 нм.

Гранитонды отличаются более высокими значениями СКО (см. рис. 37, б) — от 38,8% при 411 нм до 49,2% при 775 нм, с общим повышением во всем спектральном диапазоне на 11,1%. Если проследить изменение СКО отдельных типов гранитондов, можно установить, что эта закономерность находится в большой зависимости от минерального состава, в частности от соотношения темных и светлых минералов. Структурно-текстурные особенности в том случае не имеют большого значения.

Изменение СКО биотитовых гранитов — в пределах 38-48,5% (см. рис. 38, a), а двуслюдяных гранитов — 48,3-62,3% (см. рис. 37, b), т. е. наблюдается разница в 14%. У гранодиоритов отражательная способность резко уменьшается (см. рис. 37, b) из-за увеличения содержания темных минералов, причем уменьшение СКО в коротковолновой области спектра достигает 22%. По сравнению с биотитовыми гнейсами это уменьшение равно в среднем 11%.

Надо отметить еще, что в коротковолновой области (402 нм) СКО выше в среднем на 15,7%, а в бляжней инфракрасной области (775 нм) на 13,9%, т. е. почти во всем спектральном диапазоне наблюдается (в среднем на 13—15%) более высокое отражение, чем у вулканических пород. Эти результаты дают основание считать, что возможно успещное разграничение кислых вулканитов от гранитоидов в полевых условиях, например в аридных районах. При одинаковых условиях освещенности вулканиты всегда имеют более темный фототон на многозональных снимках и многоспектральных изображениях. Этот вывод действителен и для умеренных широт при отсутствии почвенного и растительного покровов.

Измерения СКО различных видов гнейсов показывают приблизительно одинаковые отражательные характеристики (см. рис. 36). Некоторые небольшие различия обусловлены различием минерального состава и структуры. Ясно, что при наличии идеальных условий (отсутствие растительности, хорошее раскрытие и пр.) их выделение на этом этапе будет невозможно.

Сравнением гнейсов и кислых магматитов (см. рис. 37) можно установить, что в первой зоне постоянства СКО (402—440 нм) его значения следующие: для гранитоидов — 38,5%, для кислых вулканитов — 17%, для гнейсов — 15,4%. Во-второй зоне постоянства (507—701 нм) значения СКО таковы: для гранитоидов — 46,8%, для вулканитов — 38,8%, для гнейсов — 28,7%. Видно, что у этих трех групп пород со сравнительно сходным минеральным составовм наблюдается постоянство в измерении спектральных характеристик: повышение при переходе гнейсы — вулканиты — гранитоиды. Это спектральное различие характерно для всего диапазона 402—802 нм. Сделанный вывод очень существен, так как при дешифрировании снимков Родопского массива, например, выделение этих трех типов пород затруднено, а в большинстве случаев даже невозможно, несмотря на различие в фототоне. Фототон изменяется постепенно, с трудноотличимыми переходами. В целях разделения необходимо спектрометрирование в коротковолшовой области видимого спектра.

Об остальных разновидностях метаморфического комплекса (мраморы, амфиболиты, метаморфизованные ультрабазиты и пегматиты) можно сказать следующее: мраморы и пегматиты имеют наиболее высокие СКО (см. рис. 38 б, г). В лабораторных условиях СКО равен 63,5% для мраморов и 63% для пегматитов при длипах воли соответственно 753 и 775 им. В полевых условиях в том же диапазоне закономерность обратная: 49% у пегматитов и 41,4% у мраморов. В данном случае структурные особенности не имеют значения, а влияние оказывает скорее быстро выветривающаяся поверхность мраморов, что уменьшает СКО на 8%. Хорошо выраженные области пегматитов могут быть легко опознаны на снимках среди гнейсов и труднее среди гранитоидов.

При полевых измерениях СКО амфиболитов и ультрабазитовых пород наблюдаются почти одинаковые его значения во всем спектральном диапазоне — в среднем 11—24% (см. рис. 38, а, в). По сравнению с остальными компонентами метаморфического комплекса амфиболиты и серпентиниты могут быть во всех случаях успешно дешифрированы на многозональных и сканерных снимках, если занимают большие площади.

Существенным фактором, затрудняющим распознавание и дешифрирование комплексов пород на черно-белых многозональных изображениях, является травяная и лесная растительность. Полученные данные показывают, что растительность во всех случаях маскирует литологию. Оба характерных для растительных сообществ минимума и максимума СКО хорошо наблюдаются во всех измерениях. Первый максимум особенно хорошо выражен в интервале 546—597 нм, т. е. в зеленой части спектра. Резко увеличивается отражательная способность растительности в интервале 701—800 нм, т. е. в близкой к инфракрасной области спектра. Здесь величина коэффициента отражения зависит от ряда фитоценометрических показателей: высоты растительности, густоты, листового индекса, фитобиомассы и т. д. Аналогичное отрицательное влияние оказывает и почвенный покров.

Проведенные исследования показывают, что СКО дает дополнительную информацию, с помощью которой возможно выделение некоторых видов магматических и метаморфических пород, но только в случаях, когда они занимают сравнительно большие площади и хорошо обнажены. Растительный или почвенный покров маскирует разницу в СКО различных пород. При дистанционном спектрометрировании этот эффект будет усиливаться, и задача усложняться. Для получения действительно существенных результатов, позволяющих дешифрирование вещественного состава на снимках на основе спектральных характеристик, в близком будущем необходимы следующие работы: 1) продолжение наземных измерений СКО в целях накопления информации об исследуемых объектах, установления новых закономерностей и составления каталога спектральных отражательных характеристик; 2) синхронное спектрометрирование с самолета и спутника и сопоставление полученных данных; 3) специализированное спектрометрирование растительного и почвенного покрова, а также различных водных объектов в целях установления связи между этими элементами и соответствующими типами скальных пород.

ЛИДАРНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Дистанционная лидарная спектрометрия, как и описанная в предыдущем разделе система радиолокации бокового обзора, входит в группу активных съемок. Лидарная спектрометрия представляет собой метод геохимической съемки, позволяющий обнаружить микросодержание некоторых элементов или их соединений в атмосфере. Наличие в атмосфере этих элементов и соединений может быть обусловлено как современной активностью тех или иных зон нарушений и проницаемости, по которым они проникают из земных недр, так и концентрацией в земной коре определенных веществ, в том числе полезных ископаемых. Таким образом, рассматриваемый метод интересен для изучения современной активности земной коры и для цоисков полезных ископаемых.

Основы зондирования приповерхностных слоев атмосферы и регистрации результатов дистанционного спектрального анализа базируются на прияципах локации. Зондирующие установки, состоящие из импульсного источника излучения (лазера) и приемного устройства для анализа спектрального состава рассеянного (или поглощенного) исследуемым веществом излучения, получили название лидаров (от начальных букв английских слов Light Detection and Ranging), а сам метод такого зондирования — метода лидарной спектрометрии.

В настоящее время дистанционная лидарная спектрометрия развивается преимущественно в метеорологии в связи с исследованием загрязненности атмосферы. О возможности ее применения для поисков полезных ископаемых, создающих повышенные концентрации молекул определенного вида в приземных слоях атмосферы, встречаются лишь отдельные упоминания [Бирюлив и др., 1979; Jaffe, 1977].

В частности, в США ври Национальном управлении по аэронавтике и космическим

исследованиям в 1976 г. была создана специальная лаборатория, в которой разрабатывается научное направление «Дистанционные геохимические понски», включающее изучение возможностей определения в приповерхностных слоях атмосферы микросодержаний молекул углеводородов, йода и сернистого газа как индикаторов нефти, газа и сульфидных руд соответственно [Jaffe, 1977].

Для определения типовых концентраций веществ-индикаторов в приземной атмосфере над месторождениями полезных ископаемых, где их содержание часто не превышает тысячных долей процента [Бирюлин и др., 1979; Дианов-Клоков и др., 1975], требуются чувствительные методы исследований. Химические методы обычно дают представление о конечной концентрации вещества, часто искаженной побочными реакциями, происходящими при отборе проб. Физические методы анализа (ИК-спектроскопия, массспектрометрия, рентгено- и хроматография, пламенная фотометрия, люминесцентный анализ) более прецизионны и оперативны, однако не все могут быть отнесены к дистанционным, поскольку нуждаются в отборе проб.

Наиболее удобными для дистанционного оперативного определения вещественного состава приземной атмосферы являются оптические методы лидарной спектрометрии, использующие следующие эффекты взаимодействия лазерного излучения и газообразного вещества: вынужденное комбинационное рассеяние (КР), резонансное рассеяние, резонансное поглощение. Каждый из этих методом имеет свои преимущества и недостатки, а также области применения [Костенко, 1975; Табарин, Федоров, 1976].

В методе резонансного рассеяния лазер может быть настроен на одну из интенсивных полос поглощения искомого соединения. Флюоресценция, возникающая при просвечивании лучом такого лазера приповерхностных слоев воздуха, позволяет определить здесь наличие соответствующего индикатора полезного ископаемого.

Флюоресценцию газов можно возбудить как на колебательных частотах молекул (для этого нужны лазеры, работающие в ИК-диапазоне), так и на частотах электронных переходов, расположенных в видимой или ультрафиолетовой области спектра. Этот метод может применяться при определении таких элементов, как As, Be, Cu, Zn, Na, Rb, Hg. Его чувствительность при этом достигает нескольких миллионных долей (молекул) индикатора на миллион долей основного газа (воздуха), что выше, чем в методе КР. Однако существенное ограничение на использование метода накладывает так называемый эффект тушения излучения, объясняющийся тем, что в тропосфере и нижних слоях атмосферы среднее время свободного пробега молекул меньше их жизни на уровне с определенной избыточной энергией (в результате возбуждения лазером). Поэтому возбужденные молекулы, сталкиваясь с другими частицами, тратят свою энергию на увеличение кинетической энергии последних.

Преимущество м е т о д а р е з о н а н с н о г о п о г л о щ е н и я заключается в его высокой чувствительности (до 10^{-6} миллионных долей) и в возможности применения для возбуждения молекул индикатора сравнительно маломощного лазера. Недостатки метода следующие: во-первых, он характеризует интегральное содержание веществаиндикатора вдоль всей трассы распространения лазерного луча, а не локально — только в приземной атмосфере; во-вторых, метод требует вынесения приемника или отражателя лазерного луча на другой конец трассы. Если же в качестве отражателя используется земная поверхность (растительный покров, вспахавная земля), то чувствительность метода может резко понизиться за счет низкой отражательной способности объекта

Процедура измерений при использовании метода резонансного поглощения заключается в записи участков спектра поглощения всей толщи атмосферы (между летательным аппаратом и земной поверхностью) вблизи линий основных полос поглощения искомого соединения-индикатора, при фиксированных абсолютной влажности воздуха и его температуре. Методика обработки состоит в вычислении общего содержания соединения-индикатора по всей толще атмосферы (сантиметры слоя, приведенные к нормальным условиям) по измеренной эквивалентной ширине линии (площади на спектрограмме, ограниченной контуром линии поглощения) с помощью зависимостей

$$u_{z} = \frac{W^{2}}{4S_{N}a_{N}a_{m}} f(T) f(p), \qquad (6.16)$$

$$f(T) = \left(\frac{T}{T_{N}}\right)^{n} \exp\left[\frac{E_{jk\sigma}}{K} \left(\frac{1}{T_{N}} - \frac{1}{T}\right)\right], \qquad (6.17)$$

$$f(p) = \left(\frac{P_{N}}{P}\right)^{2},$$

где $S_N a_N$ — соответственно интенсивность и полуширина спектральных линий при нормальных условиях; Q — константа, зависящая от модели атмосферы; m — воздушная масса; n=3/2 для CO, n=2 для CH₄ и т. д. (для каждого соединения-индикатора определяется индивидуально); E_i — энергия нижнего уровня; h, c, K — соответственно постоянная Планка, скорость света и постоянная Больцмана; p, T — соответственно давление и температура на уровне моря; $p_N = 1,013 \cdot 10^6$ дин/см²; $T_N = 273$ К. Значения констант S_n и a_N определяются индивидуально для соединений-индикаторов [Дианов-Клоков и др., 1976; Малков и др., 1976].

