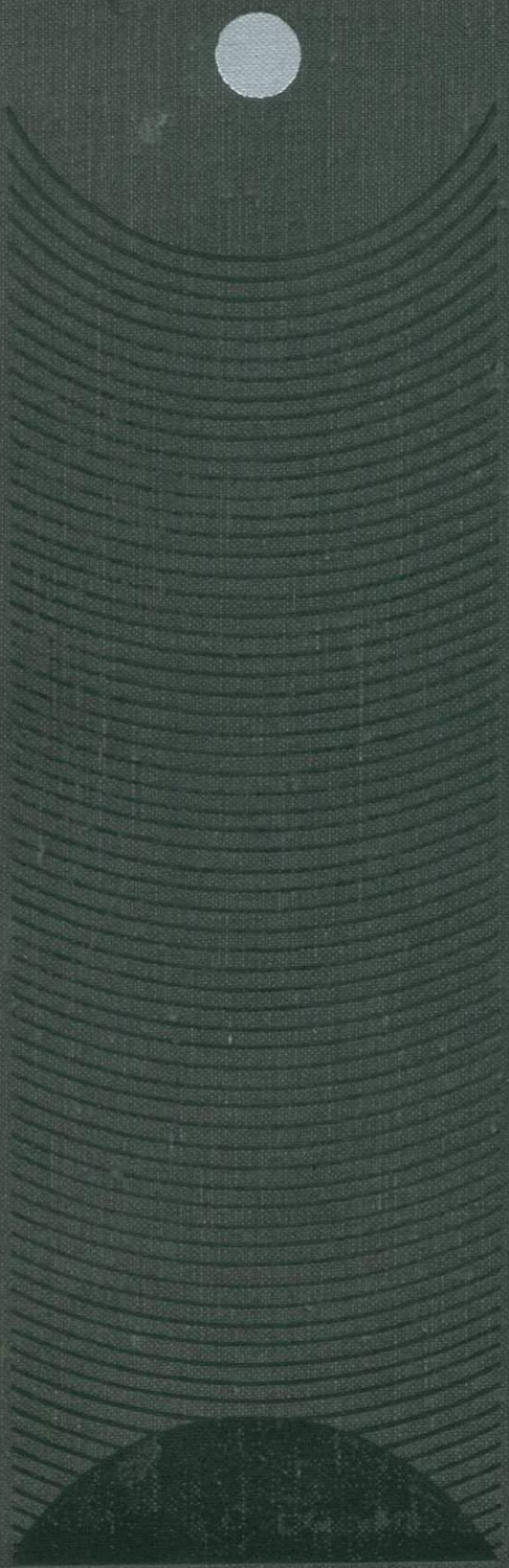
ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА



SYMPOSIUM ON SIGNIFICANT RESULTS OBTAINED FROM THE EARTH RESOURCES TECHNOLOGY

SATELLITE-1

The proceedings of a symposium held by
Goddard Space Flight Center
at New Carrollton, Maryland
on March 5—9, 1973

Compiled and Edited by
Stanley C. Freden, Enrico P. Mercanti,
Margaret A. Becker

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
Washington, D. C. 1973

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА

Под редакцией
С. ФРЕДЕНА, Э. МЕРКАНТИ, М. БЕККЕР

Перевод с английского
И. Г. ГОЛЬБРАЙХА, В. З. МАХЛИНА, Г. Р. МИРКИНА

Под редакцией и с предисловием
канд. геогр. наук Ю. Я. КУЗНЕЦОВА

55574

Издательство «МИР»
Москва 1975

УДК 550.8

В книге приведены материалы симпозиума, в которых впервые в открытой печати изложены результаты исследований природных ресурсов Земли с помощью специального спутника (ЕРТС-1), запущенного в июле 1972 г. в США.

Описаны сущность и методы исследования геологического строения, тектоники, геоморфологии, осадконакопления, а также методы геологической съемки и поисков месторождений полезных ископаемых с искусственных спутников.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, ведущих геологические исследования методами аэрофотосъемки и съемок со спутников, геологов, занятых в поисково-разведочных работах, студентов геологических вузов, специалистов научно-исследовательских геологических организаций.

Редакция литературы по вопросам геологических наук

Г $\frac{20804\text{-}131}{041(01)\text{-}75}$ 131-75 © Перевод на русский язык, «Мир», 1975

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первые же полеты космических аппаратов показали их огромное значение не только для изучения космоса, но и для исследования природных ресурсов Земли. Визуальные наблюдения из космоса, фотографическая и телевизионная, спектрометрическая, инфракрасная, радарная и магнитная съемки, выполняемые аппаратурой, установленной на спутниках и пилотируемых космических кораблях, стали источником обширной и во многом принципиально новой информации в области геологии, географии, метеорологии, океанологии, почвоведения, геоботаники и других наук, изучающих нашу планету.

Особенно велико значение этой информации для изучения геологического строения Земли и поисков полезных ископаемых, требующих глубокого «проникновения» в толщу земной коры. За короткий срок, прошедший со дня первого полета в космос Ю. А. Гагарина, способы исследования недр Земли с помощью космических аппаратов уже доказали свою высокую эффективность; так называемые космические методы [1] с каждым годом находят все более широкое и разностороннее применение. В то же время совершенно очевидно, что еще далеко не все возможности изучения Земли сверхдальними дистанционными методами выявлены и взяты на вооружение геологами. Для быстрейшего раскрытия этих возможностей необходим тщательный анализ накопленных данных.

Наибольший опыт использования «космических» методов в геологии накоплен геологами СССР и США. И не случайно, что именно в этих странах почти одновременно были опубликованы сборники статей, освещающих результаты и проблемы применения средств космической техники в геологических целях. Поэтому советские геологи с интересом встретят публикацию на русском языке книги «Геологические исследования из космоса», вышедшей в США в 1973 г.

Книга целиком посвящена результатам исследований различных аспектов геологии с помощью спектрометрической съемки со спутника ЕРТС-1, специально предназначенного для изучения природных ресурсов Земли. Спутник ЕРТС-1, запущенный в 1972 г., имеет систему дистанционного зондирования, состоящую из трех телевизионных камер типа «Супервидикон» и оборудованную спектрозональным сканирующим устройством, действующим в четырех или пяти диапазонах электромагнитного спектра. Информация, переданная спутником, обрабатывалась наземными автоматическими станциями, а затем поступала в распоряжение геологов и других специалистов в виде снимков различного масштаба и других данных. Анализ этих снимков, результаты

[1] Большая часть перечисленных выше видов съемки уже выполнялась и выполняется сейчас с самолетов, летающих в земной атмосфере, поэтому правильнее говорить не о космических методах, а о методах сверхдальнего дистанционного изучения геологического строения Земли.

их сопоставления с аэроснимками, топографическими, геологическими и другими картами, способы обработки и повышения информативности снимков составляют основное содержание статей. К сожалению, иллюстрации, особенно фотографии, в ротапринтном издании на английском языке весьма и весьма нечеткие. При воспроизведении для русского издания качество снимков, естественно, еще более ухудшилось.

Книга состоит из пяти разделов. В статьях первого, самого обширного, раздела «Геологическое картирование и структурно-тектонические исследования» описаны результаты дешифрирования снимков ЕРТС-1 с целью выявления основных черт геологического строения разных районов США и некоторых регионов Европы и Африки. Несмотря на различия в геологическом строении и географических условиях исследованных территорий, все авторы убедительно доказывают, что снимки из космоса позволяют выявлять не только легко картируемые элементы геологического строения, но и такие особенности, которые невозможно установить наземными наблюдениями и путем дешифрирования аэроснимков даже сравнительно мелкого (1 : 50 000—1 : 70 000) масштаба: разрывные нарушения, зоны трещиноватости, складчатые и кольцевые структуры, скрытые под покровом рыхлых отложений и даже под толщей осадочного чехла.

В разделе «Поиски полезных ископаемых» освещен опыт применения спектрометрической съемки для выявления месторождений железных, медных и других руд, а также месторождений нефти и газа. Не вызывает сомнений вывод авторов этого практически особенно важного раздела о том, что дешифрирование снимков из космоса дает геологам ценную информацию о региональных геологических структурах, контролирующих процессы формирования месторождений, позволяющую определять наиболее перспективные направления поисковых работ.

Внимание читателей-сейсмологов и вулканологов, несомненно, привлечет раздел «Изучение сейсмичности и вулканизма», характеризующий возможности использования спутников для сейсмического районирования территорий и прогноза извержений вулканов.

Раздел «Изучение рельефа и четвертичных отложений» показывает широкие возможности применения снимков из космоса для изучения и картирования различных геоморфологических объектов и комплексов четвертичных отложений, от эоловых образований африканских, азиатских и австралийских пустынь до гляциальных образований горных районов. Статьи этого раздела касаются и таких новых аспектов использования снимков, как картирование открытых горных выработок, периодическая оценка состояния растительного покрова на отвалах горных пород и экологические последствия дренажа шахтных кислых вод — аспектов, возникающих в связи с требованиями охраны окружающей среды.

Вошедшие в книгу статьи охватывают большой круг вопросов практического применения космической техники в геологии. Знакомство с ними советских читателей будет, несомненно, полезным.

Ю. Кузнецов

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ И СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

АНАЛИЗ И ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ЕРТС-1 ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

Д. Голд, Р. Паризек, С. Александер

(Факультет наук о Земле, Университет штата Пенсильвания)

ВВЕДЕНИЕ

Группа структур различного порядка и другие особенности геологического строения всегда находят отражение на детальных, региональных и даже обзорных геологических картах, однако истинные соотношения между структурами различного порядка можно установить и правильно показать на картах разного масштаба только в результате специального структурного анализа [32]. Кроме наблюдений и замеров, производимых непосредственно, значительный объем необходимых для этого данных получают дистанционными методами. Из материалов аэрофотосъемки составляются накидные монтажи или фотопланы для визуального изучения.

Тщательный синтез данных, накопленных в течение многих лет, и их сведение в едином более мелком масштабе позволили составить карты штатов, региональные, национальные и глобальные (для всего земного шара) карты. Однако сведение материала в едином масштабе не гарантирует того, что на мелкомасштабных картах обязательно проявятся все крупные геологические образования. Эмпирический подход к составлению монтажа, слабое представление о законах перевода информации из одного масштаба в другой и различные условия сбора данных (вариации в угле восхождения солнца, альбедо, сезонных условиях и т. д.) мешают выявлению плохо распознаваемых геологических образований. В этом отношении совершенно явна ценность снимков, полученных с помощью спутника ЕРТС.

К сожалению, большая часть данных, получаемых при использовании дистанционных методов, отражает лишь поверхностные признаки, т. е. выходы объемных (трехмерных) структурных форм на дневной поверхности. Для интерпретации глубинного строения и корреляции используемых параметров необходимо знать законы геометрии и понимать сущность используемых параметров. Практическая проверка выявленных дистанционными методами характерных геологических особенностей требует многолетних работ по сбору фактических данных, таких, как данные бурения, геофизических исследований и контрольных откачек [22].

ЗАДАЧИ

В данной работе внимание сконцентрировано на следующих вопросах: а) исследование возможности проведения эффективного регионального геологического картирования путем детального изучения данных по небольшой хорошо известной площади — эталонному участку; б) классификация линейных нарушений, хорошо выделяемых на аэрофотоснимках всех масштабов. Представляется, что настоящее исследование выявит возможность получения эффективных в экономическом отношении результатов при применении дистанционных методов геоло-

гических исследований в области гидрогеологии, инженерной геологии и при поисках рудных месторождений. При этом используется большой объем наземных данных для доказательства корреляции между структурами и подводится теоретическая база для установления соотношений между линейными элементами при их изучении в различных масштабах [15, 19, 26].

МЕТОДИКА

По мере приобретения опыта в дешифрировании снимков, т. е. распознавании на снимках реально существующих объектов и их интерпретации, методика фотогеологических исследований непрерывно совершенствуется. Критерии, используемые при картировании однотипных площадей (визуальное сходство фототона, пространственного рисунка или текстуры снимка), в зависимости от характера залегания коренных пород подразделяются на прямые и косвенные. В залесенных районах, таких, как Пенсильвания, для геологической интерпретации очень важно знание косвенных признаков, хотя их связь с условиями залегания коренных пород не всегда еще ясна.

Используются следующие основные параметры (критерии):

1. Границы, разделяющие на снимке области с различной тональностью, текстурой и пространственным рисунком. Если случайные границы обусловлены в основном различиями в использовании земель, например пахотные земли и лесные угодья, то однотипные, образующие определенную систему границы обычно отражают геологические структуры, особенно в области развития слоистых толщ. Сочетание обоих указанных факторов (например, лесной покров на невозделанных площадях) усиливает контраст и способствует интерпретации, если по фактическим данным можно установить причинные связи между признаками, используемыми для дешифрирования, и геологическим явлением. Так, диабазовые силлы восточной Пенсильвании лучше всего различаются на снимках, полученных в 5-й зоне спектра благодаря наличию на них лесного покрова, который четко выделяется среди окружающих его возделываемых полей.

2. Линейные формы рельефа (линеаменты) проявляются в виде узких полос различной тональности и выраженности в рельефе; кроме того, они фиксируются по смещению участков снимка с одинаковыми тональностью или рисунком. Это, как правило, протяженные структуры (от пяти до нескольких сотен миль). Одни из них проявляются в рельефе в виде прямолинейных борозд, возникших в результате деятельности воды и ветра; другие представляют собой отражение на поверхности даек, разломов, зон концентрации разрывов и т. д. без явных признаков смещения.

Основные стадии анализа данных ЕРТС:

1. Первичное сопоставление снимков, полученных посредством спутника ЕРТС в различных зонах спектра в масштабе 1 : 1 000 000 и увеличенных затем до масштаба 1 : 250 000, с данными о геологических границах, установленных по фактическим полевым материалам.

2. Картирование и классификация аномальных форм рельефа.

3. Районирование территории на основе параметров, изученных на эталонных участках, посредством группового анализа, проводимого с помощью ЭЦВМ (применение обучающей программы).

4. Районирование территории с помощью ЭЦВМ без применения обучающей программы для выявления любых скрытых особенностей рельефа, которые могут иметь геологическое значение.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СТРУКТУРНОГО КАРТИРОВАНИЯ

Несмотря на то что были разработаны необходимые программы для обеспечения работ на стадиях 3 и 4, исследование не продвинулось дальше общего сопоставления материалов и выработки классификации параметров. С помощью снимков, полученных в 5-й и 6-й зонах спектра в масштабе 1 : 250 000 с точностью до 400 м по отношению к геологической карте Пенсильвании (фиг. 1), были установлены контакты некоторых литологических разностей в восточной Пенсильвании, на-



Фиг. 1. Снимок со спутника ЕРТС-1 площади, расположенной восточнее Гаррисберга, штат Пенсильвания.

Нанесены границы докембрийских пород Ридинг-Пронг (1), Триасового бассейна (пунктирная линия), диабазовых силлов (2), формации Конестога (3) и разлом Мартик-Лайн (4) в провинции Пидмонт. Увеличенный снимок ЕРТС 1080-15185, полученный в зоне 5, 11 октября 1972 г.

пример формации Конестога, диабазовых силлов и выходов докембрийских пород Ридинг-Пронг. Ошибки возникают в основном при перенесении выявленных границ со снимков ЕРТС на топографическую основу.

В Пенсильвании четко различается ряд физико-географических областей, и в частности складчатый Аппалачский пояс, в зонах 5 и 7. Данные ЕРТС позволяют лишь незначительно уточнить существующие геологические карты этого региона, но четкая корреляция между выявленными по снимкам границами и фактическими данными указывает на возможность установления геологических границ на еще незакартированных площадях.

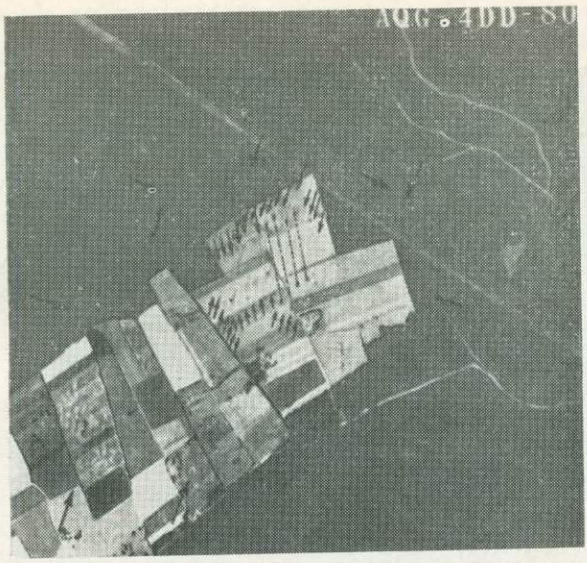
Примером комплексного использования данных о тональности поверхности, о форме границ, о растительном покрове и характерных спектральных характеристиках служит картирование диабазовых силлов и потоков в восточной Пенсильвании (фиг. 1). Некоторые рудные месторождения, связанные с диабазами, проявляются вдоль возможной зоны линейных нарушений, которая не видна на приведенных снимках.

ЛИНЕЙНЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА (ФИГ. 2А—2Г)

Введение. Возможно, наиболее интересные и неожиданные особенности снимков ЕРТС — количество, характер площадного распределения и рисунок неопределимых другим способом линейных элементов рельефа. Геологам давно известны прямолинейные и слабо изогнутые формы рельефа дневной поверхности. Их величина колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен футов, если они связаны с отдельными трещинами или системами трещин, и достигает десятков миль, если они отражают крупные линейные структуры; последние наблюдаются на аэрофотомонтажах, но обычно не обнаруживаются при полевых исследованиях. Латман [11] для обозначения линейных элементов рельефа (включая прямые отрезки водотоков), растительного покрова или изменения тональности пород, хорошо наблюдающихся на снимках и не превышающих в длину 1,6 км, ввел термин «след разрыва» (fracture trace). Термин «линеамент» (lineament) он предложил использовать для обозначения линейных элементов, длина которых превышает 1,6 км. Уайз [35] назвал такие образования региональных или субконтинентальных размеров линейными системами разрывов (linears) и отметил их независимость от региональных структур. Была проведена значительная работа по изучению и измерению ориентировки трещин в процессе полевых наблюдений, а совсем недавно (с 1957 г.) стали также изучать и «следы разрывов».

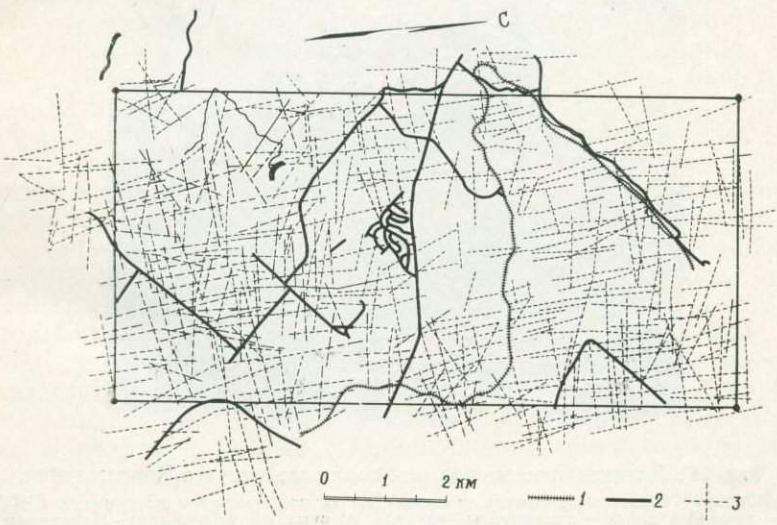
На основании полевых наблюдений и данных аэрофотосъемки в настоящее время по длине различают по крайней мере шесть категорий линейных форм; поскольку выявлена связь между трещинами и следами разрывов, то теоретически можно предположить, что механизм образования всех категорий линейных элементов сходен [2, 15, 19, 26].

Способы распознавания и характерные особенности. Кроме приведенных выше признаков следов разрывов, для выявления последних используют также данные о прямых участках долин, о резком изменении их направления, об ущельях в горах, о развитии глубоких оврагов, линейном расположении карстовых воронок и катавотр, о локализации ручьев и участков диффузной инфильтрации, локализации различий в характере растительного покрова и т. д. (фиг. 2А, 2Б) [22, 23]. Поскольку следы разрывов и линеаменты обычно прямолинейны и не испытывают влияния рельефа, то их рассматривают как проявление на дневной поверхности вертикальных или почти вертикальных зон разрывных нарушений [7, 14, 17, 18, 21—23]. В карбонатных породах вдоль следов разрывов могут образоваться впадины и депрессии глубиной 0,6—3 м или открытые катавотры (поноры) глубиной 3—15 м. Ширина таких депрессий, вероятно, зависит от мощности коры выветривания над коренными породами и ширины зоны разрывных нарушений. Калкинс [4] установил, что следы разрывов в гранитах представляют собой линейные депрессии глубиной 0,6—2,4 м и шириной 4,5—60 м. Согласно Паризеку [23], в области развития различных типов пород на территории США ширина таких депрессий колеблется от 3 до 30 м и даже более, а в некоторых местах Пенсильвании, где



Фиг. 2А. Следы разрывов (большие стрелки), едва различимые на возделываемых полях и на площадях, занятых лесом, штат Пенсильвания.