К преимуществам метода комбинационного рассеяния относятся:

1) высокая разрешающая способность по дальности, полное устранение неоднозначности расшифровки информации о веществе-индикаторе вследствие большого смещения комбинационного рассеяния относительно длины волн возбуждающего света, возможность определения различных веществ с помощью одного лазера с фиксированной длиной волны; это связано с тем, что комбинационные сдвиги строго специфичны для разных молекул и не зависят от длины волны возбуждающего света;

 возможность определять абсолютные концентрации интересующих веществ путем сравнения с сигналами комбинационного рассеяния азота или кислорода, высотный профиль концентраций которых в атмосфере хорошо изучен.

К недостаткам метода относится, его сравнительно небольшая чувствительность (до 10⁻⁵ миллионных долей), которая определяется малым сечением процесса комбинационного рассеяния. Попытки увеличить чувствительность приводят к увеличению мощности лазера, т. е. к удорожанию установки и возрастанию ее потенциальной опасности для человека.

Типовая блок-схема КР-лидара состоит из импульсного лазера, служащего для возбуждения спектра комбинационного рассеяния; телескопа, который в режиме передачи расширяет параллельный пучок лучей, а в режиме приема собирает рассеянное КР-излучение на входную щель спектрального прибора; системы регистрации и обработки информации.

Мощность сигнала (6.17) соответствующей линии, попадающей на спектральную аппаратуру с расстояния R, описывается соотношением.

$$I = I_L \operatorname{crk} T_L TGSN(R) \, \delta \pi R^{-2},$$

где I_L — мощность лазерного излучения; t — скорость света; t — длительность лазерного импульса; k — коэффициент эффективности передаточно-приемной оптической системы; T_L и T — соответственно коэффициенты пропускания атмосферной трассы на длине волны излучения лазера λ , и длине волны λ линии комбинационного рассеяния; G — параметр геометрического перекрытия переданного и принятого пучка света; S — эффективная площадь телескопа; N(R) — концентрация исследуемых молекул в области зондирования; δ — поперечное сечение линии комбинационного рассеяния в обратном направлении.

Величина δ является коэффициентом пропорциональности между интенсивностью возбуждающего излучения и полученной интенсивностью линий КР ($I \sim \delta I_L$) и зависит примерно процорционально от частоты возбуждающего излучения. Естественно, что пропорционально росту δ увеличивается и сигнал I КР.

Поэтому в лидарах для возбуждения комбинационного рассеяния следует использовать мощные импульсные лазеры, генерирующие свет в ультрафиолетовой области (0,26—28 мкм). В связи с тем что светимость неба в диапазоне длин волн больше 0,27 мкм существенно уменьшается вследствие поглощения солнечного излучения озоном верхних слоев атмосферы, в этой области значительно улучшаются условия регистрации слабых спектров КР. Увеличение чувствительности КР-лидаров возможно при работе на базе вращательного спектра КР.

Телескоп в лидаре служит и передающей и приемной антеной. Чем больше площадь и лучше качество поверхности телескопа, тем больше чувствительность и дальность зондирования системы. Обычно диаметр телескопа мобильных лидарных установок не превышает 0,5 м.

Приемником незначительных КР-смещений могут служить интерферометры Фабри-Перо в режиме Фурье-спектрометра. Спектральная аппаратура такого типа позволяет увеличнть не только чувствительность, но и светоснлу прибора. Задача состоит в том, чтобы такие спектраьные приборы были малогабаритными, пригодными для эксплуатации на борту летательных аппаратов и оборудованными электронной многоканальной системой скоростной регистрации слабых световых сигналов.

(6.18)

Современный уровень разработок в этом направлении позволит вести дистанционное зондирование с помощью КР-лидаров на расстоянии до 10 км с чувствительностью до 10⁻⁵ миллионных долей.

По-видимому, для целей дистанционной геохимической съемки с помощью лидарной спектроскопии следует использовать совместно методы вынужденного и резонансного поглощения и рассеяния. Это должно обеспечить сравнительно высокую чувствительность определения веществ-индикаторов (до 10⁻⁶миллионных долей) при умеренной мощности лазерного источника возбуждения.

К сожалению, объем аппаратурных и методических разработок для целей дистанционных поисков полезных ископаемых пока недостаточен. Одной из первых отечественных работ, в которой освещается методический подход и полевой эксперимент дистанционной наземной лазерной спектрометрии метана в приземном воздухе в целях оценки возможностей геохимических поисков нефтегазовых залежей, является работа сотрудников Московского инженерно-физического института и Института прикладной геофизики [Бобович, 1974].

В основу метода измерений авторами этой работы положено резонансное поглощение метаном ИК-излучения гелий-неонового лазера, так как излучения на двух длинах волн генерации этого лазера ($\lambda_0 = 3,3922$ мкм и $\lambda_1 = 3,3912$ мкм) по-разному поглощаются метаном и практически одинаково — атмосферными осадками, пылью, туманом. Это позволяет на основании регистрации изменения отношений мощностей излучения лазера (P_0/P_1) на указанных длинах волн после прохождения в атмосфере некоторого пути (L) судить о среднем содержании в этом интервале метана ($C \cdot 10^{-4}, \%$).

Если на выходе лазера отношение мощностей излучения на указанных волнах равно P_0/P_1 , а после прохождения лазерным излучением расстояния *L* в атмосфере с содержанием метана С это отношение становится равным P_0/P_1 , то в соответствии с законом Бугера

$$C = \frac{\left[\ln\left(\frac{P_0'}{P_1'}\right) - \ln\left(\frac{P_0}{P_1}\right)\right]}{\Delta x \cdot L} \cdot 10^6,$$
(6.19)

где $\Delta \kappa$ — разность сечений поглощения метаном излучений λ_0 и λ_1 . В бедных метанововоздушных смесях $\Delta \kappa = 9.1 \cdot 10_2 M^{-1}$ (кгс/см²)⁻¹.

Для указанных целей авторами была создана специальная установка на базе трехволнового лазера. Лазерное излучение проходит в атмосфере путь L/2 до уголкового отражателя и возвращается на фотоприемник. Погрешность измерения концентрации метана в атмосфере на трассе длиной L/2 = 50 м колеблется от 0,01 до 0,1 · 10^{-4} %.

Опытные работы, проведенные в пределах Анастасиевско-Троицкого газонефтяного месторождения (лазерную установку размещали на автомобиле и измерения выполняли на высоте 2 м от земной поверхности), зафиксировали аномальные превышения концентраций метана в районе месторождения над фоновыми значениями. Это позволяет считать перспективным подобный нефтегазопоисковый метод [Бобович, 1974].

В заключение отметим, что дистанционная геохимическая съемка в целях поисков полезных ископаемых (нефть, газ, сульфидные руды) по соответствующим веществаминдикаторам (гомологи метанового ряда, йод, сернистый газ) должна проводиться в комплексе с дистанционными съемками земной поверхности и приповерхностных слоев в инфракрасном и радиотепловом диапазонах спектра электромагнитных колебаний для выявления геотермических аномалий, сопутствующих нефтегазовым залежам и сульфидным рудам. При интерпретации съемочных материалов должны широко использоваться аэрокосмические снимки в оптическом диапазоне и наземные геологические, геофизические и геохимические данные. Подобный подход существенно увеличит надежность и однозначность прогнозов.

Обязательным условием таких съемок должно быть наличие специальных полигонов с хорошо изученными геотермическими и геохимическими условиями, характеризующими участки над определенными видами полезных ископаемых и фоновые участки. Подобные полигоны над нефтегазовыми залежами, опробованные наземными и дистанционными геотермическими съемками, имеются в Днепровско-Донецкой впадине [Лялько и др., 1979]. Съемки следует начинать от таких изученных полигонов, где в момент съемки наземные группы должны синхронно с дистанционными измерениями обеспечить наземные определения температур земной поверхности и концентрации в приповерхностном слое воздуха вещества-индикатора, что необходимо для привязки и последующего дешифрирования результатов дистанционных геохимической и тепловой съемок.

Съемки необходимо начинать с более мелкомасштабных (с более высотных летатель-

ных аппаратов), и полученные на этом этапе аномальные участки в последующем должны подвергаться более крупномасштабным дистанционным и наземным поисковым работам. Предварительные расчеты похазывают, что широкое применение дистанционной геохимической съемки в комплексе с тепловыми съемками позволит существенно повысить эффективность геолого-поисковых работ и сэкономить в масштабах страны значительные средства. Применяя такую комплексную методику дистанционного изучения геологических объектов, мы предлагаем исследовать следующие вопросы.

1. Изучение глубинных структур литосферы с помощью геологического дешифрирования разновысотных аэрокосмических снимков и геотермо-геохимического зондирования. При этом последнее, фиксируя по площадным или линейно ориситированным аномалиям участки и зоны прогрева и насыщенности глубинными компонентамииндикаторами (например, гелием), позволит более однозначно определить положение глубинных флюидоподводящих зон, которые затруднительно трассировать, пользуясь только аэрокосмическими снимками.

2. Выявление зон и участков перспективной нефтегазоносности и полиметаллической рудоносности. При этом дистанционная геотермическая съемка (ИК- и СВЧ-диапазоны) фиксирует (после фильтрации поверхностных помех) прогрев земной поверхности и приповерхностных слоев над нефтегазовыми залежами и сульфидными рудами, а дистанционная геохимическая съемка (на основе лидарной спектроскопии) позволяет оконтурить эти залежи по аномальным содержаниям в приповерхностной атмосфере поисковых на нефть, газ и сульфидные руды соединений-индикаторов (углеводородовгомологов метанового ряда, йода, сернистого газа и др.).

Огромный объем первичного материала, получаемого при аэрокосмических съемках в видимом дианазоне, съемках в ИК- и СВЧ-диапазонах и лидарной спектроскопии, а также необходимость его обработки в целях исключения поверхностных помех, искажающих глубинный поисковый сигпал, требуют обязательного создания автоматизированной системы обработки (дешифрирования) первичного материала.

Аппаратура, привлекаемая для решения указанных вопросов, должна быть исполнена в варианте сканера и представлять собой комплексную многоканальную станцию дистанционного активного и пассивного зондирования земной поверхности в разных диапазонах спектра электромагнитных колебаний, т. е. иметь: 1) ИК- и СБЧ-радиометры с точностью не хуже 0,1 °C; 2) лидарные установки с точностью не хуже 10^{-6} ; 3) устройство для ввода получаемой информации в ЭВМ; 4) разрешение по пространству около 10-50 м (в зависимости от задач); 5) систему визуализации площади съемок.

Ориентировочные расчеты показывают, что экономичность комплексных дистанционных методов в геологии должна быть почти на порядок выше экономичности наземных работ.

Глава 7

КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Источником большинства видов аэрокосмической информации, кроме материалов магнито-, гравиметрической и у-съемок, является земная поверхность, представляющая собой совокупность природных, в том числе геологических, объектов. Они находятся в различных соотпошениях и могут быть связаны генетически. Аэрокосмические методы и средства содержат информацию либо о самих геологических объектах, либо об объектах, с ними связанных, т. е. информацию прямую или косвенную.

Аэрокосмическая информация представляет собой пабор сигналов, характеризующих те или иные физические свойства объектов, т. е. является их отражением (образом, изображением). Зарегистрированные сигналы не точно отвечают тем, которые исходят от объектов, из-за искажений, создаваемых передающей средой, прежде всего атмосферой, и регистрирующей аппаратурой. Но даже если эти искажения удается более или менее корректно учесть, в опознавании геологических объектов по их дистанционным изображениям остаются значительные трудности. Они связаны с особешкостями самого источника информации — земной поверхности.