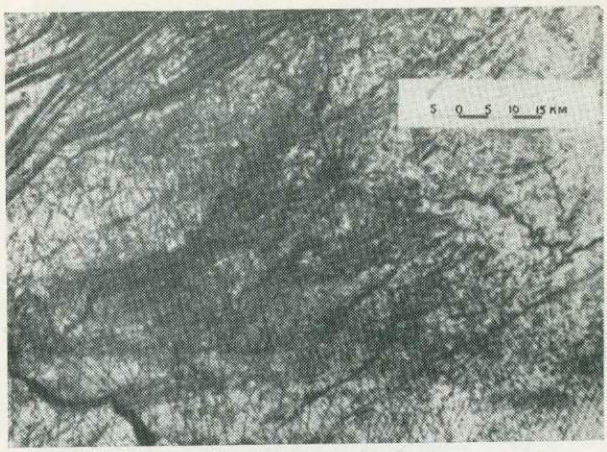
Разрывы перекрыты аллювием мощностью от 1,5 до 30 м и более, образовавшимся в результате разрушения известняков, доломитов и песчанистых доломитов. Трещины образуют системы, выделяющиеся благодаря пестроцветности тонального рисунка на возделываемых площадях (маленькие стрелки). Снимок Управления по аэрофотосъемке США AQG-4DD-80, обработанный Паризеком [20].



Фиг. 2Б. Распределение следов разрывов на площади вблизи университета штата Пенсильвания.

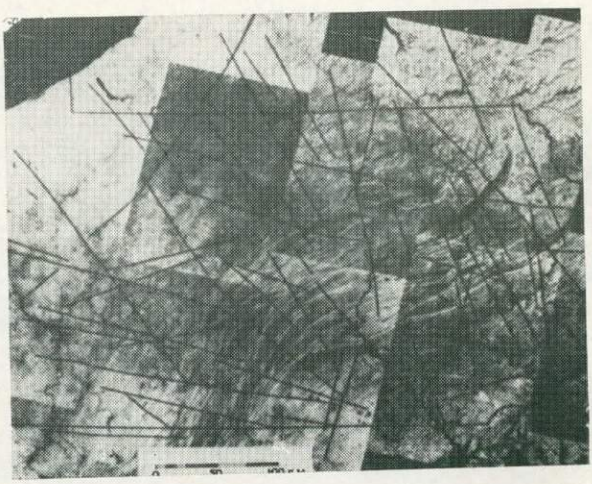
1 — главная железная дорога; *2* — главные и второстепенные дороги; *3* — следы разрывов и их пересечения.

Обратите внимание, что следы разрывов длиной менее 1,6 км сохраняют прямолинейность даже в области развития складчатых пород, распределены равномерно и ориентированы в **двух** отчетливо выраженных направлениях [25].



Фиг. 2В. Короткие до средних по длине линеаменты, пересекающие структурные Провинции бассейнов и хребтов, Грейт-Валли, Триасовый бассейн и Пидмонт в районе восточнее Гаррисберга, штат Пенсильвания.

Река Саскуэханна видна в левом нижнем углу снимка, а река Скулкилл — в северо-восточной части снимка. Ридинг расположен в центре снимка, на реке Скулкилл. Увеличенный снимок ЕРТС 1116—15192, полученный в зоне 7, 16 ноября 1972 г.



Фиг. 2Г. Длинные линеаменты, наблюдаемые в штате Пенсильвания.

Штриховые линии — известные разломы, смещение по которым заметно на снимках ЕРТС данного масштаба; сплошные линии — линеаменты, природа которых не установлена. На снимках хорошо видны физико-географические области: плато Аллегейни в северо-западной и западной частях фигуры, изогнутый Аппалачский складчатый пояс в центральной части фигуры и Пидмонт на юго-востоке. Темная серповидная площадь в северо-западной части штата соответствует Антрацитовому бассейну, расположенному в окрестностях Скрантона.

развиты смятые в складки карбонатные породы, нарушенные разломами, депрессии имеют ширину от 6 до 12 м. В поле развития аргиллитов и глинистых сланцев северо-восточной Пенсильвании ширина зон следов разрывов колеблется от 4,5 до 18 м и более при среднем значении 11,7 м. В этом случае зоны разрывных нарушений могут отклоняться от вертикали на 2—3° [22]. Отдельные трещины располагаются очень близко друг к другу. Их плотность изменяется от 5 до 60 и более трещин на 1 м. Они имеют параллельное или почти параллельное простирание и равномерно секут все коренные породы или концентрируются в отдельных слоях без явной вертикальной непрерывности.

Связь следов разрывов с пликативными структурами. Установлено [10], что в слабо дислоцированных коренных породах пенсильванского возраста Аппалачского плато трещины ориентированы параллельно следам разрывов. Этот факт, характерный для пологозалегающих пород, отмечается и другими авторами [3, 7]. В складчатых же областях следы разрывов и трещины имеют различную ориентировку [8, 12]. В районе Ниттани-Велли системы трещин, параллельных и перпендикулярных простиранию пластов, и следы разрывов не связаны с локальными складчатыми и разрывными структурами. Преобладающие простирания следов разрывов и трещин различны; следы разрывов не связаны, по-видимому, с узкими складками и обнаруживают тенденцию располагаться под постоянным углом 52° относительно простирания структур центральной Пенсильвании (фиг. 2Б). Данные ряда авторов [4, 10, 13] подтверждают вывод о том, что следы разрывов контролируются не локальными, а скорее региональными структурами.

Применение анализа следов разрывов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. Латман и Паризек [14] установили важную зависимость между наличием грунтовых вод и следами разрывов в карбонатных водоносных породах. В частности, выявлено, что следы разрывов приурочены к зонам локализованного выветривания, повышенной проницаемости и пористости. По данным Паризека, высокодебитные колодцы располагаются либо вдоль одного и того же следа разрыва, либо на пересечении следов разрывов, в то время как малодебитные колодцы располагаются в основном вне их. Сиддикви [29], Сиддикви и Паризек [29—31] показали, что следы разрывов представляют собой выражение на поверхности зон повышенной проницаемости и пористости. Более того, следы разрывов образуют в большинстве районов сеть пересекающихся линий (фиг. 2Б) и служат путями циркуляции грунтовых вод в блоках массивных пород. По ним осуществляется питание водой региональных водостоков, местоположение которых в свою очередь определяется теми же разрывами.

Отсутствие связи между водоносностью скважин и колодцев и следами разрывов в карбонатных породах Лебанон-Велли близ Гаррисберга связано, вероятно, с неправильным определением местоположения следов разрывов [16, 23]. Хорошая связь между водоносностью скважин (колодцев) и следами разрывов была установлена в процессе полевых работ в районе Сан-Паулу в Бразилии [27]. Уоббер [33] высказал предположение, что следы разрывов на территории штата Иллинойс могут быть использованы для выявления зон повышенной проницаемости коренных пород, перекрытых ледниковыми отложениями. Он установил связь между ориентировкой следов разрывов и трещинами в коренных породах, перекрытых наносами мощностью до 45 м.

Паризек и Войт [21] показали, что дешифрирование следов разрывов можно использовать при проведении инженерно-геологических изысканий для прогнозирования зон повышенной выветрелости пород (такие изыскания предваряют изучение фундамента под инженерные

сооружения), для прогнозирования участков потенциального обрушения кровли пластов и обводненных зон при проходке шахт и тоннелей, а также для обнаружения мест утечки или фильтрации вод под плотинами и в горных выработках. Зоны разрывных нарушений можно также картировать с целью выявления перепадов давления при фильтрации, возможных выбросов и поглощения раствора в скважинах и прогнозирования изменения прочности коренных пород. Точное понимание значения зон разрывных нарушений и сведения об их распределении необходимы также при планировании и проектировании проходки, перфорации и цементации скважин и горных выработок, для выбора местоположения наиболее высокодебитных напорных и высокоэффективных дренажных колодцев и скважин. Была показана возможность использования этой информации при проведении работ по уменьшению дренажа кислых шахтных вод [9, 22, 24].

Разломы. В Аппалачском складчатом поясе часто встречаются крутопадающие разломы и зоны разломов. Достаточно появления в породах полости размером лишь несколько футов, чтобы возникла концентрация потоков грунтовых вод и, следовательно, началось растворение и выветривание пород. Изучение обнажений в пещерах и карьерах показывает, что существуют и водонепроницаемые зоны разломов, по которым не развиваются процессы выветривания. В долине Ниттани-Велли приуроченность крупных водотоков к зонам разломов свидетельствует о региональном влиянии последних на гидрогеологический режим долины [23]. Длина разломов сбросо-сдвигов в отложениях Аппалачского складчатого пояса колеблется от нескольких миль до десятков миль. Разломы контролируют проницаемость коренных пород в региональном масштабе; по ним можно определить дренажную систему грунтовых вод. Уорман и Кози [34] отмечают, что сбросо-сдвиги в штате Алабама служат основными путями выхода на поверхность грунтовых вод из глубинных или удаленных источников питания.

Линеаменты (линейные формы). Линейные формы рельефа длиной более 1,6 км изучены значительно хуже. Хобс [5, 6], а недавно Латман, Паризек, Уайз и др. отметили их развитие в Пенсильвании (фиг. 2В, 2Г).

Несколько линеаментов, пересекающих региональные структуры и границы физико-географических областей, было обнаружено при визуальном изучении снимков, полученных с помощью системы ЕРТС-МСС. Условно выделено четыре категории линеаментов, различающихся по протяженности: от 1,6 до 8 км, от 8 до 80 км, от 80 до нескольких сотен километров и субконтинентального масштаба (мегалинеаменты). Соотношение длины и количества линеаментов с параметрами следов разрывов и трещин мало изучено, но, вероятно, существует обратная зависимость между длиной, количеством и пространственной плотностью линейных форм. Картирование линеаментов по данным ЕРТС затруднено вследствие колебаний их длины и различий в степени их проявления по простиранию (например, между хребтами и долинами или даже от одной долины к другой). Кроме того, линеаменты могут затушевываться следами деятельности человека (дороги, границы полей и т. п.).

Морфологические черты линеаментов и следов разрывов сходны, за исключением того, что линеаменты длиннее и не всегда различимы при полевых исследованиях, а также оказывают более значительное влияние на рельеф. Многолетние аэрофотосъемки и полевые исследования в центральной Пенсильвании не выявили многих линеаментов, отчетливо видных на снимках, полученных с помощью спутника ЕРТС-1. Однако и ранее было известно, что межгорные впадины, воз-

никшие в результате эрозионной деятельности воды и ветра, имеют линейную форму.

Линеаменты, как правило, прямолинейны и лишь иногда слегка изогнуты; вероятно, их расположение не зависит от простирания региональных структур. Однако некоторые линеаменты, отличающиеся большой длиной и расположенные на расстоянии около 16 км один от другого, перпендикулярны аппалачскому простиранию и образуют Аппалачский выступ. Разрывы и структуры волочения приурочены к широтным линеаментам, например к линеаментам, проходящим севернее Гаррисберга, и линеаментам, проходящим вблизи Геттисберга, через Южные горы. Большинство из них представляется совокупностью следов разрывов. На эталонной площади восточнее Гаррисберга самые короткие и средние по длине линеаменты, по-видимому, расположены примерно под углом 30° к оси структуры, имеющей северо-западное простирание. Более того, короткие линеаменты пересекают региональную структуру первого порядка и даже границы основных физико-географических областей. Расстояние между такими линеаментами обычно меньше 1,6 км. Неизвестно, как выражены линеаменты (за исключением тех, которые совпадают с известными разломами) в трехмерном пространстве, но можно предположить, что, так же как следы разрывов, линеаменты подстилаются зонами трещиноватости или разрывных нарушений и представляют собой зоны деформации или подвижек вдоль сталкивающихся блоков. Нарушения в породах от докембрийского до триасового возраста наблюдаются на территории Пенсильвании как в обнаженных районах, так и в районах, где коренные породы перекрыты плейстоценовыми ледниковыми отложениями. Возможно, что эти нарушения представляют собой омоложенную систему разрывов земной коры, унаследованную более молодыми породами, и отражают в осадочном чехле активные «трещины» кристаллического фундамента или деформации, обусловленные широко распространенным и четко выраженным по направлению напряжением, которое может иметь место в результате дрейфа Северо-Американской плиты.

Возможные области применения; направление исследований. В настоящее время ощущается острая необходимость в генетической классификации линейных форм и разработке соответствующей терминологии. Линеаменты и связанные с ними элементы, вероятнее всего, являются отражением на поверхности разломов или зон разломов. Часть линеаментов представляет собой следы даек. Для большинства линеаментов смещение пород точно не установлено. Однако корреляция полученных в шахтах данных о зонах кондиционного содержания руды среди пустой породы и зонах повышенной трещиноватости (раздробленная порода), а также данных об увеличении плотности трещин на дневной поверхности в узких депрессиях, образовавшихся в результате действия воды и ветра и характерных для более длинных линеаментов, позволяет высказать предположение, что линеаменты возникают в результате поверхностного проявления механических разрывов с незначительным смещением материала или без смещения. Таким образом, линеаменты представляют собой следы разрывных нарушений более крупного масштаба.

Сравнение фиг. 2А, 2Б, 2В и 2Г показывает, что видимая плотность линейных элементов (разрывов) зависит от масштаба изображения (снимка), но эту зависимость еще необходимо определить количественно. По аналогии со следами разрывов и трещинами [21, 22, 23] полагают, что большинство линеаментов представляет собой вертикальные зоны концентрации трещин. Несмотря на то что установлена зависимость плотности трещин а) от остаточного напряжения после

возникновения разрыва, б) от внутреннего напряжения в породах, определяемого литологическим составом, в) от мощности слоя и г) от характера тектонической деформации [26], до сих пор не разработана модель, позволяющая установить связь между трещинами и разрывами различных масштабов.

Поскольку большинство трещин и следов разрывов вертикально, то средняя ось эллипсоида напряжений для соответствующего поля также должна быть вертикальной. В связи с этим в качестве рабочей модели связи линейных систем разрывов различного масштаба с плотностью предлагается модель «скрученного» разлома (сброса) [2, 19], в которой используется механизм сдвига второго порядка [15]. Андерсон [1] показал, что при таких условиях (σ_2 вертикальна) напряжения в центральной зоне разлома снижаются за счет дизъюнктивных дислокаций. Однако первоначальный уровень напряжений не снижается за счет подвижек, когда расстояние между плоскостями разрывов больше или равно 0,4 длины проекции разлома в плане. Таким образом, можно получить теоретическое распределение разломов или зон разрывов, поскольку напряжение снимается только путем развития трещин [26].

Для очень простой модели, которая предполагает, что трещины (разрывы) образуются по плоскостям максимального скалывающего напряжения, ориентированного симметрично под углом 30° к каждому последующему порядку нормального напряжения, и что сдвиг каждого порядка отделен от сдвига, связанного с более высоким порядком, расстоянием, равным 0,5 длины разрыва, число связанных блоков, ограниченных трещинами, на единицу площади увеличится на 2^{2n-1}, где n — число порядков. Величина выбранной единичной площади может изменяться, но для каждого случая самый длинный разрыв относится к первому порядку. В данной модели пренебрегают асимметрией сдвига $(n+1)$ порядка, перпендикулярного сдвигу n-го порядка [15] и ограничиваются только тремя направлениями разрывов вместо восьми [19]. Однако последнее влияло бы только на форму, а не на размеры образующихся по разрывам блоков.

С помощью этой модели предсказывается вероятная плотность разрывов, которая может быть проверена посредством спутника ЕРТС, аэрофотосъемкой и наземным картированием. Если соотношение протяженности и частоты трещин [26] справедливо для крупных линеаментов, то их корни должны быть очень глубокими и, следовательно, ими нельзя пренебрегать при решении вопросов глобальной тектоники.

Едва ли можно сомневаться в том, что линеаменты контролируются глубинными факторами и что этот контроль аналогичен контролю следов разрывов, потому что в исследуемом районе они в значительной степени контролируют положение и направление речных долин. Установленное современное положение водотоков контролируется вертикальными ослабленными зонами в толще пород и подчеркивает роль линеаментов в эволюции речных долин и рельефа земной поверхности.

Мы находимся на пороге многих интереснейших открытий, что неизбежно в связи с появлением новых средств исследования и новых методик расшифровки структур, которые еще недостаточно хорошо изучены. Таким средством и является выполнение программы ЕРТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anderson E. M.*, The Dynamics of Faulting, Oliver and Boyd, Edinburgh, 1951.
2. *Badgley P. C.*, Structural and Tectonic Principles, Harper and Row Pub., New York, 1965.
3. *Boyer R. E., McQueen J. E.*, Comparison of mapped rock fractures and airphoto linear features, Photogramm. Eng., **30**, pp. 630—635, 1964.

4. *Calkins J. A.*, The geology of the west limb of the Hazara-Kashmir Syntaxis, West Pakistan and Kashmir, Unpubl. Ph. D. thesis, The Pennsylvania State Univ., p. 142, 1966.
5. *Hobbs W. H.*, Repeating Patterns in the relief and the Structure of the Land, Bull. Geol. Soc. Am., **22**, pp. 123—176, 1911.
6. *Hobbs W. H.*, Examples of joint controlled drainage from Wisconsin and New York, Journ. Geol., **13**, p. 363, 1905.
7. *Hough V. N. D.*, Joint orientation of the Appalachian Plateau in southwestern Pa., Unpubl. M. S. thesis, The Pennsylvania State Univ., p. 82, 1960.
8. *Keim J.*, A study of photogeologic fracture traces over the Bisbee quadrangle, Cochise County, Ariz. Unpubl. M. S. thesis, The Pennsylvania State Univ., p. 43, 1962.
9. *Koppe E. F., Thompson D. R.*, Progress in the recognition of fractured rock zones in prevention and abatement of mine drainage, 4th Symposium on Coal Mine Drainage Res., Mellon Inst., Pittsburgh, Pa., pp. 41—47, 1972.
10. *Lattman L. H., Nickelson R. P.*, Photographic fracture trace mapping in Appalachian Plateau, Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., **42**, № 9, pp. 2238—2245, 1958.
11. *Lattman L. H.*, Technique of mapping fracture traces and lineaments on aerial photographs, Photogramm. Eng., **24**, pp. 568—576, 1958.
12. *Lattman L. H., Matzke R. H.*, Geological significance of fracture traces, Photogramm. Eng., **27**, № 5, pp. 635—638, 1961.
13. *Lattman L. H., Segovia A. V.*, Analysis of fracture trace pattern of Adak and Kagalaska Islands, Alaska, Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., **45**, № 2, pp. 249—263, 1961.
14. *Lattman L. H., Parizek R. R.*, Relationship between fracture traces and the occurence of ground-water in carbonate rocks, Journ. Hydrol., **2**, pp. 73—91, 1964.
15. *McKinstry H. E.*, Shears of the Second Order, Am. Journ. Science, **251**, pp. 401—414, 1953.
16. *Meisler H.*, Hydrogeology of the carbonate rocks of the Lebanon Valley, Pennsylvania, Pa. Geol. Survey, 4th Series, Ground-Water Rept., W17, p. 81, 1963.
17. *Mollard J. D.*, Aerial photographs aid petroleum search, Canada Oil and Gas, Inc., **10**, pp. 89—96, 1957a.
18. *Mollard J. D.*, A study of aerial mosaics in southern Saskatchewan and Manitoba, Oil of Canada, Winnipeg, Issue August. 5, 1957b.
19. *Moody J. D., Hill M. J.*, Wrench Fault Tectonics, Bull. Geol. Soc. Am., **67**, pp. 1207—1248, 1956.
20. *Parizek R. R.*, An environmental approach to land use in a folded and faulted carbonate terrane, Environmental Planning and Geology, U. S. Dept. of Housing and Urban Development and U. S. Dept. of Interior, pp. 122—143, 1969.
21. *Parizek R. R., Voight B.*, Question 37: on remote sensing investigations for dam and reservoir construction in karst terranes, Commission Internationale des Grands Barranges, Montreal, G. R. Q. 37, Trans. 10th Intern. Congress on Large Dams, VI, pp. 538—546, 1970.
22. *Parizek R. R.*, Prevention of coal mine drainage formation by well dewatering, Special Research Report, SR-82, Coal Research Section, The Pennsylvania State Univ., p. 73, 1971a.
23. *Parizek R. R.*, Hydrogeologic Framework of Folded and Faulted Carbonates — Influence of structure; in: Hydrogeology and Geochemistry of Folded and Faulted Carbonate Rocks of the Central Appalachian Type and Related Land Use Problems, Circular 82, Mineral Conservation Section Series, The Pennsylvania State Univ., pp. 28—38, 1971b.
24. *Parizek R. R., Tarr E. G.*, Mine drainage pollution prevention and abatement using hydrogeological and geochemical systems, 4th Symposium on Coal Mine Drainage Research, Mellon Institut, Pittsburgh, Pa., pp. 56—83, 1972.
25. *Parizek R. R., Drew L. H.*, "Random drilling for water in carbonate rocks" in: Proceedings of a Symposium and Short Course on Computer and Operators Research in Mineral Industries; Min. Ind. Experiment Stat., **3**, Spec. Publ., pp. 2—65, 1967.
26. *Price N. J.*, Fault and Joint Development in Brittle and SemiBrittle Rock, The Commonwealth and International Library, Pergamon Press, Oxford, 1966.
27. *Setzer J.*, Hydrologic significance of tectonic fractures detectable on air photos, Ground Water, **4**, № 4, pp. 23—27, 1966.
28. *Siddiqui S. H.*, Hydrogeologic factors influencing well yields and aquifer hydraulic properties of folded and faulted carbonate rocks of central Pennsylvania, Ph. D. dissertation, The Pennsylvania State Univ., p. 502, 1962.
29. *Siddiqui S. H., Parizek R. R.*, Hydrogeologic features influencing well-yields in folded and faulted carbonate rocks, Central Pennsylvania (Abstract), Trans. A. Geophys. Union, **50**, № 4, p. 154, 1969.
30. *Siddiqui S. H., Parizek R. R.*, Hydrogeologic factors influencing well yields in folded and faulted carbonate rocks in central Pennsylvania, Water Resources Res., **7**, № 5, 1971b.

35794

31. *Siddiqui S. H., Parizek R. R.,* Variations in well yields and controlling hydrogeologic factors; in: Hydrogeology and Geochemistry of Folded and Faulted Carbonate Rocks of the Central Appalachian Type and Related Land Use Problems, Mineral Conservation Section, Circular Series 82, The Pennsylvania State Univ., pp. 87—95, 1971b.
32. *Turner F. J., Weiss L. E.,* Structural Analysis of Metamorphic Tectonites, McGraw-Hill Book Co., Inc. New York, 1963.
33. *Wobber F. J.,* Fracture traces in Illinois; Photogrammetric Eng., **33**, № 5, pp. 499—506, 1967.
34. *Warman J. C., Causey L. V.,* Geology and ground-water resources of Calhoun County Alabama; Geol. Survey of Alabama, County Report 7, p. 77, 1962.
35. *Wise D. U.,* Regional and Sub-Continental Sized Fracture Systems Detectable by Topographic Shadow Techniques, Geol. Survey, Canada Paper 68—52, pp. 175—199, 1968.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СНИМКОВ ЕРТС-1 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗНООБРАЗНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ШТАТА НЬЮ-ЙОРК

Ю. Исаксен, Р. Факундини, С. Форстер

(Геологическая служба США, Музей и управление науки штата Нью-Йорк, Олбани)

ВВЕДЕНИЕ

В докладе подводятся итоги реализации проекта исследования с целью оценки применимости снимков ЕРТС-1 для изучения разнообразных геологических комплексов штата Нью-Йорк. Данное исследование предусматривает обработку снимков, пригодных для решения геологических задач (т. е. снимков, свободных от облачного покрова), только для штата Нью-Йорк, несмотря на то, что выявленные основные структурные элементы простираются и в соседние районы, где они будут изучаться в дальнейшем.

Территория штата Нью-Йорк расположена на стыке пяти тектонических провинций [5]. На большей части территории штата протерозойское основание древней платформы подстилает недеформированные отложения нижнего и среднего палеозоя. Вторая платформа, где палеозойский фундамент перекрыт меловыми отложениями, образует основание острова Лонг-Айленд. Между этими платформами расположен Аппалачский ороген, или складчатый пояс, представленный переработанными протерозойскими породами, слагающими возвышенности Гудзон, покровы главного надвига и подводные гравитационные оползни гор Таконик. Южнее возвышенностей Гудзон расположен Триасовый бассейн. Наконец, в северной части штата, в горах Адирондак обнажаются породы протерозойского фундамента, являющиеся продолжением провинции Гренвилл Канадского щита. Как и следовало ожидать, количество и вид спектральной геологической информации значительно меняется от провинции к провинции.

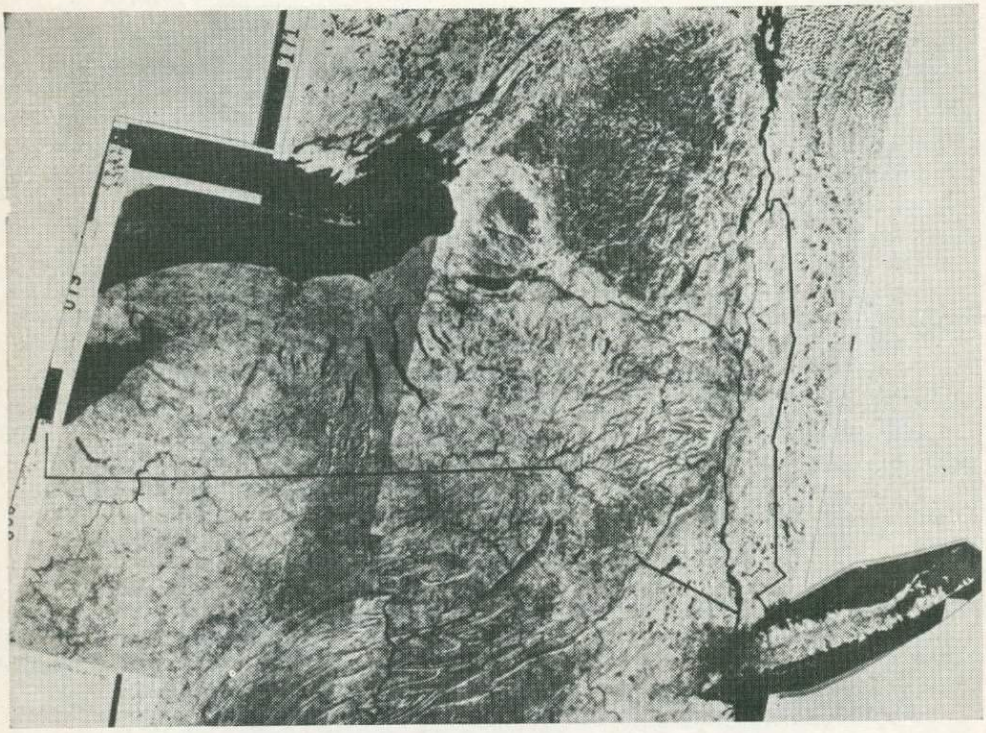
АНАЛИЗ ДАННЫХ ЕРТС-1

Полученные к настоящему времени снимки ЕРТС-1 составляют 125 кадров, покрывающих 32 участка штата Нью-Йорк и ряд участков соседних штатов и Канады. Составлен каталог всего имеющегося материала, систематизированного по его геологической пригодности, которая зависит от характера облачного покрова на снимках. Распределение снимков, имевшихся в наличии на февраль 1973 г., по признаку их геологической пригодности следующее: полезные (0—50% облачного

покрова) — 50%, частично полезные (50—70% облачного покрова) — 10%, бесполезные (70—100% облачного покрова) — 40%.

В настоящее время на всю территорию штата имеется единый фотомонтаж, где по крайней мере 70% площади свободно от облачного покрова (фиг. 1), а все частные снимки (за исключением трех участков в западной части штата) на 100% свободны от облаков.

Все пригодные для геологического исследования снимки штата Нью-Йорк анализировались в форме позитивного фильма, просвечи-



Фиг. 1. Фотосхема штата Нью-Йорк, сделанная по отпечаткам Брунинга с 23,75-сантиметровой позитивной пленки мультиспектрального сканатора зоны 7.

Использованы следующие снимки: 1027-15231, 1027-15233, 1027-15240, 1046-15292, 1046-15295, 1077-15014, 1079-15115, 1079-15122, 1079-15124, 1079-15131, 1080-15174, 1080-15180, 1080-15183, 1096-15074. Масштаб: 1 мм=3,5 км.

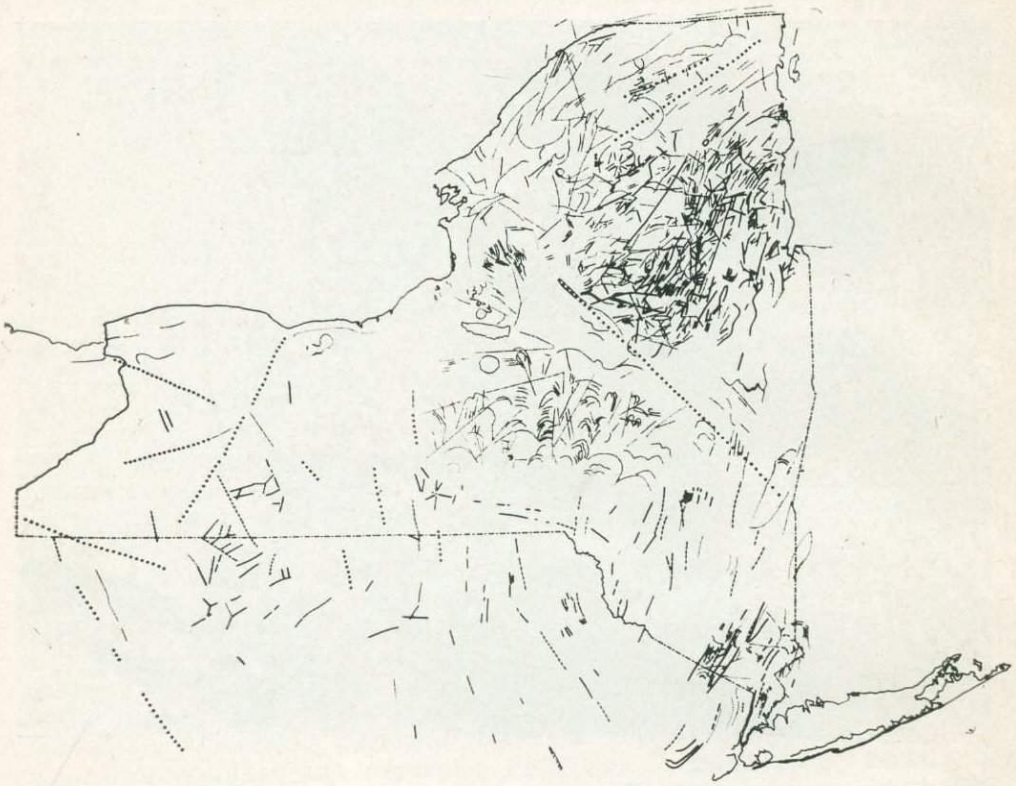
ваемого пучком белого света, с целью выявления спектральных характеристик, обусловленных геологическими причинами. Полученные сведения наносились на чистую картографическую основу и в совокупности дали спектральную геологическую карту штата масштаба 1 : 1 000 000 (фиг. 2), которая является новым типом карты. Летние и осенние снимки 1972 г.[1] в зонах 5 и 7 дополняют друг друга и содержат все спектральные характеристики, обусловленные геологическими причинами. На снимках в зонах 4 и 6 никаких дополнений не обнаружено.

После выявления явных спектральных геологических элементов на стандартном черно-белом позитивном фильме проводились следующие эксперименты:

[1] Год получения снимка требует уточнения. — *Прим. перев.*

1. Полученный от НАСА сводный 70-миллиметровый мультиспектральный аддитивно-цветной позитив, снятый в зонах 4—7, просматривался с помощью проектора фирмы «Спектрал Дата Корпорейшн» (модель 64). Несмотря на тщательный просмотр разнообразных снимков, никакой дополнительной информации по сравнению с данными обычного просмотра в проходящем свете не было получено.

2. Проводилось определение возможности получения высококонтрастных отпечатков, необходимых для распознавания линейных эле-



Фиг. 2. Спектральная геологическая рабочая карта штата Нью-Йорк.

В районе гор Адирондак жирные линии обозначают известные разломы и топографические линеаменты. Точечные линии — спектральные аномалии, многие из которых еще не проверены и, возможно, являются результатом деятельности человека; жирные точки и линии — отвалы пород и горные выработки, заполненные водой. В других участках карты все знаки от точечных до сплошных линий малодостоверны. Спектральные особенности, связанные с литологическими характеристиками, в данной схеме опущены. Масштаб: 1 мм = 3,5 км.

ментов на снимках ЕРТС-1 в зоне 5 с использованием проходящего белого света, путем фотографического преобразования снимков. Для экспериментов был выбран снимок 1079-15122-5 (192-й виток), включающий части нескольких структурных провинций, а именно: горы Адирондак, сложенные кристаллическими породами; Аллеганское плато, сложенное силурийскими и девонскими отложениями; долины рек Мохок и Гудзон, подстилаемые смятыми в складки и раздробленными осадочными породами кембрия и ордовика; горы Таконик, сложенные надвинутыми кластическими породами кембрия.

Использованный метод фотографического преобразования заключается в следующем: путем контактной печати 70-миллиметровый негатив ЕРТС-1 преобразуется в 70-миллиметровый позитивный фильм на пленке Kodalith. С целью получения высококонтрастного изображения

при контактной печати используется контрастный негатив на пленке Kodak Professional Copy; обработка проводится в проявителе D-72.

С преобразованного и непреобразованного 70-миллиметровых негативов были получены на фотобумаге увеличенные до масштаба 1 : 1 000 000 отпечатки, с которых наблюдаемые линеаменты были перенесены на чистую основу путем последовательного наложения. Сравнение показало, что все наблюдаемые на одном снимке линеаменты явно распознавались и на другом, хотя выраженность линеаментов на преобразованном высококонтрастном снимке была более высокой.

3. Чтобы избежать затрат времени на раздельную регистрацию каждой карты, еще до получения 70-миллиметрового позитивного фильма мультиспектральных снимков со спутника ЕРТС все кадры индивидуально просматривались на проекторе. При этом был разработан следующий успешный метод: на куске пленки размером 23,75×30 см и толщиной 0,0125 см грубо наносится положение четырех просмотровых окон в кинокассете и тщательно прочеркиваются две параллельные горизонтальные линии, для того чтобы точно устанавливать положение верхнего края 70-миллиметрового позитивного фильма. При использовании этих линий снимки печатаются строго парллельно. Такая предварительная процедура обеспечивает быструю регистрацию позиции кадров с помощью корректировки по осям x и y без вращения снимков.

4. Уже положено начало использованию аддитивной проекции мультиспектральных цветных фотографически преобразованных снимков. Полученные в результате фотографии поразительны по своему виду, но для определения их пригодности необходим дополнительный анализ.

ЕРТС-1 И ГЕОЛОГИЯ КОРЕННЫХ ПОРОД

На снимках ЕРТС-1 в области развития коренных пород наблюдаются следующие геологические объекты: 1) границы между основными тектоническими провинциями; 2) литологические контакты внутри тектонических провинций; 3) простирание сланцеватости внутри гнейсовых массивов; 4) разломы и топографические линеаменты; 5) отвалы пород и горные выработки, заполненные водой. Кроме того, различается большое количество новых линейных и криволинейных форм, выделение которых в ряде случаев не совсем обосновано. Термин «линейная форма» (linear) в отличие от термина «линеамент» (lineament) используется нами в понимании Денниса [3, стр. 103], т. е. в значении «линии неопределенного происхождения, видимой на аэрофотоснимке». Некоторые примеры вышеупомянутых геологических образований перечислены ниже и показаны на фиг. 1 и/или 2:

1. Границы между основными тектоническими провинциями. Контакт между фундаментом и чехлом кембрийских пород хорошо определяется вдоль юго-западной, северной и юго-восточной границ гор Адирондак. В юго-восточной части штата выделяется угловое несогласие между силурийско-девонскими и более деформированными ордовикскими породами. К западу также выявляется параллельный контакт, который фиксирует западную границу акадской складчатости. Далее к юго-востоку различается контакт между возвышенностью Гудзон и Триасовым бассейном.

2. Литологические контакты внутри тектонических провинций. По резкому переходу светлого тона к темному севернее гор Адирондак выявляется контакт между потсдамскими песчаниками (кембрий) и перекрывающими их песчанистыми доломитами Тереза. Широкие дуго-

образные долины, пересекающие горы Адирондак, отражают литологические изменения внутри кристаллических пород. Южнее и юго-западнее гор Адирондак дугообразные линии связаны с литологическими изменениями в стратиграфическом разрезе девонских отложений.

3. Простирание сланцеватости внутри гнейсовых массивов. Среди гнейсовых массивов гор Адирондак намечаются дуговидные «спектральные линии».

4. Разломы и топографические линеаменты; изображены на фиг. 2 жирными линиями.

5. Отвалы породы и горные выработки, заполненные водой, на северо-западе гор Адирондак; изображены на фиг. 2 более жирными точками и линиями.

6. На фиг. 2 показаны многочисленные примеры новых линейных и криволинейных форм и линейные элементы неопределенного происхождения. Количественная оценка информации по линеаментам и линейным формам, показанным на фиг. 1 и 2, сведена в следующую таблицу:

Тип образования	Количество	Суммарная длина, км
Известные линеаменты и разломы, различимые на снимках ЕРТС-1	232	1890
Новые и аномальные линии, различимые на снимках ЕРТС-1	329	3060
Общее число линейных образований, различимых на снимках ЕРТС-1	561	4950
Известные линеаменты и разломы, неразличимые на снимках ЕРТС-1	297	1750

Цифры, приведенные в таблице, рассматриваются как приближенные.

Следует отметить, что известные линеаменты и разломы, пропущенные на снимке ЕРТС-1, сконцентрированы на востоке гор Адирондак; полученные нами от НАСА позитивы по этому району отличаются ненормальной плотностью. Вероятно, мультиспектральный сканатор ЕРТС-1 в действительности выявил более 50% линеаментов и разломов в горах Адирондак.

7. Криволинейные формы. Этот термин широко используется для обозначения искривленных спектральных линий; их многочисленные примеры показаны на фиг. 2. Большинство этих данных еще не оценено. Особый интерес представляет форма, имеющая вид «колеса со спицами»; это аномалия, которая находится в центре озера Кранберри на западе центральной части гор Адирондак. Сравнение этого образования с закартированными геологическими контактами [2] указывает только на частичное соответствие. Местами «колесо» сечет контакты толщ устойчивых кристаллических пород. Вероятность того, что оно является результатом эрозии, должна быть проверена полевыми исследованиями.

ЕРТС-1 И ГЕОЛОГИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Полученные поздним летом и ранней осенью снимки оценивались с точки зрения возможности выявления четвертичных геологических образований двух типов: 1) имеющих два явных измерения (длину и ширину), таких, как конечные морены, ледниковые озера, ледниковые долины, и 2) образований площадного распространения, например, отложений ледниковых озер.

Морены Харбор-Хилл и Ронконкома острова Лонг-Айленд, морена Форт-Ковингтон в долине Св. Лаврентия, морена Велли-Хедс в районе озера Фингер и серия морен южнее и восточнее озера Эри на западе штата Нью-Йорк представляют собой конечные морены. Из них на снимках можно различить лишь короткий отрезок морены Велли-Хедс южнее Сиракьюс и части морен Харбор-Хилл и Ронконкома (снимки 1080-15180-5 и 1096-15074-5); эти фрагменты различимы только там, где они соответствуют границам участков различного землепользования.

Ледниковые долины выявлены в ряде мест, но особенно хорошо они наблюдаются в районе Сиракьюс и на северном склоне плато Таг-Хилл (снимок 1080-15180-7).

Береговые линии ледниковых озер прослеживаются по всей территории штата; в качестве примера можно привести береговую линию моря Шамплейн на низменности Св. Лаврентия. На снимках они совершенно неразличимы.

В настоящее время по снимкам можно провести картирование только двух типов ледниковых отложений. Песчаные отложения ледникового озера Вермонт, закартированные Денни [4], выделяются на снимке 1079-15115-7 южнее Платсберга в виде темных участков. То же самое относится к площади развития песков, закартированных Мак-Клинтоком и Стьюартом [7], которая простирается от деревни Малун на запад до реки Св. Лаврентия (снимок 1080-15174-7).

Южнее озера Онтарио широко развиты друмлины; их спектральное изображение стало более четким благодаря дифференцированному использованию земли в этом районе (снимки 1080-15180-5 и 1046-15292-5).

Поскольку один из авторов (Факундини) хорошо знаком с четвертичной геологией западной части штата, было решено, несмотря на качество вышеупомянутых снимков, оценить их тональную дифференциацию. Сравнение, проведенное на генерализованной карте почв масштаба 1 : 1 000 000 [1,6], показало только 10%-ное соответствие контактов различных почв границам тональности на снимках, и это соответствие особенно справедливо для днищ долин; таким образом, в принципе наблюдается связь четвертичной геологии с рельефом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На снимках ЕРТС-1 выделен ряд неизвестных ранее спектральных линий, обусловленных, вероятно, геологическими причинами. Поэтому возможно, что снимки ЕРТС-1 окажутся особенно полезными при региональном анализе разрывов. Обнаружен также ряд неожиданных криволинейных аномалий, которые будут исследоваться в дальнейшем.

Небольшое количество спектральных данных о геологических контактах (коренных и четвертичных отложений) по центральной и западной частям штата обусловлено маскирующим действием растительности. В связи с этим необходимо тщательно изучить весенние снимки, полученные до сезона бурного роста растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arnold R. W. et al.,* General soils map of Five-County area around City of Syracuse in New York State, Extension Publications of the New York State College of Agriculture at Cornell Univ., Ithaca, New York, 1967.
2. *Buddington A. F., Leonard B. F.,* Regional geology of the St. Lawrence County magnetite district northwest Adirondacks, New York, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 376, p. 145, 1962.
3. *Dennis J. G.,* ed., International Tectonic dictionary — English terminology, Am. Assoc. Petrol. Geologists Mem. 7, p. 196, 1967.

4. *Denny C. S.*, Surficial geologic map of the Dannemora quadrangle, and part of the Plattsburgh quadrangle, New York, U. S. Geol. Survey Map GQ-635, 1967.
5. *Fisher D. W., Isachsen Y. W., Rickard L. V.*, Geologic Map of New York, 1970, and Generalized Tectonic-Metamorphic Map of New York, 1971, N. Y. State Mus. and Sci. Service Map and Chart Series № 15, 1971.
6. Genesee/Finger Lakes Regional Planning Board, Regional soils inventory: classification and analysis; Genesse/Finger Lakes Regional Planning Board Technical Studies Series, Rept. № 6, p. 39, 1970.
7. *MacClintock P., Stewart D.*, Pleistocene geology of the St. Lawrence Lowland, N. Y. S. Mus. and Sci. Service Bull. 394, p. 152, 1965.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ШТАТОВ ЮТА И НЕВАДА ПО СНИМКАМ ЕРТС-1

М. Йенсен

(Факультет геологических и геофизических наук, Университет штата Юта)

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи контракта UN 113, НАСА, ЕРТС-1, в котором автор принимает участие в качестве ответственного исполнителя, относятся к области поисков и разведки полезных ископаемых и работ по структурной геологии. Определенное внимание уделено также лимнологическим исследованиям. Район исследований включает почти весь штат Юта, большую часть штата Невада и части штатов Калифорния и Вайоминг, имеет в плане прямоугольную форму и ограничен координатами 37—42° с. ш. и 109—119° з. д.