Отождествление природных объектов на их дистанционных изображениях производится по дешифровочным признакам — величище и характеру сочетания сигналов, присущих данному объекту. Крайне редко бывает так, что наличие дешифровочного признака свидетельствует о существовании объекта с вероятностью, равной единице. Таковы, например, спектральные характеристики выходов соленосных отложений, интенсивные цоложительные анамалии теплового излучения или гамма-излучения, однозначно указывающие на наличие источника, хотя обычно и не раскрывающие его природы. Чаще вероятность реализации дешифровочного признака меньше единицы. Это зависит от того, что регистрируемые сигналы, характеризующие обычно яркость (интенсивность излучения) в том или ином диапазоне и даже совокупность (спектры) таких сигналов в нескольких диапазонах, являются интегральным эффектом, обусловленным всеми природными объектами участка излучения. Это вещественный состав горных пород и их вторичные поверхностные изменеция, степень и характер нарушений и деформаций, почвенный покров, растительность, антропогенные воздействия и т. д. Тому же геологическому объекту (например, выходу горной породы) в неодинаковых природных условиях отвечают разные совокупности сигналов, и разные природные объекты, в том числе геологические, дают сходные изображения.

При такой ситуации достоверность опознавания геологического объекта и его особенностей может быть существенно повышена выявлением независимых дешифровочных признаков, получаемых разными дистанционными методами и средствами. В одних случаях это обеспечивает решение поставленной задачи, в других — оказывается недостаточным, тогда возникает необходимость комплексирования материалов аэрокосмических съемок и измерений с другими, наземными источниками геолого-геофизической информации. При этом предварительное использование дистанционных материалов нередко сужает рамки наземных исследований, т. е. удешевляет их и делает более целенаправленными, а комплексная корреляция данных наземных и дистанционных исследований обнаруживает неизвестные ранее качества объектов или уточняет их характеристики. Проблемы комплексирования различных видов дистанционных съемок и измерений друг с другом и с наземными источниками геолого-геофизической информации лучше рассмотреть конкретно, применительно к различным классам задач.

При решении структурно-геологических задач применяется ряд аэрокосмических изображений разного масштаба и разрешения на местности, причем масштаб и разрешающая способность наиболее детальных изображений должны примерно соответствовать или быть немного выше детальности картографического материала, документирующего исследуемые структуры. Общая стратегия исследования такова, что на мелкомасштабных изображениях гипотетически выделяются типовые объекты и намечаются их соотношения, а затем картина все более детализируется и уточняется с помощью дистанционных материалов более высокого разрешения. Необходимость использования мелкомасштабных изображений, заведомо не способных передать особенности строения исследуемых структур, обусловлена двумя обстоятельствами. Во-первых, на таких изображениях видны соотношения с другими структурами и место исследуемого объекта в системе, которой может быть ассоциация одновозрастных структур, сочетание структур или структурных направлений разного возраста, пространственное распределение фаций осадочных или вулканических пород и т. д. Во-вторых, характер отображения структур на снимках разного масштаба позволяет предварительно оценить глубину их заложения и классифицировать по этому принципу.

Для выделения и картирования литолого-стратиграфических комплексов пород необходимы многозональные спимки. Весьма полезными могут оказаться также данные многоканальных спектрометрических измерений.

Результаты дешифрирования структурных форм, их элементов и сочетаний, литолого-стратиграфических комплексов пород необходимо проверять наземными исследованиями на типовых участках. Для определения глубины заложения отдешифрированных геологических тел, структурных форм и зон нарушений результаты дешифрирования сопоставляются с имеющейся геолого-геофизической информацией. Могут проводиться и дополнительные геолого-геофизические наблюдения с целью получить такую информацию. После интерпретации всего комплекса данных может возникнуть необходимость снова вернуться к материалам дистанционных съемок и уточнить формы выделенных объектов и их пространственные соотношения.

Тот же ряд разномасштабных изображений применим для изучения и картирования проявлений современных геологических процессов и их источников (сейсмоактивных структур, вулканов, тектонически обусловленных участков эрозии и аккумуляции поверхности и т. п.). В отличие от древних геологических объектов при изучении современных процессов и развивлющихся структур возрастает роль периодически повторяю-

щихся дистанционных съемок и измерений. Они помогают определять возникшие изменения (преобразования гидросети, разрушения в очаговой области сильного землетрясения, появление новых оползней, продуктов вулканической и поствулканической деятельности), ставить и решать прогнозные задачи. Долгосрочный прогноз строится на изучении закономерностей тесноты связи интересующего нас явления с той или иной геологической ситуацией, т. е. определенным сочетанием структур, комплексов пород, гидрогеологических особенностей, рельефа. Аэрокосмические съемки и измерения полезны при долгосрочном прогнозе настолько, насколько проясняют эту геологическую ситуацию. Текущий прогноз основан на предвестниках данного явления. Некоторые из них могут регистрироваться дистанционными средствами. Таковы изменения дебита источников подземных вод, газовых выделений и теплового потока в активных структурах перед землетрясениями, изменения режима дегазации вулканов перед извержениями, изменения увлажненности селе- и оползнеопасных склонов и т. п. Уточнение подобных предвестников и способов их дистанционной регистрации позволит поставить вопрос об аэрокосмическом патрулировании областей, где возможны стихийные геологические явления, в целях их предупреждения. Важная роль в этом принадлежит наряду со съемками в видимом и ближнем ИК-диапазонах тепловой, СВЧ-съемкам и в будущем лидарной спектрометрии, а также использованию космических средств для сбора и передачи данных наземных станций наблюдения.

Применение аэрокосмических материалов при геологических исследованиях в целях прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых основано прежде всего на выявлении структурных условий, с которыми обычно связаны месторождения. Это в равной степени относится и к нефтегазовым, и к рудным месторождениям. Использование ряда разномасштабных изображений позволяет постепенно повышать точность прогноза и сужать рамки поисков от рудных и нефтегазоносных провинций до районов и конкретных структур. Для изучения рудоносных структур необходимы аэрокосмические снимки высокого разрешения. При этом важную диагностическую роль играют спектральные характеристики горных пород. Возможность обнаружения локальных структур, перспективных для поисков нефти и газа, в значительной мере обусловлена их унаследованным неоктоническим развитием, определяющим выражение структур в современном рельефе, характере четвертичного покрова, распределения почв, растительности и степени увлажненности. Для выявления этих особенностей также важны спектральные характеристики ландшафта.