По геологическим и физико-географическим признакам район делится на ряд областей: плато Колорадо, горы Юинта, горы Уосатч, бассейны рек Грин-Ривер и Юинта, часть Сьерра-Невады и вся северная часть Провинции бассейнов и хребтов. Разнообразие месторождений нефти и рудных полезных ископаемых, наличие разновозрастных осадочных и изверженных пород и многообразие структурных особенностей создают благоприятные возможности использования многоспектральных снимков ЕРТС для изучения района. В качестве опорных используются наиболее детально изученные участки.

СНИМКИ ЕРТС

Снимки ЕРТС-МСС используются в больших количествах и во всех четырех зонах спектра. На начальной стадии исследование снимков в значительной степени облегчалось благодаря применению бинокулярного микроскопа «Никкон», смонтированного на световом столике и приспособленного для просмотра прозрачных позитивов при 10- и 80-кратном увеличении. 10-кратное увеличение особенно удобно, так как создает возможность большого площадного обзора, хотя при этом и утрачиваются некоторые детали снимка.

Снимки районов или структур, представляющих особый интерес, в дальнейшем увеличиваются в 4 раза до масштаба 1 : 250 000 и печатаются в черно-белом варианте. Потери деталей в процессе увеличения невелики, что позволяет получать многочисленные геологические карты в указанном масштабе. Примером может служить округ Гумбольдт в штате Невада; на снимке этого района прослеживаются простирания региональных структур, нормальные разломы, создающие структуру бассейнов и хребтов, поперечные разломы (в основном широтной ориентировки), характерные литологические типы пород и другие особенности, многие из которых не показаны на геологической карте этого рай-

она. Увеличенный снимок ЕРТС совершенно адекватен топооснове и может использоваться в качестве полевой топографической карты при геологическом картировании.

Методика получения цветных совмещенных снимков и одноцветных спектральных изображений несложна. При этом используется цветная пленка «Диазохром» и контактно-копировальная установка «Озалид». Метод обработки снимков прост и сравнительно недорог. Совмещенные пленки дают цветное прозрачное изображение, которое переснимается с помощью 35-миллиметровой или другой камеры. Полученную пленку удобно проецировать на экран. Совмещенные пленки просматриваются с помощью подвесного проектора на светостоле. Автор считает, что используемые методы требуют усовершенствования, заключающегося в выборе диазохромной пленки соответствующего качества для снимков, сделанных на разных полосах, ввиду их различной плотности. Наиболее подходящий цвет дают в основном пастельные тона.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

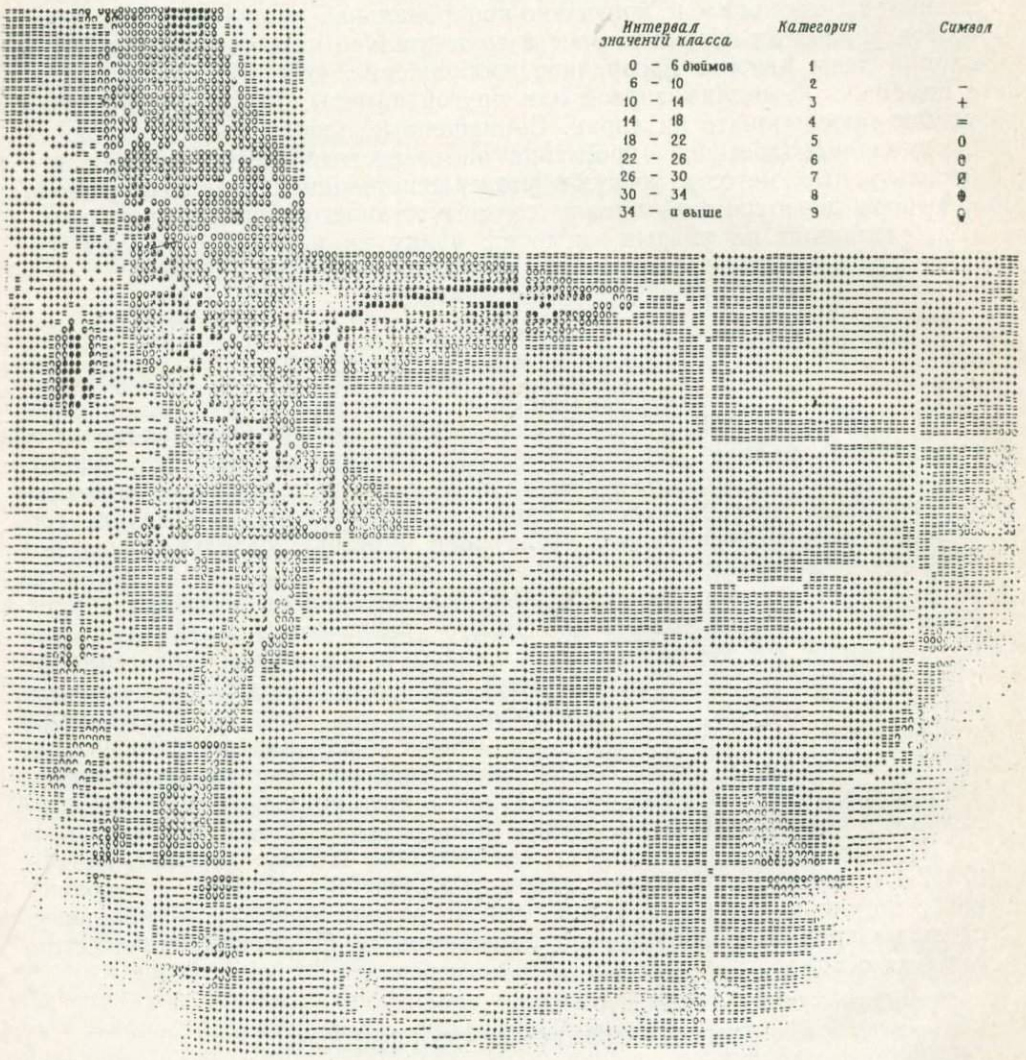
На снимке ЕРТС-1 видно два древних русла. Они находятся в складчатом районе Уотерпокет-Фолд, к северу от разреза Марбл-Каньон на реке Колорадо в штатах Юта и Аризона. Древние реки текли, вероятно, на север вдоль складок Уотерпокет-Фолд, западнее гор Генри, поперек современного русла реки Фримонт; отдельные участки этой древней системы были захвачены другими речными бассейнами. Русло различается на снимке 1032-17370. Брошенная меандра на реке Колорадо находится выше современного уровня озера Поуэлл: вероятно, она имеет тот же возраст, что и озеро, и в прошлом была связана с древним руслом. На большей своей части русло, видимо, испытывает структурный контроль. Притоки большей частью текут на северо-запад и северо-восток и примыкают к основному руслу под острым углом, выработанным в то время, когда воды главной реки текли на север, а не на юг. Второе древнее русло лучше всего видно близ хребта Лонг-Рейндж и реки Сан-Хуан на снимке 1031-17313.

Наблюдается удивительное соответствие между снимком Е1121-17312-4 и полутоновой картой годового количества осадков, составленной с помощью компьютера для того же района (фиг. 1). Наибольшее сходство границ отмечается по изолиниям минимального количества годовых осадков.

ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Снимок 1051-17414 содержит очень полезную информацию, касающуюся гидрологии, седиментологии и биологии Большого Соленого озера и озера Бэр в штате Юта. Наиболее информативными на снимках МСС оказываются длины волн зоны 4, позволяющие различать текстуры осадков и определять глубину водоемов. Зона 5 с меньшим «проникновением» на глубину дает в основном сведения о внешних явлениях, например о распространении водорослей в водоемах. Инфракрасные зоны в отличие от коротковолновых зон сообщают данные об участках мелководья на заболоченных площадях, где водная поверхность скрыта растительностью. На снимке Большого Соленого озера отмечается резкое различие между северной его частью, к северу от каменной насыпной дамбы, по которой проходит железная дорога, и южной, расположенной к югу от дамбы (фиг. 2). Они заметно отли-

чаются соленостью вод, что отражается на видовом составе водорослей и четко фиксируется в зоне 5. Красноватые водоросли занимают северную часть, а сине-зеленые — южную. В северной части отмечается от-



Фиг. 1.

рицательный водный баланс, который приводит к постепенной концентрации солевого раствора; это подчеркивается поверхностным перетоком воды из южной части озера в северную через два узких отверстия в дамбе. Поверхностные струи хорошо видны в зоне 5. За счет высокой плотности вод северной части озера создается противоток более плотной воды на глубине, что фиксируется в зоне 4. Перистый рисунок осадков, привносимых впадающими в озеро реками, отчетливо виден в зонах 4 и 5. Эти особенности усиливаются на снимках с искаженным цветом, что видно при рассмотрении 35-миллиметровой пленки.

На снимке 1051-17420 видна часть Большого Соленого озера и все озеро Юта. В озере Юта наблюдается очень интересное явление, вызванное, вероятно, цветением водорослей, закрутившихся в спираль под действием циркуляции воды. Это явление оказалось кратковременным;



Фиг. 2.

оно наблюдалось только во время облета 12 сентября и не видно на других снимках. Связь этого явления с водорослями еще не доказана, но оно будет изучаться совместно данными ЕРТС-1 лимнологами из Государственного управления по изучению океана и атмосферы, которые впервые отметили эту особенность (фиг. 3).

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Основные, наиболее отчетливо проявляющиеся черты строения исследуемого района — главные структурные направления (линеаменты, или структурно обусловленные дизъюнктивные нарушения), которые особенно широко распространены в районе гор. Уосатч и в Провинции бассейнов и хребтов. Большинство линеаментов до получения снимков ЕРТС-1 не было известно, хотя данные о них имеют большое значение для геологоразведочных работ. Применение геохимических и геофизических методов исследований наиболее целесообразно в пределах линеаментов, хорошо проявляющихся на площадях развития аллювиальных или вулканогенных отложений, сформировавшихся после

процессов минерализации и маскирующих зоны минерализации в коренных породах.

Важные сведения о выделении паров ртути в зонах минерализации побудили собрать образцы почв и газа в выработанных жилах на пред-



Фиг. 3.

полагаемых продолжениях зон минерализации; для этой цели использовали опередляющее устройство, в котором пропускали струю воздуха через серебряную сетку 80 меш. Сетку затем нагревали в лаборатории и замеряли количество выделившейся ртути с помощью атомных абсорбционных весов. Такие исследования проводились для известных зон минерализации со значительным содержанием ртути, составляющим примерно от 400 до 1000 ч. на млрд.; образцы, собранные в предположительно пустых зонах, содержали ртути менее 300 ч. на млрд. Предполагается выявить аномалии в содержании ртути для почвы и газа в зонах, где расположены старые горные выработки, и произвести съемку методом наведенной поляризации над аномалиями с целью выявления сульфидной минерализации на глубине.

Практическая ценность снимков ЕРТС-1 по сравнению с традиционной техникой геологических исследований вполне очевидна. Интересно, что, помимо визуальных данных о минерализации в коренных породах, обнажающихся по соседству с долинами, заполненными аллювием, используют также в качестве важного дополнительного средства аэромагнитные карты, помогающие коррелировать простирания структур с положительными магнитными аномалиями. Указанное явление особенно характерно для севера центральной части штата Невада, где интрузивная деятельность создала благоприятные условия для образования месторождений полезных ископаемых в преобладающих здесь карбонатных породах, подстилающих крупные надвиги. Перекрывающие породы надвигов представлены в основном кремнистыми и вулканогенными образованиями, которые почти не вступали в реакцию с минерализованными флюидами.

В заключение следует отметить, что структурные нарушения, выявленные на снимках ЕРТС, могут фиксировать простирания структур, которые коррелируются с положительными магнитными аномалиями. В таких участках аномальное содержание ртути в пробах почвы и газа указывает, где следует проводить съемку методом наведенной поляризации с целью выявления сульфидных месторождений, по которым отсутствуют какие-либо другие данные, кроме снимков ЕРТС.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СНИМКОВ ЕРТС-1 ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИИ АЛЯСКИ

Э. Латрам, И. Таюр, У. Паттон мл.

(Геологическая служба США, Вашингтон)

У. Фишер

(Геологическая служба США, Вашингтон)

ВВЕДЕНИЕ

Исследования с помощью спутника ЕРТС-1 по программе SR 180 — «Выявление геоструктур континентальной коры в связи с оценкой запасов полезных ископаемых» включает два направления:

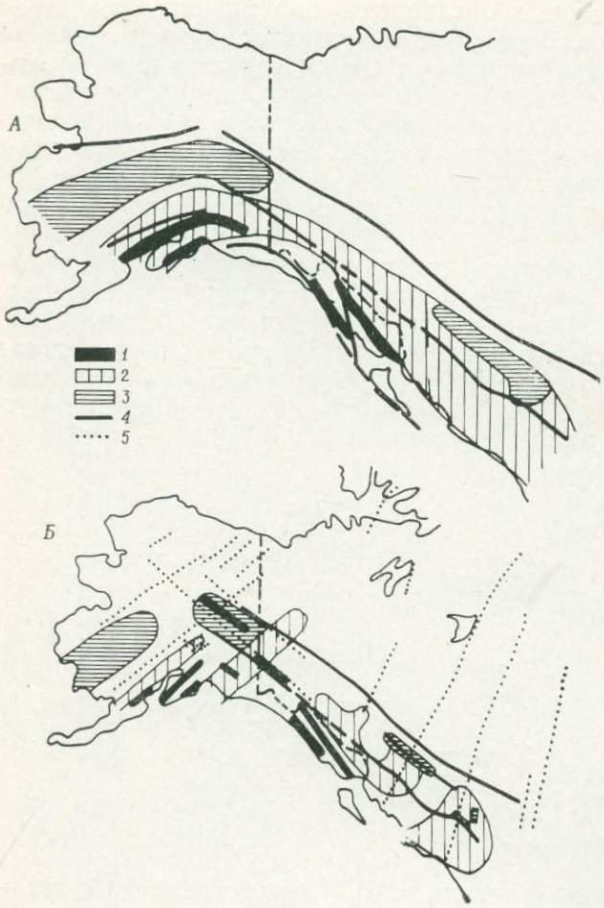
1. Усовершенствование существующих и создание новых методов регионального анализа, а также выработка концепций, способствующих изучению геологической истории и выявлению потенциальных запасов полезных ископаемых с использованием широких возможностей снимков ЕРТС фиксировать региональные соотношения основных геологических структур, которые из-за слишком больших размеров невозможно с достаточной полнотой изучить с помощью обычных полевых методов или аэрофотосъемки.

2. Проведение средне- и мелкомасштабного геологического картирования с использованием перспективных (синоптических) и плановых (ортографических) проекций снимков ЕРТС для выявления структурных закономерностей; применение дистанционных мультиспектральных методов распознавания для дифференциации литологических комплексов; распространение геологического картирования на слабо изученные районы с использованием полученных характеристик.

Исследования, проведенные в настоящее время, дали положительные результаты по обоим направлениям.

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

До запуска спутника ЕРТС полностью безоблачное изображение Аляски было получено с помощью «Нимбуса-IV IDKS» — системы получения изображений посредством диссектора. Кроме известных крупных разломов и складчатых горных хребтов Аляски и западной Канады, на снимке выявлен ряд линейных форм северо-западного и северо-восточного простирания, свидетельствующих о наличии ранее не известных глубинных структур земной коры [3]. Таким образом, снимки, полученные со спутника, позволяют выявить крупные геологические структуры, которые иным способом установить невозможно [6, 5, 1].



Фиг. 1. Районы Аляски и западной Канады, благоприятные для разведки месторождений некоторых видов полезных ископаемых по данным экстраполяции геологических условий известных месторождений.

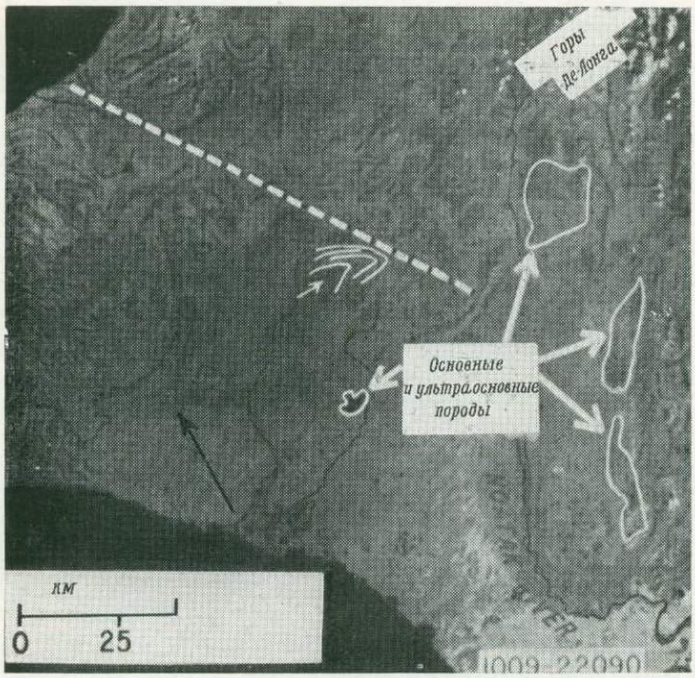
А — общепринятые данные о распределении дуговидных литологических зон, направленных выпуклостью к северу; *Б* — предполагаемые данные, основанные на допущении, что линейные формы, различимые на снимке, полученном с «Нимбуса-IV», являются разломами коры, оказавшими влияние на минерализацию. *1* — Ni, Cr, Fe; *2* — Cu, Mo, массивные сульфиды; *3* — Hg, Sb, W; *4* — главный разлом, выраженный на поверхности; *5* — разломы коры.

На следующем этапе изучалась связь выявленных линейных форм с месторождениями полезных ископаемых Аляски и проводилось сопоставление месторождений полезных ископаемых с положением основных разломов в Канадских Кордильерах по данным Сатерленда-Брауна и др. [7]. Результаты изучения показывают, что рудоносные пояса Аляски теснее связаны с глубинными структурами, чем с дуговидными, направленными выпуклостью к северу литологическими поясами (фиг. 1) [4]; это определяет концепцию, положенную в основу предстоящих поисково-разведочных работ.

ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКА ЕРТС-1

Линейные формы и разломы, выявленные к настоящему времени на многочисленных снимках ЕРТС-1, ориентированы так же, как серия структур на снимках, полученных с «Нимбуса-IV», т. е. имеют северо-западное и северо-восточное простирание; это лишний раз подтверждает их наличие и широкое распространение. Ряд линейных форм на снимках

ЕРТС отражает крупные структуры земной коры. Например, в районе реки Шангнак (снимок 1003-21355) резко выражена в рельефе и прослеживается вдоль русла реки Кобук линейность северо-западного простирания. Породы по обе стороны от линейно вытянутых форм рельефа имеют одинаковый возраст и литологический состав и не подвергались сильной деформации. Это означает, что линейные формы рельефа, вероятно, отражают структурную неоднородность глубинных пород, залегающих под обнажающимися на поверхности вулканогенными породами.



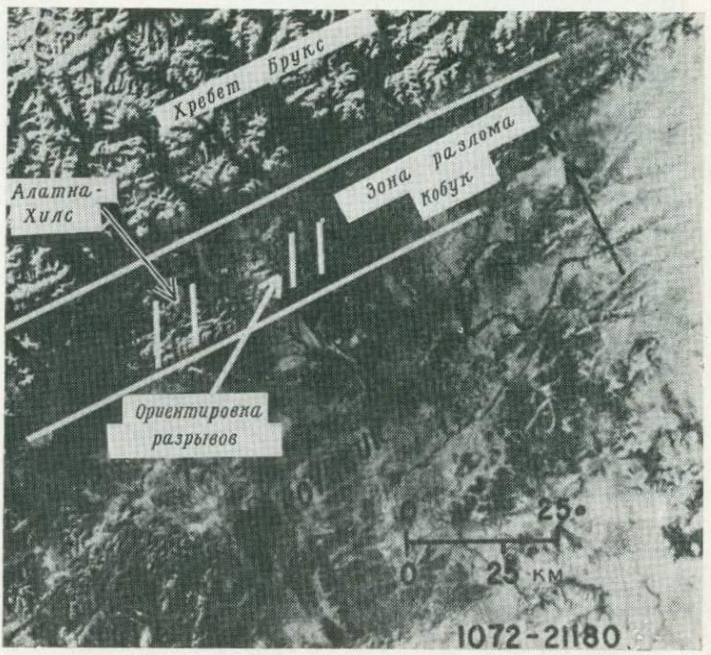
Фиг. 2. Снимок ЕРТС-1 (зона 7), иллюстрирующий выделяемые структуры и выраженность некоторых известных литологических комплексов в восточной части гор Де-Лонга.

На снимке 1009-22090 в западной части хребта Брукс виден еще один участок с линейными формами рельефа северо-западного простирания. К юго-западу от него юрские и меловые толщи смяты в мелкие складки, северо-западнее меловые породы менее деформированы. Южнее, в горах Де-Лонга, такие линейные формы совпадают с изгибом в простирании структур (фиг. 2). В районе Фэрбенкса линейные формы обоих простираний четко видны на снимке 1030-20442; некоторые из них ранее были закартированы как разломы.