Принципиально иным путем дистанционного поиска залежей нефти, газа, а вероятно, и сульфидных руд является обнаружение связанных с ними положительных тепловых аномалий и специфичных газовых эманаций. Возможности для этого открывают тепловая съемка и лидарная спектроскопия. Независимость этих критериев от структурных признаков месторождений делает особенно ценным комплексирование тепловой съемки и лидарной спектроскопии с многоканальным спектрометрированием и разномасштабной многозональной съемкой в видимом и ближнем ИК-диапазонах.

Итак, сочетание разномасштабных аэрокосмических съемок и измерений в разных спектральных диапазонах существенно повышает возможности их применения для решения различных геологических задач. Сами по себе дистанционные методы и средства обычно не дают полных решений этих задач. Но их комплексирование с наземными методами и средствами геолого-геофизических исследований существенно удешевляет работы и делает их более эффективными как в теоретическом, так и практическом отношении.
оглавление 👘

•

	Введение (А. В. Пейве, В. Г. Трифонов, А. Л. Яншин)	3
	Часть первая	
	ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРИ- МЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.	7
Глава I.	Методология и методические основы геологического дешифрирования космических снимков (В. И. Макаров)	7
Глава 2.	Использование математических методов в дистанционном зондировании для рещения геологических задач (В. К. Кучай, Д. Н. Чучадеев)	, 14
Глава 3.	Методика инструментального дешифрирования аэрокосмических изображения (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). Проблемы улучшения традиционных геологических карт (С. С. Шульц мл.).	45 50
	Применение многозональных 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) Структурно-геологическое изучение горно-складчатых областей (С. Ф. Скобелев, К. И. Войтории, В. Н. Спириов. С. В. Казанора)	64 68
_	н. п. Бойговач, Б. П. Смарлов, С. Б. Гевишова),	00
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) Раднолокационная съемка (А. В. Доливо-Добровольский) Снектрометрирование горных пород (Н. Кацков, Х. Спиридонов, М. Червеняшка) Лидарная спектрометрическая съемка (В. И. Лялько)	76 90 98 101
Глав а 7.	Комплексное применение дистанционных методов при геологических исследова- инях (В. Г. Трифонов)	105
	Часть вторая	
	ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ И НОВЕЙШИХ ГЕОЛОГИ- ЧЕСКИХ ПРОПЕССОВ	108
France 6		100
17404 0	M_{0} повретенности повели и сопростритенные процессы $(R \ f \ Tauthover \ R \ M \ Maranee)$	108
	Соотношения между механизмами очагов землетрясений и проявлениями сейсми- ческих зон на космических снимках (И. В. Ананьин). Современные вулканические явления и структуры (П. А. Гусев).	108 117 122

.

.

Глава 9	Современные и новейшие экзогенные процессы	134
	Экзогенные процессы как индикаторы новейшей структуры равнинных территорий (Л И Соловьева, Г С Бурлакова, Ю А Лион) Изучевие погребенной гидрографической сети на примере Туранской низменности (О М Борисов, В Н Полтавченко)	134 139
	Изучение и прогноз оползневых процессов (В К Кучай, с дополнениями А И Гущина, М Ю Никитина, В Д Скарятина)	142
Глава 10	Неотектовика в морфоструктурный анализ приохеанических областей	146
	Морфотектоника и кайнозойская история формирования материковых побережий Охотского и Японского морей (А П Кулаков) Морфоструктуры молодых вулканических областей Камчатки (Б В Ежов, С Ё Апрелков)	146 154
Главо П	Новейшие и современные геологические процессы на шельфе (В В Шарков)	158
Глава 12 V	Космическая информация, новейшие тектонические движения и рельеф (С С Шульц мл) .	164

Часть третья

		ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЛИНЕАМЕНТОВ И КОЛЫЦЕВЫХ ОБРАЗО- ВАНИЙ	173
Глава	13	Линеаменты и кольцевые образования Восточно-Европейской платформы	173
		Балтийский щит (А В Доливо-Добровольский) Русская плита (С И Стрельников) Запад Восточно-Европейской платформы (Р Г Гарецкий, О И Карасев, Э В Левков, А А Святогоров) Юг Восточно-Европейской платформы и Скифская плита (М А Кикина, С В Порошик)	173 179 185 189
Глава	14	Линейные и кольцевые структуры Крымско-Кавказской области (Н В Лукина, А С Караханян, Б В Сенин, В Д Скарятин, В Г Трифонов)	195
Глава	15	Линейные и кольцевые структуры Урала (С И Стрельнаков)	207
Глава	16	Линеаменты Туранской плиты (П В Флоренский, В П Крючков)	217
Главо	17	Линейные и кольцевые структуры Памиро-Тяньшаньской области (О М Борисов, А К Глих Н Т Кочнева, В И Макаров)	226
Глава	18	Линейные и кольцевые структуры Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты (Б Я Пономарев)	234
Глава	19	Лянеаменты Саяно-Тувинской области (В Е Гоникберг)	242
Глава .	20	Линеаменты и кольцевые образования территории МНР (Г И Волчкова, В И Макаров)	249
Глава .	21	Линеаменты и кольцевые образования юга Восточной Сибири и Дальнего Востока (В В Юшманов, Г Ф Уфимцев, Ф С Онухов, В Н Ставров, с дополне ниями Л В Флоренского, И В Флоренского)	254
Г гова	22	Линейные и кольцевые структуры Верхояно-Колымской складчатой области (В С Кравцов)	271
Глава	23	Планетарные линейные объекты и их нерархия но геолого-геоморфологическим, гравиметрическим и космосъемочным данным высоких уровней генерализации (Б В Сенин)	276
Глава	24	Системы трансконтинентальных линеаментов Евразии (В А Буш)	287
Глава	25	Крупнейшие кольцевые структуры континенталькой земной коры (А В Доливо- Добровольский)	299
Глава	26	Основные принципы, аснекты и проблемы дешифрирования и интерпретации , линеаментов и кольцевых образований (В И Макаров, Б В Сенин)	305

528

	Часть четвертая	
	ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В РУД- НОЙ ГЕОЛОГИИ	322
Глава 27	Использование космических снимков при изучении линейных рудоконтролярующих и рудоконцентрирующих структур	322
	Общие принципы анализа линейных структур (М А Фаворская) Морфоструктурные и структурно-геоморфологические методы выявления сквоз- ных рудоконцентрирующих и рудолокализующих структур (И К Вол-	322
	чанская) Использование космических снимков для выявления металлогенически специали- зированных секущих систем линеаментов (В С Кравцов)	325 335
Глава 28	Применение космических снимков при изучении мелкомасштабных кольцевых рудоконтролирующих структур	340
	Методические вопросы (<i>Н. Т. Кочнева, И. Н. Томсон, В. В. Середин</i>) Кольцевые структуры в рудных провинциях Средней Азии (<i>Н. Т. Кочнева,</i>	340
	И Н Томсон) Морфоструктурный анализ при структурно-металлогеническом дешифрировании	345
•	космических снимков континентальной окраины юга дальнего востока СССР (В В Середия) Морфоструктурное ранонирование и его зпачение для металлогенического про-	350
	гноза в Восточно-Сихотэ-Алинском поясе (на примере Петрозуевского и Усть-Амурского районов) (С М Тащи, А А Гаврилов)	368
Глава 29 -	Применение космических снимков в исследовании структур рудных полей и месторождений (ЮГ Сафонов, ВД, Парфенов)	372
Глава 30	Новые данные по геологическому строению Карамазарского рудного района	383
	Некоторые общие вопросы геологии и тектовики района (Е В Акимова, В И Завалин)	383
	Достоверность и информативность схемы дешифрирования разрывных парушений по космическим снимкам (<i>Е. В. Акимова</i>)	387
	глубинное строение қарамазарского рудного района и структурные дозиции некоторых рудных полей и месторождений (В И Завалин)	393
Глава 31	Геологическая позиция рудных полей и месторождений в Джидинском и Балей- ском рудных районах Забайкалья (В И Микляев)	403
	Часть пятая	
	ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	

.

.

В НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ

413

.

Глава 32	Дистанционные исследования в комплексе нефтегазопоисковых работ (П В Фло- ренский, А Н Дмитриевский, И И Скворцов)	413 /
Глава 33	Нефтегазоносные провинции древних платформ	416
	Волго Уральская нефтегазоносная провинция (Д И Дмитриева, Д М Тро- фимов)	416
	Юг Северо Каснийской нефтегазоносной прованции (В Г Варламов, А В Гурья- нов)	422
	Западная часть Восточно Европейской платформы (Р Г Гарецкий В Я Коже- нов О И Карасев, Э В Левков А А Святогоров)	426
	Днепровско Припятская газонефтеносная провинция (В И Гридин)	428
	Наземные и дистанционные геотермические исследования нефтяных месторождений (В И Лялько, М М Митник)	438
	Отражение структуры фундамента нефтегазоносных провинций Восточно Евро-	442
	Украинский щит (Я И Белевцев, С С Быстревская)	446
	Восточно Сибирская газонефтеносная провинция (А В Копылов, П В Флорен- скии, Т В Флоренская)	450

Глава З	4.	Нефтегазоносные провинции молодых плит	454
		Туранская нефтегазоносная провинция (В. П. Крючков, А. Н. Руднев, П. В. Фло- ренский)	454
		Ферганская нефтегазоносная область (В. К. Флоренский)	460
			465
		Ландшафтно-индикационные признаки глубинной структуры (Л. И. Со-	409
		Структуры газонефтеносных районов (В. В. Боровский, А. Л. Клопов, И. Л. Пе-	409
		сковский, Л. Л. Подсосова)	479
		Сургутский свод (Е. Л. Курбала)	484
Глава З	5.	Нефтегазоносные провинции альпийских владин	486
		Закавказская нефтегазоносная провинция (М. В. Аллахвердиев, Н. А. Ащумов, В. Н. Еписадев)	486
		Западно-Туркменская нефтегазоносная провинция (Г. И. Амурский, М. С. Бонда-	
		рева, Л. В. Пименова)	490
Глава З	6.	Эффективность применения методов дистанционного изучения нефтегазоносных	
		территорий (В. И. Гридин, П. В. Флоренский)	497
•		Заключение (В. Г. Трифонов, В. И. Макаров, Ю. Г. Сафонов, П. В. Флоренский)	502
		Литература	506

К стр. 243



Рис. 95. Карта лицеаментов и дуговых структур Саяно-Тувинского региона и его обрамления

1 — линеаменты и дуговые структуры: а — четкие и непрерывные, б — относительно менее четкие и (или) прерывистые, в — расплывчатые (линейные и дуговые орографические и ландшафтные аномалии); 2 то же, активно проявившиеся в рельефе и новейшей морфоструктуре (а, б, в соответствуют а, б, в знака 1); 3, 4 — то же, наиболее активно проявившиеся в рельефе (3 — уступы, 4 — борозды)



Рис. 144. Схема структурно-тектопического районирования Волго-Уральской нефтегазоносной провинции по космическим и геологогеофизическим данным [Карта..., 1976]

а — схема структурно-тектонического районирования Волго-Уральской провянции; б — розы-диаграммы линеаментов и разломов блоковых структур Волго-Уральского района.