Изучение микросейсмичности в центральной Аляске [2] показывает, что эпицентры мелкофокусных землетрясений расположены вдоль этих линейных форм и сконцентрированы в местах их пересечений. В региональном плане преобладают линейные формы северо-западного простирания, совпадающие с долиной реки Танана. Локально они фиксируются по закартированным разломам и соответствуют крупной линейной форме северо-западного простирания, установленной по снимкам с «Нимбуса». На юго-восток от Фэрбенкса указанные линейные формы фиксируют существенную и весьма протяженную геологическую границу, что свидетельствует о ее фундаментальном значении. Правильный взгляд

на природу этих структур и понимание важности их изучения при региональных геологических исследованиях имеют большое значение для оценки минеральных ресурсов Аляски.

На снимках ЕРТС-1 выявляются также другие структурные особенности, которые важны для оценки запасов нефти в нефтегазоносных провинциях северной Аляски и Юкона — Коюка. Изучение снимков 1009-22090, 1046-22143 и 1046-22145 показывает, что геологические структуры северо-западной Аляски исключительно благоприятны в отношении нефтегазоносности. В горах Де-Лонга отчетливо различаются смятые в складки пологозалегающие надвиговые пластины. Некоторые

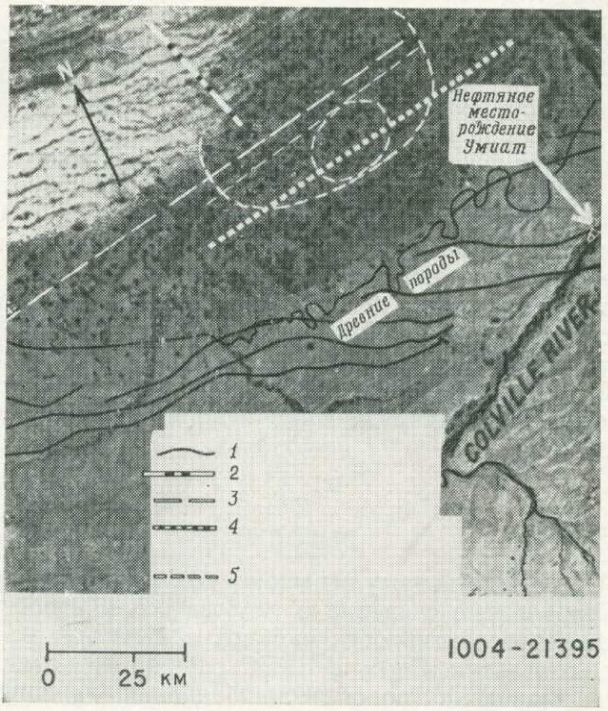


Фиг. 3 Снимок ЕРТС-1, иллюстрирующий сгущение разрывов в зоне разлома Кобук.

из них выделяются благодаря наличию известняков в составе пород (снимок зоны 5, не приведен), а один надвиг фиксируется по останцам ультраосновных пород (снимок зоны 7, фиг. 2). С большой детальностью вырисовывается сложная картина системы складок у северо-западных подножий гор Де-Лонга, заметно отличающихся от широких складок в более молодых породах, развитых севернее (фиг. 2). В Алатна-Хилс (западная часть центральной Аляски) не известная ранее серия близко расположенных разрывов северо-восточного простирания, различимых на снимке ЕРТС-1 1072-21180 (фиг. 3), подтверждает предположение о том, что зона нарушений Кобук представляет собой крупную зону сбросо-сдвигов восточного простирания. По ориентировке и плановому рисунку разрывы напоминают нарушения, характерные для крупных зон сбросо-сдвигов.

Для региональной оценки потенциальных запасов полезных ископаемых оказались важными результаты изучения снимка северной Аляски (Фишер и Латрам, неопубликованные данные). Озера береговой равнины Арктики имеют преимущественно удлиненную форму, причем их длинные оси параллельны друг другу и имеют простирание СЗ 351°.

На снимке ЕРТС-1 1004-21395 выявляется дополнительная региональная линейность восточного простирания, не выделявшаяся ранее ни на аэрофотоснимках, ни при полевых наблюдениях; она подчеркивается вытянутой формой одних озер, расположением по одной линии других и линейными межозерными участками (фиг. 4). Ориентировка этих линейных форм в рассматриваемом районе параллельна изгибам изолиний на



Фиг. 4. Снимок ЕРТС-1 1004-21395, иллюстрирующий линейность в расположении озер, в простирании магнитных аномалий, в отклонении контуров гравитационных аномалий, в простирании складок (по предварительным данным), а также намечаемый контакт между формацией Губик и более древними породами.

Линейные элементы: *1* — оси складок; *2* — вытянутость озер; *3* — магнитные аномалии; *4* — отклонение контуров гравитационных аномалий; *5* — линейность в расположении озер.

картах магнитного и гравитационного полей, а также контурам закартированных на юге района складок северо-западного простирания, которые в своих северо-западных окончаниях отклоняются на запад. Необходимо добавить, что многие расположенные по одной линии небольшие озера образуют крупные и малые эллипсы, наложенные на региональную линейность рисунка снимка. На таких участках местами по разрозненным сейсмическим профилям устанавливаются обратные падения пластов, а также фиксируется региональное сводовое поднятие в неглубоко залегающих толщах. Такие данные показывают, что на снимке исследуемого района могут быть обнаружены не выявленные до сих пор структуры, скрытые четвертичным чехлом формации Губик. Верхние горизонты пологих складок этого района сложены более молодыми породами, чем горизонты, вскрытые нефтяными скважинами южнее, на месторождении Умиат, поэтому здесь также могут встретиться хорошие пласты-коллекторы. Более того, складки в породах, залегающих на небольшой глубине, возможно, отражают структурные условия, благо-

приятные для накопления нефти в древних толщах близ фундамента или непосредственно в фундаменте.

Геологической службой США в качестве стандарта геологического картирования на Аляске был принят масштаб 1 : 250 000. В настоящее время сложность структур и недостаток полевых данных задерживают составление геологических карт указанного масштаба на территории северо-западной Аляски. Снимки ЕРТС 2009-22090, 1046-22143 и 1046-22145, увеличенные до масштаба 1 : 250 000, дают изображения поверхности Земли, которые существенно помогают при решении ряда проблем, так как не только служат великолепной основой различных карт, но также и средством экстраполяции полевых литологических и структурных данных на незакартированные районы. В настоящее время методом увеличения исходных снимков составляются геологические карты масштаба 1 : 250 000.Широкие перспективные и ортофотографические снимки структур района помогут составить картографические основы, более удобные для разведки на нефть, чем обычные планиметрические или топографические карты.

Для составления новой геологической карты территории северной Аляски в масштабе 1 : 1 000 000 и новой геологической карты всего штата Аляска в масштабе 1 : 2 500 000 используются также снимки масштаба 1 : 1 000 000; они дают дополнительные сведения о районах, где полевое геологическое картирование было некондиционным или вообще не проводилось.

ВЫВОДЫ

Снимки ЕРТС-1 по-новому освещают геологические условия и дают важные дополнительные сведения о геологическом строении, необходимые для оценки перспективности районов и выявления запасов полезных ископаемых Аляски. Снимки ЕРТС служат прекрасным средством экстраполяции известных геологических данных на слабо изученные территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

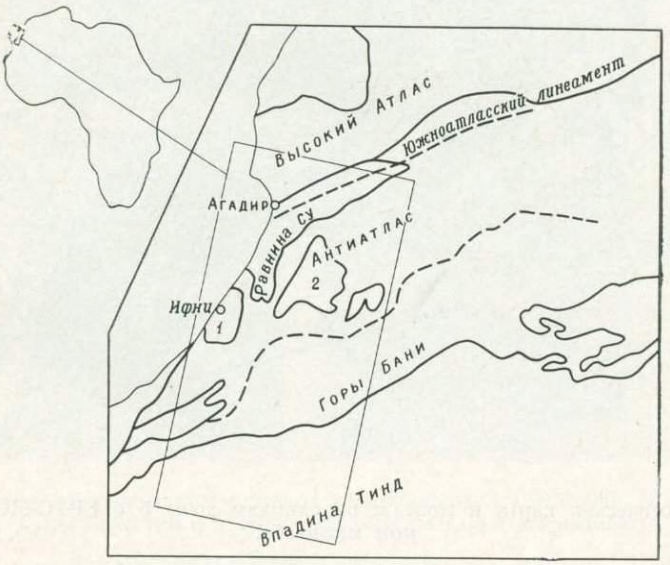
1. *Carter W. D.*, Geologic questions and significant results provided by early ERTS-1 data (Abstract), U. S. Dept. Commerce Natl. Tech. Inf. Service, NASA-CR-128121, p. 1, 1952.
2. *Gedney L., Shapiro L., Van Wormer D., Weber F.*, Correlation of epicenters with mapped faults, east-central Alaska, 1968—1971, U. S. Geol. Survey open-file report, 1972.
3. *Lathram E. H.*, Nimbus IV view of the major structural features of Alaska, Science, **175**, pp. 1423—1427, 1972.
4. *Lathram E. H., Gryc G.*, Metallogenic significance of Alaskan geostructures seen from space, Internat. Symposium on Remote Sensing of Environment, 8th, Ann. Arbor, Mich., Proc., Oct. 1972.
5. *Segerstrom K.*, Apollo 7 photography in Antofagasta Province, Chile, An interpretation, in: Geological Survey Research 1970, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 700-D, pp. D10—D17, 1970.
6. *Shapiro L. H.*, Comparison of information content of space photography and low altitude aerial photography, U. S. Geol. Survey Inter-agency Rept. USGS-229, p. 40, 1971.
7. *Sutherland-Brown A., Cathro R. J., Panteleyev A., Ney C. S.*, Metallogeny of the Canadian Cordillera, Canadian Inst. Mining and Metallurgy Trans., **74**, pp. 121—145, 1971.

СРАВНЕНИЕ СНИМКОВ ЮЖНОГО МАРОККО, СДЕЛАННЫХ СО СПУТНИКОВ «ДЖЕМИНИ» И ЕРТС-1

Б. Блоджет, А. Андерсон

(Управление научных исследований Земли, НАСА, Центр космических полетов в Годдарде, Гринбелт, Мериленд)

Исследования в различных областях наук о Земле с помощью орбитальных космических кораблей ведутся уже более десятилетия. При этом используются различные сочетания системы прибор — спутник. Наиболее эффективные исследования, предшествовавшие запуску спутника ЕРТС, проводились с помощью снимков, полученных в результате «эксперимента по обзорному фотографированию местности» (S-05), которым руководил Лоуман [3] из Центра космических полетов в Год-



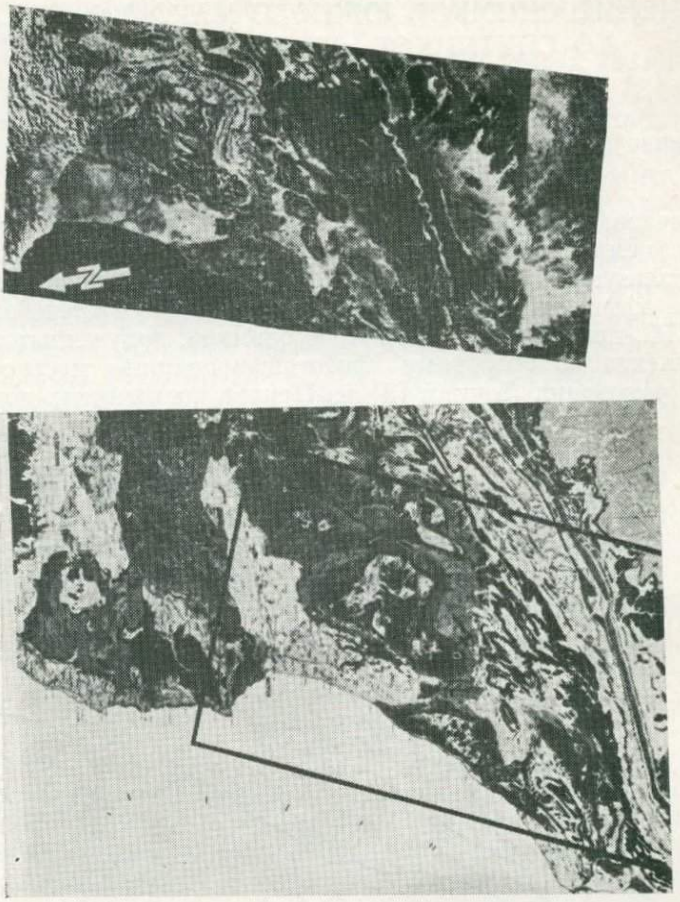
Фиг. 1. Обзорная карта по данным ЕРТС-1.
Основные области распространения докембрийских пород; *1* — Ба-Амран; *2* — Оулит.

дарде. В настоящее время данные спутника ЕРТС используются при исследованиях в различных областях, поэтому необходимо установить, действительно ли они способствуют улучшению оценки ресурсов.

Наиболее интересным в геологическом отношении районом, где исследования проводились с помощью данных «Джемини» и ЕРТС, является северо-западная Африка, точнее, самая южная часть Марокко (фиг. 1).

Снимок этого района, сделанный со спутника ЕРТС, показан на фиг. 2. Справа — фотомонтаж трех кадров зоны 5 МСС; оригинал увеличен до масштаба 1 : 500 000. Эта зона была выбрана вследствие наиболее высокой для этого района разрешающей характеристики снимков. Снимки сделаны 3 ноября 1972 г. и состоят из кадров 1103-01411, 13 и 15. Геологическая карта аналогичного масштаба (1956 г.) включает район двух кадров ЕРТС, оконтуренный на фиг. 1.

Все основные геологические структуры, имеющиеся на опубликованной карте и описанные Фюроном [2], четко видны на снимках ЕРТС. Горы Высокий Атлас, простирающиеся на восток-северо-восток, на юге

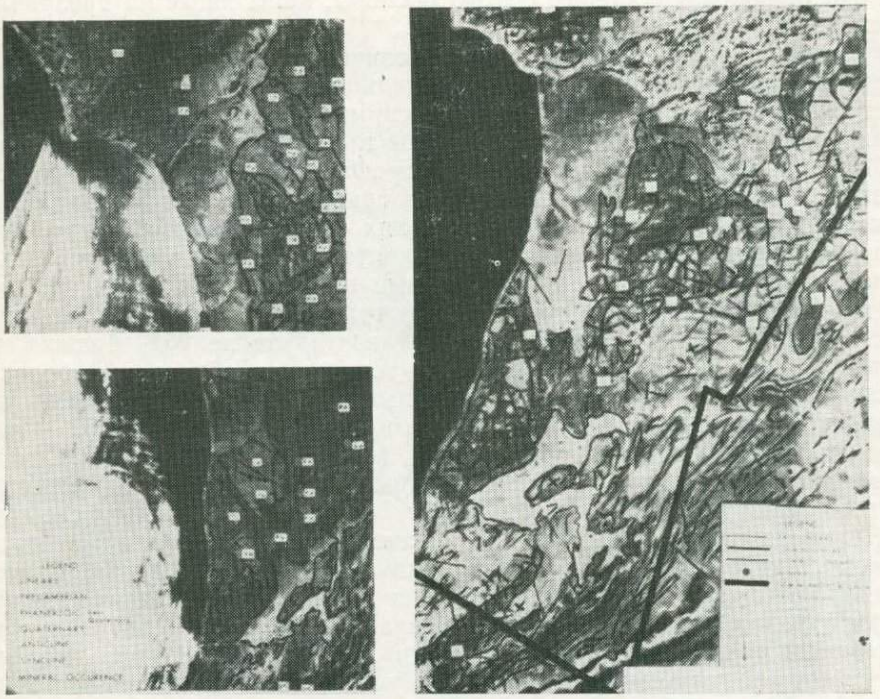


Фиг. 2. Геологическая карта и монтаж по снимкам зоны 5 с ЕРТС-МСС в сравнимом масштабе.

отделены от геологических структур Южноатласским линеаментом, или разломом Агадир. На сводных геологических картах Африки этот разлом простирается на восток-северо-восток от Агадира до Средиземного моря и, согласно де Ситтеру, является одним из крупнейших. Истинная амплитуда этого нарушения на геологической карте не видна, поскольку основная часть разлома Агадир скрыта под четвертичными отложениями равнины Сус. Наличием этого разлома, по-видимому, объясняется общее прямолинейное простирание долины реки Сус. К югу от разлома Агадир расположена равнина Сус, которая отделяет Высокий Атлас от более низкого Антиатласа и представляет собой самое западное звено прерывистой цепи впадин, параллельных Южноатласскому линеаменту. Повсеместно поднятые и эродированные вершины Антиатласа простираются на северо-восток от Ифни и ограничены на юго-востоке погружающимися складками гор Бани. Далее к югу проходит граница впадины Тиндуф. На фиг. 3 та же территория показана по данным, полученным «Джемини-5» в 1965 г.

Поднятие Антиатласа сопровождалось образованием сложной системы разломов, которые на орбитальных снимках выделяются местами в виде систем линеаментов. Они особенно четко проявляются по линиям, пересекающим контакты кембрийских и докембрийских отложений.

Большинство поперечных разломов, показанных на геологической карте, видно как на снимках «Джемини», так и на снимках ЕРТС. Кроме того, на орбитальных снимках четко различаются многочисленные линеаменты. В большинстве случаев это разломы, но на опубликованных картах они не показаны. В то же время многие из закартированных разломов со смещением невозможно определить на снимках со спутников. Так, в противоположность простираниям пластов неразличимы разломы на докембрийском поднятии между Ба-Амран и Оулит.



Фиг. 3. Снимки, сделанные со спутников «Джемини-5» и ЕРТС-МСС-5 с нанесенными линеаментами и месторождениями полезных ископаемых.

Линейные элементы, которые видны на орбитальных снимках, увеличенных до масштаба примерно 1 : 500 000 (такой масштаб выбран для удобства сравнения с опубликованной картой), были нанесены на прозрачную основу. Были также оконтурены три легко различимых литологических комплекса: темный массив докембрийского фундамента, светлые по тону четвертичные отложения и фанерозойский комплекс промежуточной тональности. На фиг. 4 слева показаны участки, по данным дешифрирования смонтированных снимков «Джемини», а справа — сложный монтаж, сделанный по снимкам зоны 5 МСС. Все линейные элементы, которые видны на снимках ЕРТС, наносились сначала в виде тонких черных линий на общую схему; затем их сравнивали с данными «Джемини» на прозрачной основе. Линеаменты, которые совпадали на обеих схемах, выделяли линией средней толщины, линеаменты, обнаруживаемые на фотографиях «Джемини», но неразличимые на снимках МСС, экстраполировали и обозначали самыми толстыми линиями.

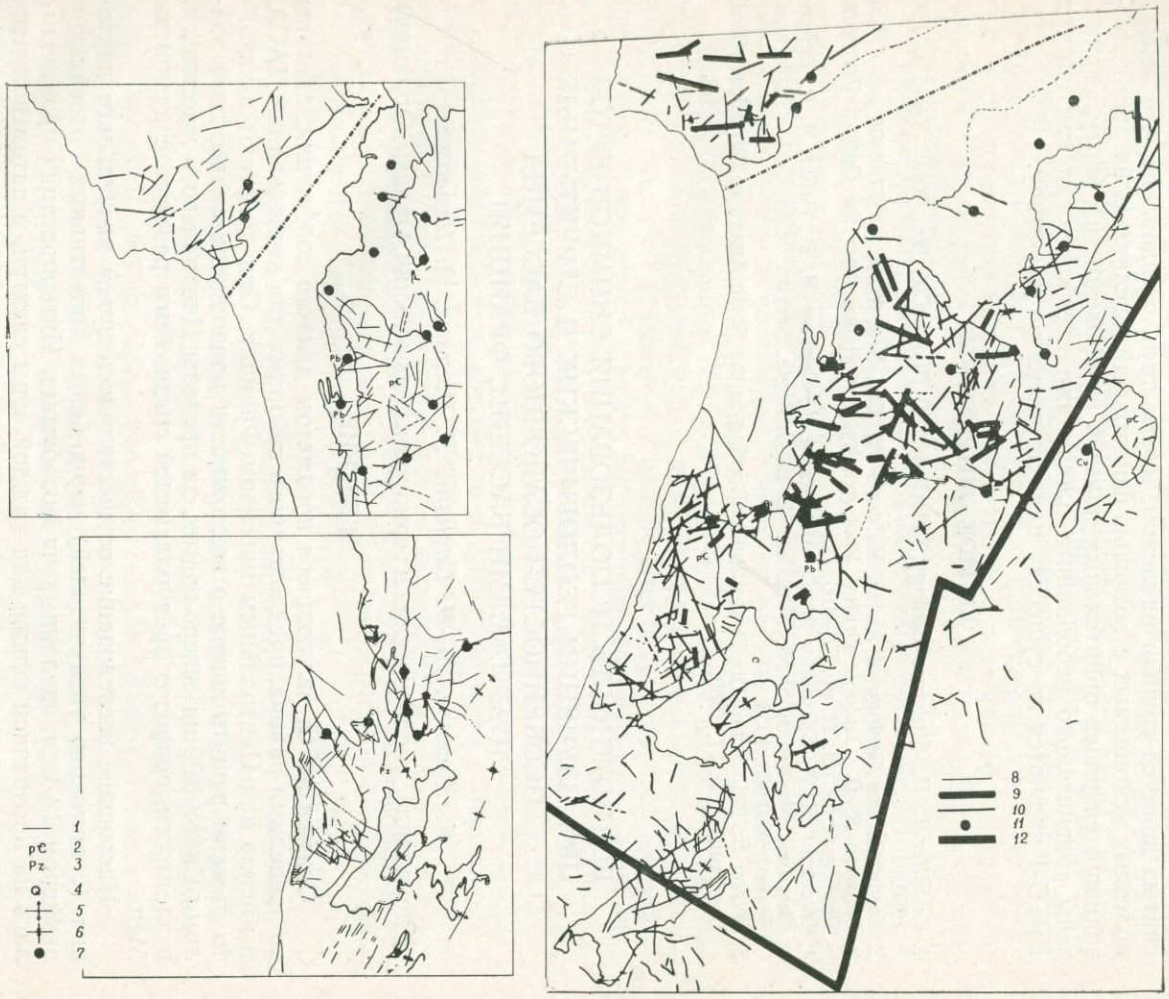
Эти схемы показывают, что южная фотография, снятая при наиболее вертикальном положении спутника «Джемини», обнаруживает хорошее соответствие со снимком зоны 5 на участках крупного сводового

поднятия. Разломы, закартированные в районе складчатой зоны предгорий, различимы только по краям лучших фотографий «Джемини» и поэтому не выделены. Однако верхняя фотография «Джемини» снята при более наклонном положении спутника и на ней различается несколько линейных элементов, не выявленных по данным ЕРТС. Многие линейные элементы совпадают по направлению с линиями сканирования и поэтому могут маскироваться на снимках МСС. Некоторые линейные элементы иногда соответствуют наклону корабля «Джемини» и, вероятно, усиливаются за счет того, что их рассматривают сверху по простиранию. На фиг. 4 показаны данные без фотоосновы, нанесенные на прозрачные пленки.