структур Болго-Уральского ранона. 1 — линеаменты; 2 — линеаментные мегазоны; 3 — линеаментные зоны; 4, 5 — разломы; 4 — выявленные по геолого-геофизическим данным, 5 — дешифрируемые на космических снимках; 6 — изометричные структуры; 7 — изогипсы по кровле фундамента (в км); 8 — месторождения нефти к газа. Зоны и мегазоны двелокаций: А — Астраханско-Сулинская; Б — Приуральская; В — Ореко-Варшавская; Г — Куршско-Красноуфимская; Д — Скандо-Соликамская; Е – Тиманская; А — Самаро-Токская, Блоки: 1 — Сыктывкарский, 11 — Кировско-Пермский, 111 — Ульяновско-Уфимский, IV — Куйбышевско-Оренбургский. Авлакогены: 1 — Вятский, 2 – Серноводско-Абдулинский

.



снямков

.

• .

Рис. 94. Карта линеаментов и кольцевых структур платформенных областей Сибири по данным дешифрирования космических

1—3 -- динеаменты, выраженные на космических спимках очень четко (1), хорошо (2) и слабо (3); 4 — линеаментные зоны; 5—8 — кольцевые структуры, выраженные на космических снимках хорошо (5), слабо (6), образующие в рельефе поднятия (7) и окускания (8);
9 — линеаменты, интерпретируемые как красвые швы, ограничивающие платформы, красвые структуры и складчатые системы. Крупнейшие линеаментные зоны (цифры на схеме): 1 – Салехард-Хантайская, 2 — Березовско-Ванаварская, 3 — Обская, 4 — Пурско-Гыданская, 5 -- Омеко-Игарская, 6 — Писино-Хатангская, 7 — Ангаро-Норгльекая, 8 — Ангаро-Таймырская, 9 — Хантайско-Кунамская, 10 — Анабаро-Вилюйская, 11 — Ангаро-Вилюйская, 12 - Илимско-Айхальская; кольцевые структуры: 13 — Надымская, 4 — Нижневартовская, 15 - Обь-Енисейская, 16 — Норильская, 17 - Путорацская, 18 — Котуйская, 19 — Анабарская, 20 — Попягайская, 21 - Куонамская, 22 — Олевскская, 23 - Нижнетунгусская, 24 — Верхлевилюйская



Рис. 86. Тектоническая схема Урала. Составлена с использованием результатов дешифрирования телевизионных космических снимков

1 — кристаллический фундамент Русской илиты; 2 — Предуральский краевой прогиб. расчлененаый понеречными поднятиями на ряд изолярованных впадия (1 — Короталинская, II — Косым-Роговская, III — Больпесынинская, IV — Берхнепечорская, V — Юрюзано-Соликамская, VI — Бельская; 3 — 5 — структурные комплексы Западно-Уральской миогеосинклинальной зоны складчатости; 3 — верхний территенно-карбонатный девоско-каменноугольный, 5 — нажний, преимущественно карбонатный, ордовикскосилурайский; 6 — метаморфические комплексы дападно-Уральской миогеосинклинальной зоны складчатости; 3 — верхний территенносилурайский; 6 — метаморфические комплексы прогерозоя кембрия Центрально-Уральской автиклянальной зоны; 7 — архейско-раянспротерозойские комплексы Хобензского массива Лянинского автиклинория и Уфалейского купола; 8 — позднедокскобрайские метаморфические комплексы Бошкирского автиклинория; 9 — палеозойские вулканогепно-осадочные толици Татикло-Магнитогорского прогиба; 10 — шалеозойские комплексие востокно-Уральского колдичые и докембрийские метаморфические комплексы Воликирского автиклинория; 9 — палеозойские комплексы Восточно-Уральского поднятия; 11 — область развития структурноформационных комплексов Восточно-Уральского поргиба и Зауральского кодиятия; 12 — выход на дневную поверхность байкальского основания Тимания; 13 — нижний плаеозойский территенных карбонатный комплекс Большеземельской койлогенной области; 15 — Сафовонский метавая, 7 — верхией мезозойским территенных карбонатный комплекс Большеземельской койлогенной области; 16 — поднятия и порядка платфоромециего содики территенных карсованска, 3 — Тобышской койлогенной области; 15 — Сафовонский метавая, 5 — комное оконтаиенный мезозойским территенным комплексов; 16 — поднятия 1 порядка платформециего чехла Большеземельской койлогенной области; 17 — 19 — масчевы магатияской койлогенной баласти; 17 — 12 — мачео оконтаие Малоземельского свода, 6 — Колинский метавал, 7 — Берхиейский метавал, 8 — Варанаский вал, 9 — поднятие грады Чернышсва, 22 — Саванноской ко





Рис. 80. Схема основных линеаментов и структур центрального типа Русской плиты. Составлена с использованием материалов В. П. Кирикова и С. Н. Тихомирова

I — линеаменты, отдешифрированные на космических снимках; 2 — кольцевые разломы, ограничивающие структуры центрального типа; 3 — архейские массивы кристаллического фундамента; 4 — архейско-протерозойские складчатые системы кристаллического фундамента; 5 — крупные массивы гранитоидов в фундаменте; б — изогипсы поверхности фундамента (в км); 7 — основные разломы на поверхности фундамента; 8 — контуры Русской плиты.

Цифрами на схеме обозначены: структуры центрального типа: 1— Прибалтийская. II— Новгородская, III— Тверская, IV— Белозерская, V— Вологодская, VI— Онежская, VII— Котласская, VIII— Вильцюсская, IX— Западно-Белорусская, X— Могилевская, XI— Гомельская, XII— Принятская, XIII— Волынская, XIV— Подольская, XV— Ворошиловградская, XVI— Тамбовская, XVII— Медведицкая, XVIII— Орлово-Липецкая, XIX— Курская, XX— бредяеволжская, XXI— Горьковская, XXII— Ковернинская, XXIII— Вятско-Сыктывкарская, XXIV— Ветлужская, XXV— Уфинская; архейские массивы: I— Беломорский, 2— Вычегодский, 3— Вятский, 4— Камский, 5— Пермский, 6— Горьковский, 7— Волго-Урадьский, 8— Новгородский, 9— Вышиеволоцкий, 10— Даугавлилоский, 11— Западио-Литовский, 12— Минский, 13— Бобруйский, 14— Черкасский, 15— Придневровский, 16— Воролежский, 17— Приазовский, 18— Подольский