Чтобы получить представление о количестве соответствующих закартированных линейных элементов, последние подсчитали для каждой из трех указанных выше групп. Всего по снимкам МСС выделяется 257 линейных элементов, 38 из которых видны только на снимках «Джемини», а 115 — на снимках ЕРТС и на фотографиях «Джемини». Это показывает, что на снимках ЕРТС выделяется приблизительно в 3 раза больше линейных элементов, чем на фотографиях «Джемини». Возможно, определенную роль сыграло здесь то обстоятельство, что в подсчет были включены линеаменты, закартированные в складчатой зоне на юго-востоке района. Если эту группу исключить, то окажется, что на снимках ЕРТС линейных элементов приблизительно на 25% больше, что более реально. Существует несколько возможных объяснений большей распознаваемости линеаментов: а) снимки сделаны при разном угле солнечного освещения — с «Джемини» в 11 ч 38 мин, а с ЕРТС — ранним утром; б) различный угол обзора (вертикальный для ЕРТС и меняющийся для каждой из перспективных фотографий с «Джемини»); в) возможно, сказались существенные сезонные различия (съемка с ЕРТС производилась 3 ноября, а с «Джемини» — 22 августа); г) на видимость при съемке, возможно, влияли атмосферные условия. Степень влияния в каждом из указанных случаев не определена. Однако эмпирически устанавливается ухудшение разрешающей характеристики в направлении наклона корабля «Джемини», так как количество линейных элементов, картируемых «Джемини», уменьшается в северо-восточном направлении.

После составления схем линейных элементов на них наносили известные месторождения полезных ископаемых, чтобы установить зависимость между местоположением последних и тектоникой района; на фиг. 3 и 4 они показаны черными кружками. Всего на прозрачную основу было нанесено 25 рудных месторождений. 13 месторождений из 25 приурочено к границе докембрий — фанерозой. Это вполне закономерно, если считать, что минерализованные растворы обычно кристаллизуются близ источника их образования в трещинах, приуроченных к куполовидным поднятиям [5]. Кроме того, 7 из указанных 13 месторождений, вероятно, находятся на линеаментах или вблизи линеаментов, выявленных по снимкам ЕРТС (только 5 из этих 7 линеаментов различаются на фотографиях, сделанных со спутника «Джемини»). Месторождения, как и разрывы, ориентированы в основном в восточно-северо-восточном направлении. После установления общих связей между структурами и минерализацией целесообразно с помощью обзорных снимков использовать их для выявления новых районов, перспективных в отношении полезных ископаемых.

Характерным примером может служить область контакта докембрий — фанерозой близ бывшей границы между Марокко и Ифни. До 1969 г. разведка полезных ископаемых вдоль этой границы практически не проводилась. Наиболее интересными представляются участки контак-



Фиг. 4. Линейные формы и месторождения полезных ископаемых по данным фиг. 3 без фотоосновы.

1 — линейные формы; *2* — докембрий; *3* — фанерозой (без четвертичных отложений); *4* — четвертичные отложения; *5* — антиклинали; *6* — синклинали; *7* — месторождения полезных ископаемых; *8* — линейные формы по данным ЕРТС; *9* — линейные формы по данным «Джемини»; *10* — линейные формы, совпадающие на снимках, сделанных со спутников «Джемини» и ЕРТС; *11* — месторождения полезных ископаемых; *12* — граница снимка «Джемини».

тов между литологически разнородными толщами, приуроченные к сбросам агадирского (восточно-северо-восточного) простирания, которые целесообразно изучить в полевых условиях.

Следует подчеркнуть, что данное исследование не ставит своей целью заменить существующие в настоящее время методы картирования и разведки, а дает лишь возможность оконтурить участки, наиболее интересные для разведки, и, таким образом, более эффективно использовать обычные полевые методы.

В заключение следует отметить, что снимки, сделанные со спутников «Джемини» и ЕРТС, дают важную для региональных исследований информацию и могут способствовать выявлению полезных ископаемых. Для данного района работ плановые снимки ЕРТС дают дополнительные сведения, которые не выявляются на фотографиях «Джемини», снятых даже со слабым наклоном. Кроме того, установлено, что поиски полезных ископаемых с помощью фотографий, сделанных во время проводившихся ранее орбитальных полетов с человеком на борту, ограничены сравнительно небольшими площадями съемки, тогда как снимки ЕРТС-1 являются по существу планетарными по масштабу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *de Sitter L. U.*, Structure Geology, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, p. 552, 1959.
2. *Furon R.*, The Geology of Africa, Hafner Publ. Co., New York, p. 277, 1963.
3. *Lowman P. D.*, Geologic Orbital Photography, Experience from the Gemini Program, Photogrammetria, 24, pp. 77—106, 1969.
4. *Ovazzani M. T., Eyssautier M. L., Marcais M. J., Coubert M. R., Fallot M. P.* Empire Cherifien, Marrekech Sheet, Ministere de la Geologie, Service de la Carte Geologique, Scale 1 : 500 000, 1956.
5. *Wisser E.*, Relation of Ore Deposition to Doming in the North American Cordillera, Geol. Soc. Am., Mem. 77, 1960.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СНИМКОВ ЕРТС-1 ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА (ПАРИЖСКИЙ БАССЕЙН, ФРАНЦИЯ)

К. Кавелье, Ж.-И. Сканвик, Г. Викстин, А. Цизерман

(Управление геологических и горнорудных изысканий, Орлеан, Франция)

ВВЕДЕНИЕ

Снимки МСС, являющиеся предметом данного сообщения, сделаны за пределами района, предложенного авторами для исследований НАСА, а именно над Центральным массивом Франции. Они помогают в какой-то степени решить вопрос о возможности продолжения известного разлома Сийон-Уйе на северо-восток, за пределы Центрального массива, и, в частности, вопрос о предполагаемой связи этого разлома с разломом Мец.

Настоящее исследование осуществлялось путем визуального изучения (с помощью увеличителей) черно-белых позитивных отпечатков размером 22,8 см, сделанных на фотобумаге. Интерпретация производилась на прозрачной основе для каждой зоны спектра, а затем полученные данные сравнивались с уже имеющимися картографическими материалами.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Изученные снимки МСС соответствуют восточному сектору Парижского бассейна между городами Лаон на северо-западе и Брие на северо-востоке, Лангр на юго-востоке и Сан на юго-западе. Город Витри-ле-Франсуа находится приблизительно на полпути между Парижем и Нанси.

В слабо расчлененном рельефе рассматриваемого района выделяются пологие плато, разделенные эрозионными куэстами. Самые высокие отметки (400—500 м) приурочены к юго-востоку района (плато Лангр); самая низкая точка (около 50 м) расположена на северо-западе (долина Эн). Общий наклон водосборной поверхности находится в прямой зависимости от гипсометрии. Все основные реки (Мёз, Марна, Об, Сена и др.) берут начало на северо-востоке района и текут на север, северо-запад или запад.

Все слагающие бассейн формации имеют осадочное происхождение. Самые древние лейасовые отложения обнажаются на юго-востоке района. Самые молодые (за исключением четвертичных) олигоценовые отложения развиты в западном секторе. В общем породы юрского, мелового и палеогенового возраста обнажаются в правильной последовательности с юго-востока или северо-востока на запад и обнаруживают в плане концентрическое залегание.

Такое расположение не имеет никакой связи с регрессией триасового и олигоценового морей к центру бассейна, а, напротив, обусловлено главным образом происходившей в третичное и четвертичное время эрозией в связи с пиринейско-альпийским орогенезом и климатическими изменениями. Удивительное естественное единообразие Парижского бассейна, наблюдаемое в настоящее время, — результат очень сложной геологической истории, начавшейся еще в палеозое.

Для рассматриваемого сектора характерно общее падение пород на запад; моноклинальное залегание нарушается слабо выраженной синклинальной впадиной (с центром в районе Парижа), в которой накопление осадков происходило в мелу; характерный современный облик исследуемый район приобрел в основном в палеогене. Моноклиналь осложняется также складками и разломами, среди которых можно выделить нарушения арморикапского (СЗ—ЮВ) и варисцийского (ЮЗ—СВ) простираний, с одной стороны, и радиально расходящиеся и концентрические разломы — с другой; те и другие связаны с пиренейско-альпийским орогенезом. Первые интерпретируются в основном как крупные герцинские разломы, повлиявшие на формирование бассейна в палеозое и отражающиеся в современном рельефе. Вторые рассматриваются как разрывы, тесно связанные со структурной формой Парижского бассейна мелового — палеогенового возраста.

ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СНИМКОВ МСС

Землепользование. В таком районе, как Парижский бассейн, землепользование — наиболее удобный объект для орбитальных исследований. В первую очередь необходимо проанализировать сигналы, получаемые от растительного покрова в различных зонах спектра, с тем чтобы впоследствии правильно оценивать значение снимков МСС для геологии.

Зона 4 — значительные эффекты рассеяния, снимок туманный.

Зона 5 — великолепное изображение раздела участков землепользования.

Различия, приведенные ниже, устанавливаются за счет сильного поглощения сигналов от растительного покрова в этих зонах спектра:

серая шкала, ступень 14 : леса;
серая шкала, ступень 12 : возделываемые поля и участки влажных грунтов, покрытые травой, тополя вдоль русл и травяных участков, виноградники Шампани;
серая шкала, ступень 10 : возделываемые поля зерновых и сосновые леса на лёссовых почвах.

Зона 6 — увеличение отражательной способности приводит к выравниванию сигналов от возделываемых полей и участков, покрытых травой, что дает возможность хорошо различить леса.

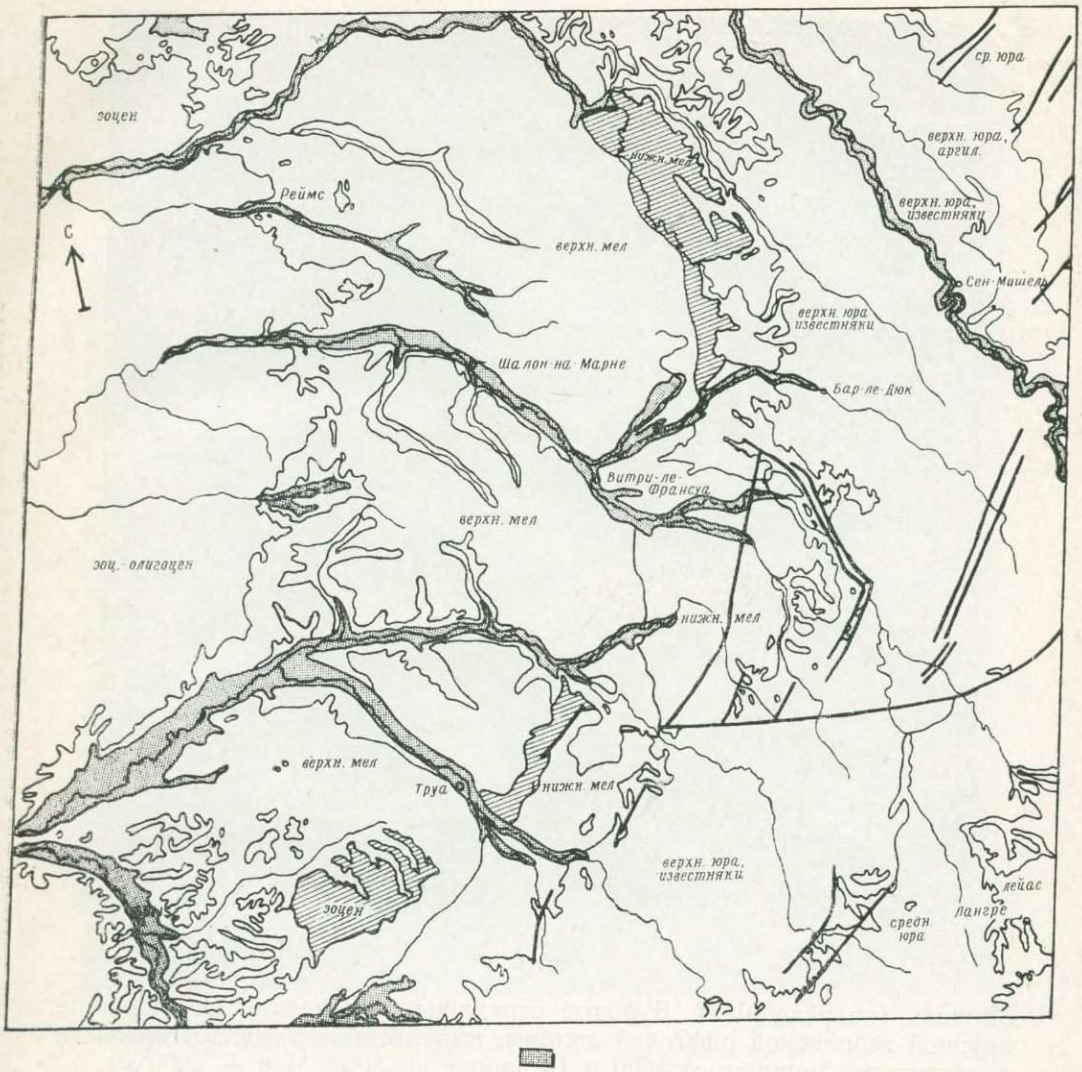
Зона 7 — основное отличие от зоны 6 — исчезновение лесов.

Геологическое картирование. Район, для которого получены снимки МСС, достаточно хорошо изучен; он полностью покрыт геологическими съемками масштаба 1 : 80 000, 1 : 320 000, 1 : 1 000 000, которые неоднократно повторялись за последнее столетие. В настоящее время подготавливается геологическая карта масштаба 1 : 50 000. Опубликованные листы относятся в основном к западной трети Парижского бассейна, включая его юго-западный и северо-западный углы.

Снимки МСС поэтому не дают никаких новых сведений об отложениях, обнажающихся в рассматриваемом секторе бассейна. Однако сравнение снимков и существующих геологических карт, в частности карт масштаба 1 : 1 000 000, дает важные сведения двух типов. Во-первых, устанавливается хорошее соответствие между крупными структурами, легко различимыми на снимках (особенно в зоне 5), и концентрически расположенными толщами юрского, нижнемелового, верхнемелового и палеогенового возраста. На снимках также хорошо различается современный аллювий в долинах. Результат сравнения, кроме того, показывает, что снимки, полученные со спутника, важны для геологического картирования крупных регионов, геология которых не настолько хорошо изучена, как геология Парижского бассейна. В частности, снимки представляются полезными для решения проблем, возникающих у геологов при подготовке крупномасштабных исследований (они могут облегчить, например, предварительную интерпретацию фотоснимков и выбор маршрута). Во-вторых, при сравнении снимков МСС с геологической картой масштаба 1 : 1 000 000 для некоторых секторов обнаруживаются значительные различия, обусловленные самой концепцией, положенной в основу составления карт и заключающейся в том, что на геологических картах воспроизводится стратиграфическое деление (причем четвертичные отложения не наносятся), тогда как на снимках проявляются литологические различия коренных и четвертичных отложений.

Так, в секторе между Труа и Сан на карте показаны только породы верхнего мела (писчий мел) и частично нижнеэоценовые (пески, галечники). Сознательно не показаны твердые огнеупорные глины, образовавшиеся в результате поверхностного изменения меловых грунтов в третичное время. Лесная растительность, развитая на молодых покровных отложениях, отсутствующих в более северных районах, аналогична растительности, произрастающей на породах третичного возраста, что объясняет кажущуюся непрерывность покровных образований на снимках МСС.

С другой стороны, очень темные и средние по плотности тона́ на снимках МСС (в частности, в зоне 5) соответствуют обнажающимся песчаным и глинистым отложениям нижнемелового возраста; исключение составляет сеноманский писчий мел к югу от Витри-ле-Франсуа. К северу от Витри-ле-Франсуа породы представлены песками и мергелями сеноманского возраста, на которых произрастает такая же растительность, как и на породах нижнемелового возраста. Приведенные частные случаи — единственный пример, противоречащий указанным



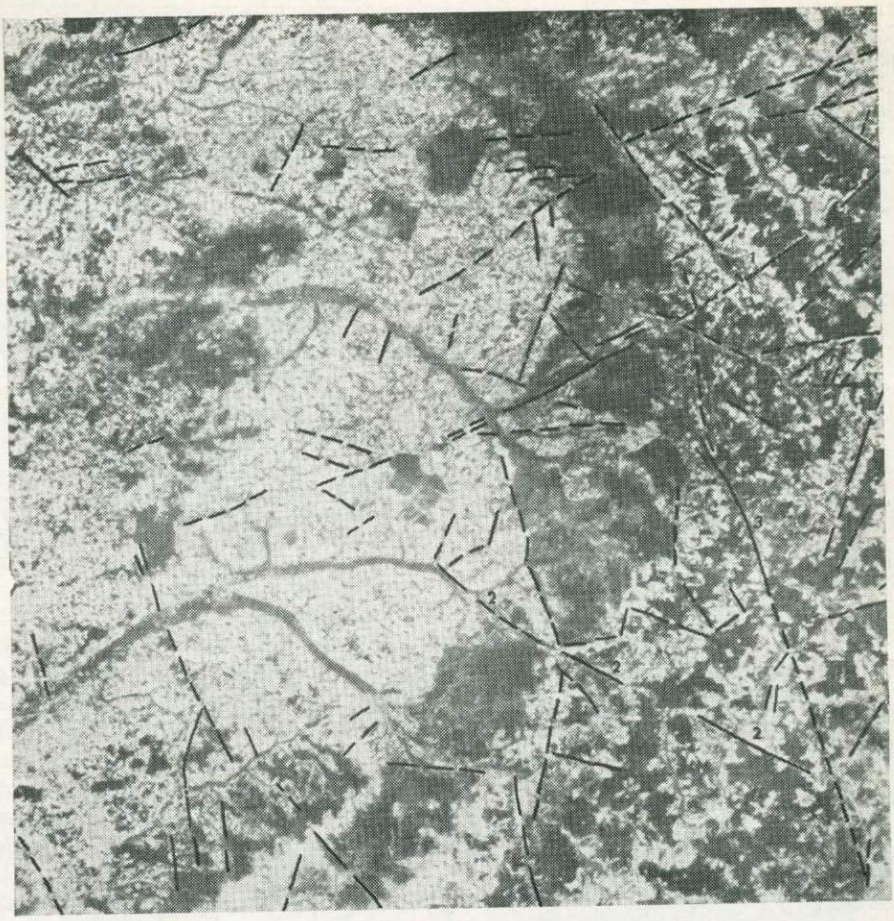
Фиг. 1. Геологическая карта масштаба 1 : 1 000 000.
Литологические данные нанесены в соответствии с фототоном на снимках МСС. Точками показан современный аллювий.

выше особенностям геологических карт, на которых упор делается на стратиграфические различия комплексов пород, а не на их литологический состав, обычно хорошо видимый на изображениях, полученных со спутника.

Сравнение снимков МСС и гидрогеологической карты Парижского бассейна масштаба 1 : 500 000, на которой показаны крупные литологические подразделения, служит хорошим подтверждением сказанному выше (фиг. 1).

Анализ геологических структур. Из крупных разломов, выявленных с помощью снимков МСС, здесь описаны только три — Мец, Журанзе и двойной разлом Марна (фиг. 2, 3).

Разлом Мец. Разлом Мец, обнаруженный Герье и Пруво, служит южной границей «лорренского угольного бассейна». Юго-западное продолжение этого разлома прослежено по данным бурения до района Сен-



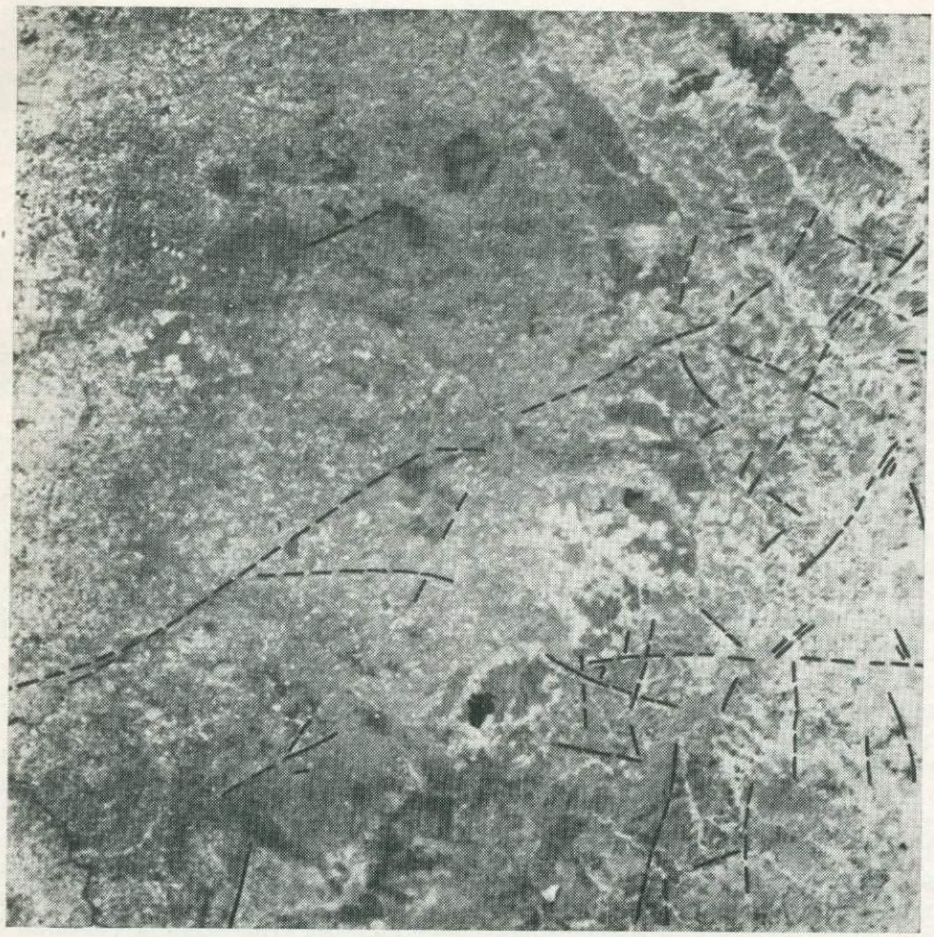
Фиг. 2.

Мишель (на реке Мёз). Буровые скважины устанавливают наличие крупной герцинской рифтовой долины, выполненной каменноугольными отложениями мощностью 4000 м (в районе разлома Мец — 2000 м).

В районе реки Мёз у Бар-ле-Дюк и Витри-ле-Франсуа (орбитальные снимки не охватывают более восточные районы) отмечаются отчетливые, не известные до сих пор линейные элементы, переходящие на западе в долину Сены, что устанавливается в зоне 7. Линейные элементы прослеживаются на запад до Монтеро, где расположена группа меридиональных разломов, являющихся продолжением разломов Лиманъ и протягивающихся от каменноугольных копей.

Аэромагнитная карта Франции масштаба 1 : 1 000 000 свидетельствует о наличии разлома, совпадающего с выделенными линейными элементами; по карте разлом прослеживается несколько дальше на юг, чем по снимкам МСС (предполагается, что разлом не вертикальный). Те же геофизические данные указывают, что этот разлом секут меридиональные разломы.

Гравиметрические данные (карта масштаба 1 : 1 000 000) выявляют больше различий, чем аэромагнитные, но Гогель, например, придает особое значение аномалии Витри-ле-Франсуа и предлагает интерпретацию, которая для отрезка до населенного пункта Арси-сюр-Об совпадает с интерпретацией авторов. Кроме того, Гогель предлагает продолжить



Фиг. 3.

указанный разлом к западу от Арси-сюр-Об, но проводить его несколько севернее, близ Провена.

Изопахиты на карте мощностей пермских отложений, составленной Линхардтом, подчеркивают тот факт, что рассматриваемый разлом служит южной границей поднятия Курживо — Труа-Фонтен — Сен-Мишель (изопахита 50 м), ориентировка которого на северо-восток — юго-запад соответствует простиранию разлома Мец.

И наконец, Менье указывает на северо-восточные — юго-западные ундуляции поверхности основания третичных отложений в районе к югу от реки Марны (Сен-Жорж и Провен), соответствующие структурам, расположенным непосредственно севернее реки Сены. Разлом, различимый на снимках МСС, проходит параллельно этим структурам и, вероятно, контролирует указанную флексуру.

Следует признать, вслед за Линхардтом, что пермские отложения обнажились в палеорельефе в результате герцинского орогенеза, наложившего свой отпечаток на структуру всего бассейна; в результате унаследования герцинских движений, по-видимому, возникли послемеловые разломы. Не исключено, что разломы в меловых отложениях, выявленные по снимкам МСС, отражают более глубинные разрывные структуры допермской и варисцийской ориентировки. Данные об этих разломах

важны для изучения палеогеографии герцинид, что необходимо для выявления новых угленосных структур. Новые сведения по тектонике района должны также стимулировать нефтепоисковые работы, в ходе которых до настоящего времени изучались только среднеюрские отложения (доггер). Таким образом, снимки МСС — исключительно важное средство изучения района, которое найдет свое отражение и в экономике.

В заключение следует отметить, что непрерывный характер разлома, выявленного по снимкам МСС, подтверждается многими геологическими данными. За неимением других, более веских доказательств связи между этим разломом, разломами в угольных копях и разломами района Лиманъ следует считать достаточно убедительными данные, приводимые Гролье и Летурнёром.

Разлом Журанзе. Разлом Журанзе выявлен гравиметрической и аэромагнитной съемками; он служит юго-восточным продолжением крупного разлома Пен-де-Бре. На снимках МСС этот разлом прослеживается от Бриенн-ле-Шато к востоку. Снимок МСС представляет особый интерес в том отношении, что он получен в дополнительных зонах спектра, так же как снимок разлома Мец; на снимке видно, что у Бриенна разлом разделяется на две ветви одинаковой значимости. Первая, выявленная ранее, расположена на севере и простирается с востока на запад; она служит продолжением разлома Виттель. Вторая, ранее неизвестная, расположена южнее, простирается с северо-запада на юго-восток и проходит через Бар-сюр-Об. В результате конвергенции этих двух разломов, как предполагалось при разведке на нефть, образовалась тектоническая ловушка, однако ее наличие еще не подтверждено. Выявлению ловушки должны способствовать снимки МСС.

Продолжение разлома Журанзе на северо-запад, по направлению к Брей, на снимке неразличимо. Эритье и Вийомен объясняют это тем, что верхнемеловые породы здесь не нарушены разломами, поскольку осадконакопление происходило с альбского времени. Следовательно, по снимкам МСС трудно установить связь двух важных разломов Парижского бассейна, а именно продолжений разломов Мец и Брей — Журанзе (Гогель считает, что они могут располагаться на разной глубине и пересекать друг друга).

Двойной разлом Марна. Разлом Марна впервые описан Абраром и Корруа, по данным которых его длина равна 50 км. Гравиметрические данные подтверждают его наличие, а снимки МСС, кроме того, дают возможность наметить его продолжение на северо-восток и определить его общую длину в 110 км. По результатам интерпретации снимков МСС эта система разломов должна в свою очередь пересекать разлом Мец.

Общие замечания по тектонике. Не вдаваясь в детали, касающиеся разломов, которые выделяются и на снимках МСС и на геологических картах того же масштаба, можно сделать следующие выводы:

Зона спектра 5 дает наиболее полную информацию о наличии разрывных нарушений; она фиксирует структуры, наиболее четко проявляющиеся на границах возделываемых участков или участков естественной растительности. Кроме того, такие структуры подчеркиваются расположением тополей, которые указывают направления водотоков средней величины.

Зоны 6 и 7 позволяют картировать структуры, проявляющиеся в прямолинейных границах лесных массивов, а также соответствующие водотокам на участках широкого развития аллювиальных отложений, где обычно произрастают тополя. Для выявления продолжения разлома Мец в направлении на юго-запад зоны 6 и 7 имеют особое значение, так как на них различается русло Сены, а тополя не видны. Выделение разлома осложняется наличием характерных для Сены многочисленных

меандр. Однако при достаточно мелком масштабе снимков МСС легко проследить основное направление долины.

Зоны 5, 6 и 7 дополняют друг друга.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные примеры показывают, что в пределах осадочного бассейна со спокойным залеганием слоев, естественной растительностью и возделываемыми участками, покрывающими почти всю территорию, мелкомасштабные снимки МСС позволяют получить следующую очень интересную информацию:

1) о литологии пород, которая отчетливо проявляется на возделываемых полях с комплексами различных культур и четкими границами участков землепользования и в зонах распространения естественной растительности, представленной лесами и травянистыми лугами, при этом тип растительности тесно связан с литологией;

2) о линеаментах, для выяления которых главное значение имеет масштаб. Действительно, элементы, кажущиеся прерывистыми при обычном масштабе наблюдения, выявляются на снимках МСС как единое целое.

Несомненно, наиболее важное свойство снимков ЕРТС-1 заключается в том, что они предоставляют возможность по косвенным критериям выявлять глубинные структуры, скрытые под мощным осадочным чехлом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abrard R., Corroy G.*, Etude de la double faille de la Marne Bull. Service de la carte géologique, France, № 165, 1926—27.
2. *Goguel J.*, Levé gravimétrique détaillé du Bassin de Paris, B.R.G.G.M., 1954.
3. *Grolter J., Jetourneur J.*, Evolution tectonique du grand sillon houiller du Massif central français — XXIII, Intern. Geol. Congress, **1**, 1968.
4. *Guerrier R., Pruvost P.*, La limite septentrionale du bassin houiller de Lorraine, C. R. Acad. Sciences de Paris, 1965.
5. *Heritier F., Villemin J., Megnien C.*, La tectonique du Bassin de Paris, Bull. B.R.G.M. Section 1, № 2, 1971.
6. *Lienhardt M. J.*, Etude stratigraphique, pétrographique et structurale du socle ante. Permien du Bassin de Paris, Annales Soc. géologique du Nord, 1961.

ДИСТАНЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ИСЛАНДИИ СО СПУТНИКА (ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СНИМКОВ МСС)

Р. Уильямс мл.

(Геологическая служба США, Вашингтон)

А. Бёдварссон

(Исландское геологосъемочное управление, Рейкьявик, Исландия)

С. Фридрикссон, И. Торстейнссон

(Сельскохозяйственный институт, Рейкьявик, Исландия)

Г. Палмасон, С. Рист

(Национальное управление энергетики, Рейкьявик, Исландия)

Х. Сигтрюгссон

(Метеослужба Исландии, Рейкьявик, Исландия)

С. Тораринссон

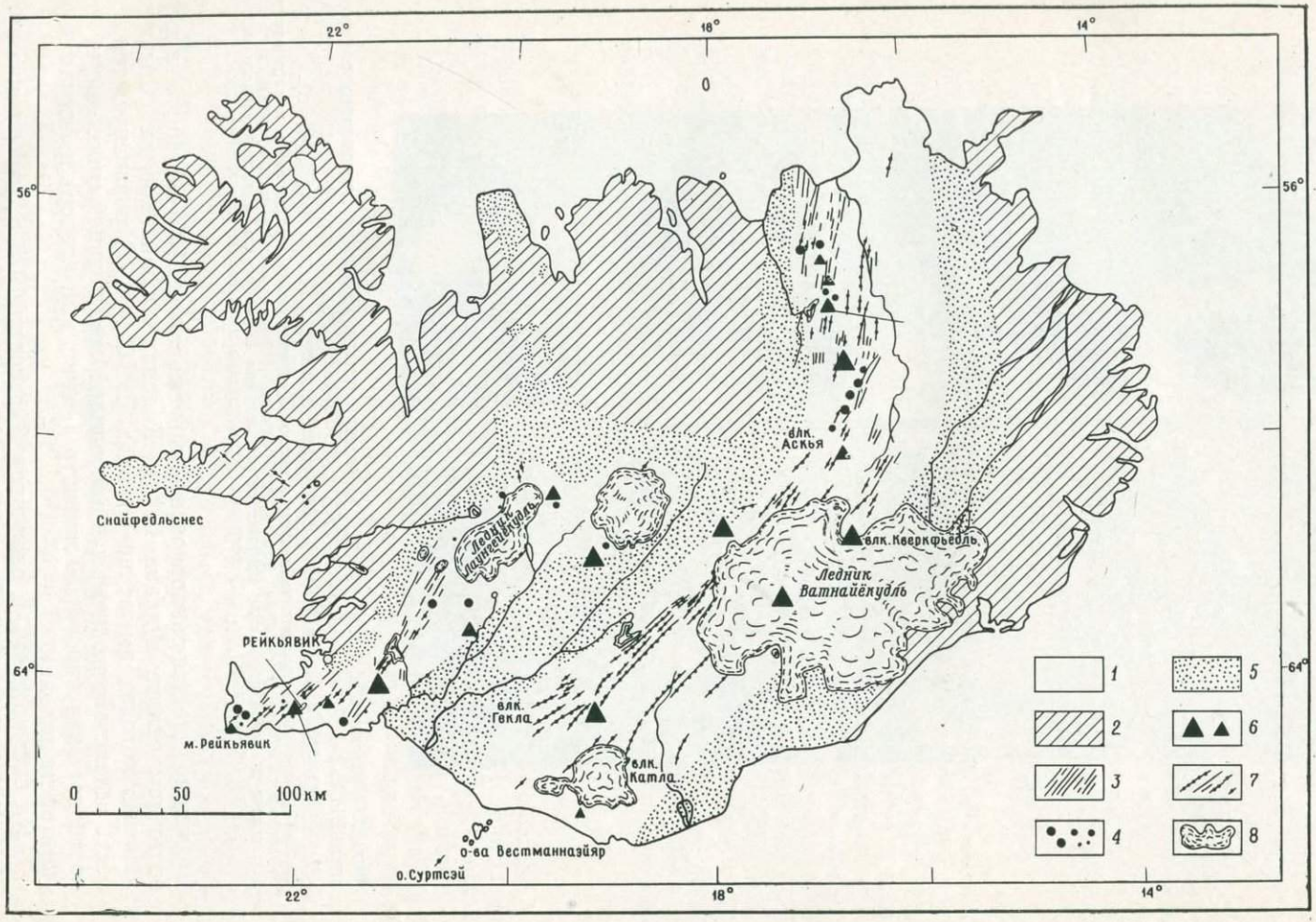
(Исландский университет, Рейкьявик, Исландия)

Анализ имеющихся для территории Исландии снимков ERTC-1 MCC позволяет сделать следующий вывод: если эти снимки имеют хронологическую привязку и сделаны с перекрытием, то даже при небольших затратах они могут дать информацию об условиях окружающей среды, необходимую для прогнозирования природных ресурсов. Часть статьи посвящена детальному описанию первых результатов серии экспериментов под общим названием «Дистанционное распознавание геолого-геофизических объектов на территории Исландии со спутника» [14].

ПРОДУКТЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

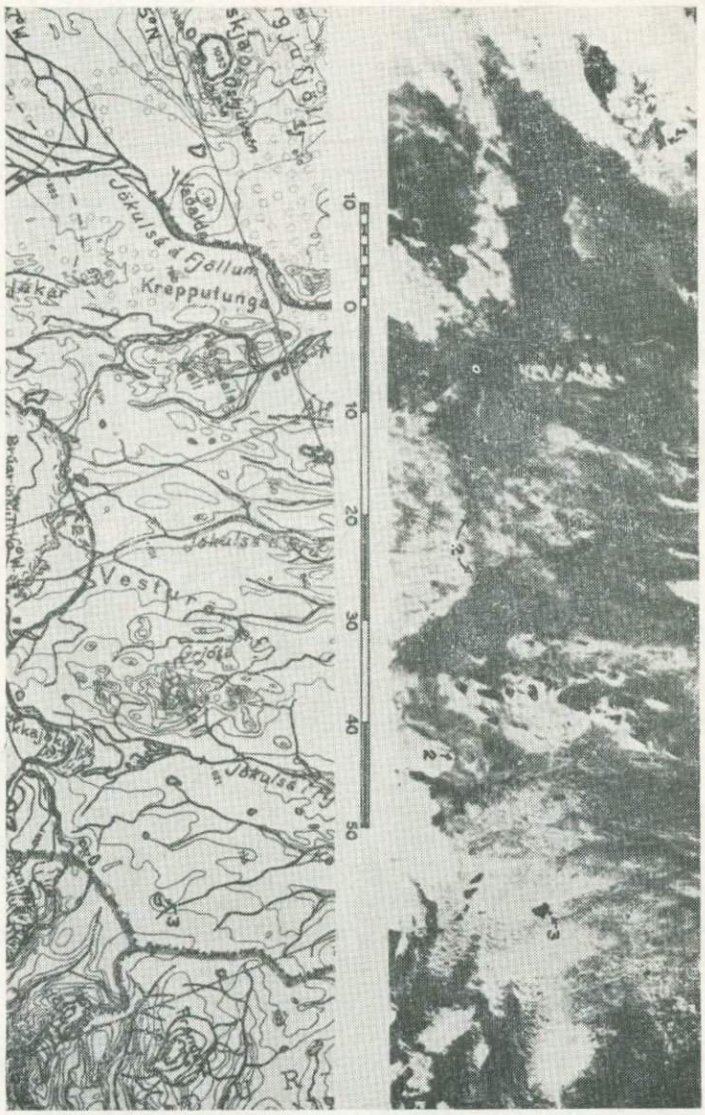
На фиг. 2 показаны лавовые потоки Викрахраун, излившиеся из трещины кальдеры Аскья (45 км^2) в октябре—декабре 1961 г. Лавовые потоки покрывают площадь 11 км^2 и протягиваются на расстояние 7,5 км. Некоторые потоки, образовавшиеся во время извержения 1921—1924 гг., можно установить в районе к юго-западу и юго-востоку от озера Эскьюватн. Аномалии теплового излучения, зарегистрированные в процессе аэротермографической съемки в 1966 г. [3], на снимках ERTC-1, возможно, соответствуют незаснеженным участкам на восточном берегу озера Эскьюватн. Сравнение снимка ERTC-1 MCC района Викрахраун с опубликованными картами Тораринссона и Сигвальдасона [12] и Тораринссона [9] и картой масштаба 1 : 1 000 000, изданной Исландским геологическим управлением в 1969 г., показывает, что снимок ERTC-1 дает более точное представление о площадном распространении лавовых потоков Викрахраун, чем упомянутые три карты.

Оконтуриваются лавовые потоки вулкана Гекла, излившиеся в 1970 г. [11], в частности потоки Судургигар, которые распространились на расстояние 5,5 км на юг и юго-запад. Потоки Скъёлквиар, простирающиеся на север, а также потоки, излившиеся к северо-западу от района, расположенного юго-западнее Аксларгигур, на снимке затенены.



Фиг. 1. Обзорная карта Исландии.

1 — области проявления молодого вулканизма; *2* — покровы третичных базальтов; *3* — постледниковые трещины растяжения; *4* — постледниковые щитовые вулканы или отдельные кратеры; *5* — покровы четвертичных базальтов; *6* — участки с повышенной температурой пород; *7* — постледниковые эруптивные трещины; *8* — ледники.



Фиг. 2. Сравнение снимка участка на северо-западе Исландии, сделанного со спутника ЕРТС-1 МСС (14 октября 1972 г., E-1083-12022-5), с картой того же района масштаба 1 : 500 000 (Геодезический институт, Копенгаген, 1945 г.).

Особый интерес представляют изменения в геологии и гидрологии, различимые и картируемые по снимку ЕРТС-1: 1) лавовые потоки Викрахраун (1961) в 6 км к северо-западу от озера Эскьюватн; 2) новое положение краевых частей ледника Бруарйёкудль и пульсирующего ледника Эйябаккайёкудль и 3) появление, исчезновение и изменение положения озер.

Возможно, удастся закартировать лавовые потоки 1947—1948 гг. на юго-восточном склоне вулкана Гекла. Колонии лишайников на остывших лавовых потоках имеют на снимках ЕРТС-1 МСС различную тональность вследствие их дифференцированной отражающей способности, что позволяет закартировать Топпгигур (вершинный кратер) и Аксларгигур (кратер на склоне).

На снимке ЕРТС-1, сделанном 3 февраля 1973 г., извержение вулкана на острове Хеймаэй архипелага Вестманнаэйяр, начавшееся 23 ян-

варя 1973 г., получило очень слабое отражение. Низкий угол солнечного освещения (7°), черный цвет лавы и вулканического пепла дают возможность различить только слабые очертания острова Хеймаэй. Там, где лавовые потоки достигают моря, можно рассмотреть лишь белые дымчатые облака. Основной веер выброса вулканического материала виден очень нечетко и, вероятно, располагается слева, за пределами снимка. Чтобы закартировать вновь образовавшуюся береговую линию острова и площадное распространение выбросов пепла и сравнить с ранее полученными снимками МСС вулканического архипелага Вестманнаэйяр, необходимо сделать снимки при более высоком угле солнечного освещения. (Примечание: спутник NOAA-2 пролетел над островом Хеймаэй 25 января 1973 г.; он зарегистрировал выброс вулканического материала в видимой (0,6—0,7 мкм) и термальной (10,5—12,5 мкм) зонах и тепловое излучение от лавовых потоков только в термальной зоне. В настоящее время ведутся измерения теплового излучения.)

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

По снимкам ЕРТС-1 хорошо картируются изменения береговой линии. Особенно отчетливо видны изменения в положении отмелей и пляжей вдоль южного берега, в частности вдоль побережья к северу и к западу от Ингоульфсхёвди. По мере появления снимков ЕРТС других участков побережья Исландии будет производиться их сравнение с имеющимися картами масштаба 1 : 250 000 и 1 : 1 000 000, с тем чтобы установить, насколько эти карты устарели. Снимок района Ингоульфсхёвди подтверждает, что указанные изменения береговых линий поддаются картированию. В зоне шельфа могут быть закартированы веера осадков, образовавшиеся в результате деятельности ледниковых потоков, пересекающих Скейдараурсандур и Медадландсбургур. Впоследствии данные об объеме этих осадков можно будет сравнить с гидрографическими сведениями и установить, существует ли зависимость между объемом осадков и дебитом какой-либо определенной реки.

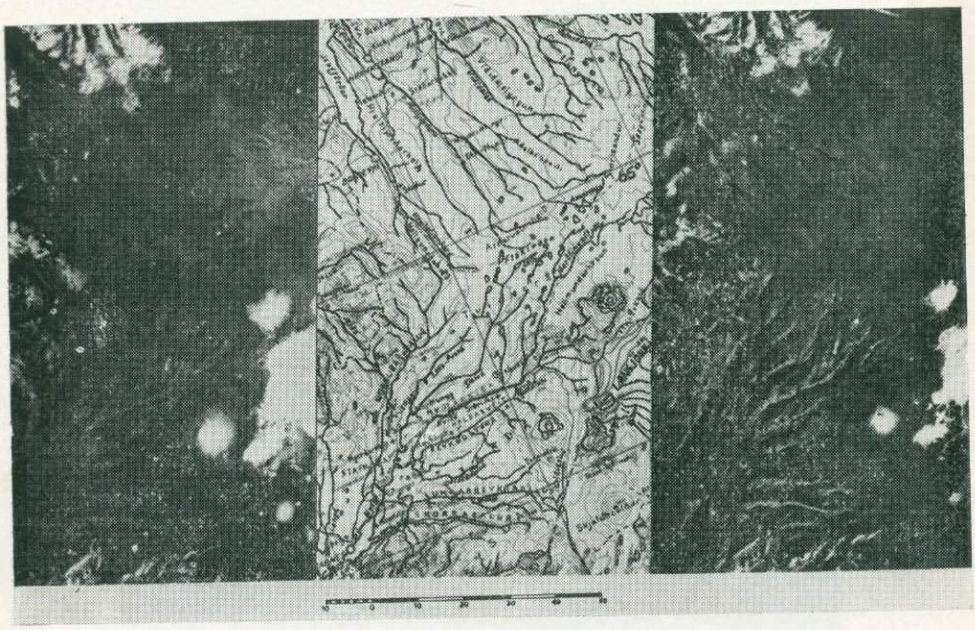
СЕЗОННЫЙ СНЕГ И ЛЕД

Ранние снегопады и их зависимость от положения участков над уровнем моря четко различаются на многих снимках территории Исландии, сделанных со спутника ЕРТС-1. Однако особый интерес представляет «светлый» снегопад в районе Стоурисандур (фиг. 3), который на снимках в зоне 4 (0,5—0,6 мкм) и в зоне 7 (0,8—1,1 мкм) выглядит по-разному. Снежный покров на снимке в зоне 4 представлен более широкой частью спектра, чем на снимке в зоне 7. Это обусловлено тем, что тающий снег оказывается очень темным в инфракрасном диапазоне спектра из-за поглощения света за счет образовавшейся воды. Аналогичные темные участки талого снега можно различить в окрестностях ледников Эйрихсйёкудль и Окйёкудль. Зимний снежный покров и незаснеженные низменные прибрежные участки (например, Скейдараурсандур) поддаются картированию. Намечаются также контуры покрытого снегом замерзшего озера Грёналон (площадью приблизительно 3×5 км).

ЛЕДНИКОВЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА

Ледниковые формы рельефа особенно четко видны на снимках ЕРТС МСС. На фиг. 2 показаны (черная линия на карте масштаба 1 : 500 000) современное положение части ледника Бруарйёкудль и новое положение края ледника Эйябаккайёкудль. Следует отметить, что

зона 5 МСС оказалась более приемлемой для картирования положения ледников, чем три другие зоны, а совмещение цветных оригиналов зон МСС обеспечило необходимую точность карты, что позволило отличить участки развития конечных морен от участков, не подвергавшихся оледенению. С черно-белыми снимками было труднее работать, потому что материал конечной морены имеет тот же состав, что и породы перед фронтом ледника, и между ними существует лишь незначительное различие в отражающей способности. На снимке МСС, сделанном 14 октября 1972 г., наступающий фронт ледника Эйябаккайёкудль очень крутой; при угле солнечного освещения 15° крутизна усиливается тенью, по которой очерчивается контур участка, покрытого ледником. Последняя



Фиг. 3. Сравнение снимков участка на северо-западе Исландии, сделанных со спутника ЕРТС-1 МСС (*слева:* снято 19 октября 1972 г., E-1088-12305-4; *справа:* снято 19 октября 1972 г., E-1088-12035-7), с картой того же района масштаба 1 : 1 000 000 (Геодезический институт, Копенгаген, 1963 г.).

Особый интерес представляют геологические и гидрологические явления, зарегистрированные на снимке ЕРТС-1: 1) изменяющийся облик снежного покрова на участке возвышенности, расположенной севернее ледника Лангйёкудль в зонах 4 и 7 и вокруг ледниковых покровов, 2) наблюдаемые изменения ледниковых покровов и 3) изометричные морфоструктуры в районе Сейдисфьордур, являющемся центром третичного вулканизма.

пульсация ледника Эйябаккайёкудль была зарегистрирована в 1890 г. [10]. Амплитуда происходящей в настоящее время пульсации ледника точно не известна (0,5 км (?), согласно устному сообщению Тораринссона); современный лоб ледника на снимке МСС фиксируется на расстоянии 3,5 км от положения, которое он занимал в 1890 г.

Сравнение положения ледниковых рек на снимках МСС и на крупномасштабных картах (до масштаба 1 : 250 000 включительно) указывает на значительные изменения. То же самое можно сказать и о краевых ледниковых озерах и других озерах Исландии. Снимки ЕРТС позволят, вероятно, составить более точные карты форм ледникового рельефа и дадут возможность производить их периодический контроль.

Ледниковые формы рельефа Исландии очень хорошо различаются на снимках МСС, сделанных ранней осенью. Лучшие снимки ледников

Мирдальсйёкудль и Эйяфьядлайёкудль сделаны в начале сентября 1972 г., причем два ледника из группы ледников Мирдальсйёкудль, а именно Сольхеймайёкудль и Хёфдабреккйёкудль (Кётлуйёкудль) сняты особенно детально. Однако целесообразнее производить съемку в августе, когда мощность снежного покрова минимальна.

СТРУКТУРНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

На снимке, сделанном в середине зимы при угле солнечного освещения 7° в районе ледника Ватнайёкудль, покрытого снегом, и в районе к западу и к югу от этого огромного ледникового покрова, видны чрезвычайно мелкие элементы морфологии и строения вулканических и ледниковых форм рельефа. Ряды кратеров (в частности, Лака-Гигар), трещины, грабены и т. д. видны очень отчетливо. Оказалось возможным закартировать древние конечные морены у притоков ледников Ватнайёкудль и Ховсйёкудль. На покрытой снегом поверхности ледника Ватнайёкудль различимы мельчайшие детали, которые в отдельных случаях отражают строение ледникового ложа. Четко видны очертания кальдеры Гримсвётн и привершинная область Эрайвайёкудль. Особый интерес представляют четыре структуры изометричной формы в пределах этого ледникового покрова. С уверенностью можно сказать, что две из них в районе Кверкфьёдль фиксируют местоположение вулканов, расположенных под ледником. Тораринссон [8] указывал на наличие центра извержения в верхней части ледника Дингьюйёкудль. Местоположение предполагаемого центра извержения было показано неправильно, так как на снимке МСС отчетливо видна его связь с первой из двух структур. Термальный район Хверадалур [5], вероятно, связан структурно со второй изометричной структурой на снимке ЕРТС. Две другие изометричные или эллиптические структуры на леднике Ватнайёкудль, одна у Бардарбунга и другая близ Хамарин, возможно, также связаны с вулканами.

В геотермальном районе Торвайёкудль, самом крупном в Исландии (100 км^2), видны структуры округлых очертаний [6, 7]. Западнее Лангйёкудль, в районе Тчёл, структура изометричной формы, вероятно, отражает положение ранее не выявленного третичного вулкана центрального типа.

ЛУГА И ЛЕСА

Знание площадного распространения травяного покрова, его кормовых качеств и скорости роста жизненно необходимо для успешного экономического развития сельского хозяйства. Суровый климат Исландии [1], отложения пепла после извержения вулканов (например, после извержения Геклы в 1970 г. и извержения вулкана Киркьюфёдль на острове Хеймаэй), а также постоянное присутствие морского льда у побережья Исландии — все это влияет на состояние лугов. Мелиоративные работы в основном направлены на освоение целинных земель [2], которые в дальнейшем будут окультурены для предотвращения быстрой эрозии почвы и создания дополнительных пастбищ.

Программа картирования растительного покрова проводится в настоящее время для получения сведений о растительности Исландии [13], но при этом требуются дополнительные данные о качестве (например, выживаемость растений в зимнее время) и темпах роста лугов, с тем чтобы решения об использовании природных ресурсов способствовали наиболее эффективной эксплуатации пастбищ. Предварительный анализ совмещенных цветных оригиналов снимков ЕРТС-1 МСС показывает, что можно картировать площадное распространение растительных по-

кровов. Прежде чем приступить к такому картированию и проводить анализ, необходимо получить сезонные снимки. Совмещенные цветные оригиналы МСС, очевидно, дадут возможность картировать сезонные изменения состояния лугов, площадей повторных посевов и лесопосадок и позволят с помощью спутников, находящихся на орбите, получать своевременно новые данные, указывающие правильные пути использования природных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eythórsson J., Sigtryggsson H.*, The climate and weater of Iceland, in: The Zoology of Iceland, I, pt. 3, pp. 1—62, 1971.
2. *Fridriksson S., Pálsson J.*, Landgraedslutilraun á Sprengisandi, Islenzkar Landbúnadar Rannsóknir, **2**, № 2, pp. 34—49, 1970.
3. *Friedman J. D., Williams R. S., Jr., Pálmason G.*, Infrared sensing of active geologic processes, in: Proc. Fifth Symp. on Remote Sensing of Environment, Univ. of Mich., Ann Arbor, Mich., pp. 787—820, 1968.
4. *Friedman J. D., Johansson C. E., Oskarsson N., Svensson H., Thórarinsson S., Williams R. S., Jr.*, Observations on Icelandic Polygon Surfaces and Palsa Areas, Photo interpretation and field studies, Geografiska Annaler, **53**, ser. A, № 3—4, pp. 115—145, 1971.
5. *Friedman J. D., Williams R. S., Jr., Thórarinsson S., Pálmason G.*, Infrared emission from Kverkfjöll subglacial volcanic and geothermal area, Iceland, Jökull, **22**, pp. 27—43, 1972.
6. *Saemundsson K.*, Infrared imagery of Torfajökull thermal area, National Energy Authority Rept., Jan., Reykjavík, p. 22, 1969.
7. *Saermundsson K.*, Jardfraedíglefsur um Torfajökulssvaedíd, Náttúrufraedíngurinn, **42**, pp. 81—99, 1972.
8. *Thórarinsson S.*, Jökulhlaup og eldgos á jökulvatnasvaedi Jökulsár á Fjöllum, Náttúrufraedingurinn, **20**, pp. 113—133, 1950.
9. *Thórarinsson S.*, Eldur í Öskju, Reykjavík, Almenna Bókafélagid, p. 101, 1963.
10. *Thórarinsson S.*, Sudden advance of Vatnajökull outlet glaciers 1930—1964, Jökull, **14**, pp. 76—89, 1964.
11. *Thórarinsson S.*, Hekla — A notorious volcano, Reykjavík, Almenna Bókafélagid, p. 62, 1970.
12. *Thórarinsson S., Sigvaldason G. E.*, The eruption in Askja, 1961, A preliminary report, Am. Journ. Sci., **260**, pp. 641—651, 1962.
13. *Thórsteinsson I.*, Gródurvernd, Reykjavík Rit landverndar 2, Reykjavík, p. 128, 1972.
14. *Williams R. S., Jr.*, Satellite geological and geophysical remote sensing of Iceland, in: Proc. Eighth Intl. Symp. on Remote Sensing of Environment, Univ. of Mich., Ann Arbor, Mich., pp. 1465—1466, 1972.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СНИМКОВ ЕРТС-1 ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИИ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ КАНАДСКОЙ АРКТИКИ

А. Грегори

(Компания «Грегори Геосайенс», Оттава, Канада)

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ЕРТС

Данные ЕРТС-1 восполняют недостаток информации об окружающей среде и земных ресурсах. При дистанционных исследованиях смысл полученным данным придает лишь их интерпретация; поэтому она имеет решающее значение при оценке преимуществ, которые можно извлечь из работы в целом.

Можно выделить три уровня интерпретации, часто применяющиеся для получения информации с одного снимка или серии снимков:

1. Быстрое распознавание или интерпретация очевидной, не требующей объяснения информации. Такая интерпретация может быть вы-

полнена любым специалистом, разбирающимся в масштабах, картах и региональной географии.

2. Квалифицированная интерпретация. На этом уровне интерпретация проводится в рамках определенной научной дисциплины и ее может осуществлять специалист или группа специалистов. Такая интерпретация все же остается сравительно простой, часто сводится к визуальному анализу, но возможна и с помощью специального оборудования для усиления основных различий спектральных, пространственных или временных характеристик. Квалифицированная интерпретация зависит от умения ориентироваться в обстановке и от специализированных знаний о природных ресурсах и условиях среды, хотя при этом не требуется внесения геометрических поправок или использования специальных методов, кроме тех, которые обычно применяются при интерпретации аэрофотоснимков.

3. Автоматизированная интерпретация, т. е. спектральный пространственный и временной анализы. На этом уровне интерпретации используется сложная и сравнительно дорогостоящая машинная обработка. В результате получают таблицы, перфоленты, классификации и другие материалы, содержащие формализованные данные, которые становятся полезной информацией лишь после их соответствующей обработки. Подобные методы в основном еще остаются экспериментальными, но они обещают дать много новых сведений.

Интерпретация данных сама по себе — это еще не применение их, даже если при этом используются данные ЕРТС. Проблема заключается не в выявлении объектов на снимке, а в выяснении того, что за ними кроется. Например, данные ЕРТС можно просто рассматривать как снимок или другое изображение, воспринимая его при этом как произведение искусства. При другом подходе, когда сравниваются очертания и различия объектов на снимках в стремлении получить практическую пользу, информация становится «потенциально полезной». И наконец, такая информация становится «практически полезной» при систематическом накоплении данных, отвечающем экономическим и социальным задачам. Таким образом, одно лишь изучение возможностей использования данных ЕРТС для какой-то определенной цели еще не означает их применения на практике, несмотря на очевидность их использования в настоящее время. Критерием практического применения служит прибыль от капиталовложений, а не приобретение дополнительных научных сведений. Не исключено, что сама посылка, а возможно, и само определение противоречивы.

При таком подходе реальность применения данных ЕРТС определяется тремя факторами: быстротой интерпретации, потребностью в получаемой информации и эффективностью затрат по сравнению с другими методами, дающими аналогичную информацию. Из этих трех факторов потребность в получаемой информации можно оценить, зная современные информационные системы, которые используются при изучении условий окружающей среды и земных ресурсов. Однако понятие «потребность» является очень неточным и, к сожалению, зависит от запросов потребителя.

Понятие «быстрота первичной интерпретации» — достаточно ясное, особенно при сравнении с быстротой интерпретации большого объема данных, получаемых, например, при аэрофотосъемке. Кроме того, быстрота интерпретации со временем возрастет, поскольку потребность в новой информации, в новых данных и более сложной интерпретации будет уменьшаться. Затраты на ранней стадии развития орбитальных систем распознавания могут оказаться неоправданными. Но с помощью

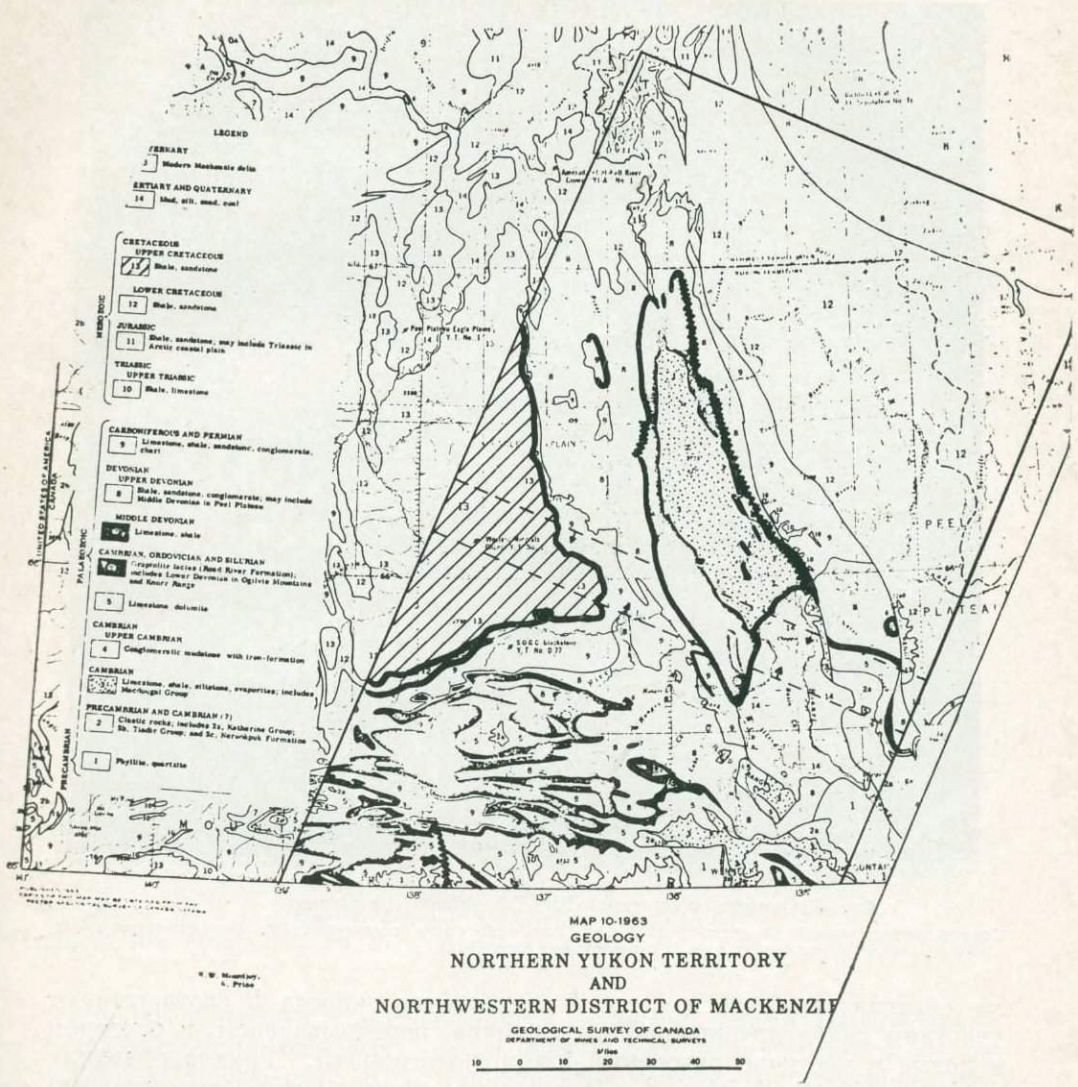


Фиг. 1. Снимок со спутника ЕРТС-1 района гор Ричардсон.
Сделан ранней зимой (9 октября 1972 г.). Угол солнечного освещения 17°; без геометрической коррекции; зона 6 МСС.

какого еще способа можно получить огромное количество данных для площади 31 000 км^2 за несколько долларов?

И наконец, эффективность любого применения данных зависит от необходимости использования потребителем части или всех данных ЕРТС. Несомненно, что простые методы интерпретации дают самые быстрые и важные результаты. Однако это никоим образом не означает, что эти методы найдут наиболее широкое применение или дадут наибольшие выгоды. Такие суждения лучше всего проверяются в историческом аспекте.

При непосредственном практическом применении выявляются признаки, указывающие на то, что основные преимущества спутника ЕРТС заключаются в увеличении эффективности планирования и осуществления программ по региональному геологическому картированию. Приведенные ниже результаты, которые следует рассматривать как предварительные, были получены с помощью простой, но квалифицированной интерпретации снимков МСС только зоны 6. Снимки делались и в летнее время, и ранней зимой в двух районах Канадской Арктики, полностью покрытых геологической и геоморфологической съемками. Никакие специальные полевые исследования или другие ревизионные работы с целью проверки этой интерпретации не проводились.



Фиг. 2. Геологическая карта территории северного Юкона [4].

СНИМКИ ЕРТС-1 ДЛЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ТЕРРИТОРИИ ЮКОН

На зимнем снимке хребта Ричардсон (фиг. 1) инфракрасные отражающие характеристики можно легко сгруппировать в 5 классов — от *A* до *E*. Классы *B* и *D*, возможно, окажутся эквивалентными. При сравнении с предварительной геологической картой [4] становится ясным, что отражающие характеристики класса *A* соответствуют меловым глинистым сланцам (косая штриховка, цифра 13 на фиг. 2); класс *B* представляет группу палеозойских и мезозойских обломочных пород (цифры 8, 9 и 12 на фиг. 2); класс *C* характеризует две пачки карбонатных пород палеозойского возраста (цифры 3 и 6 на фиг. 2). Класс *D* имеет те

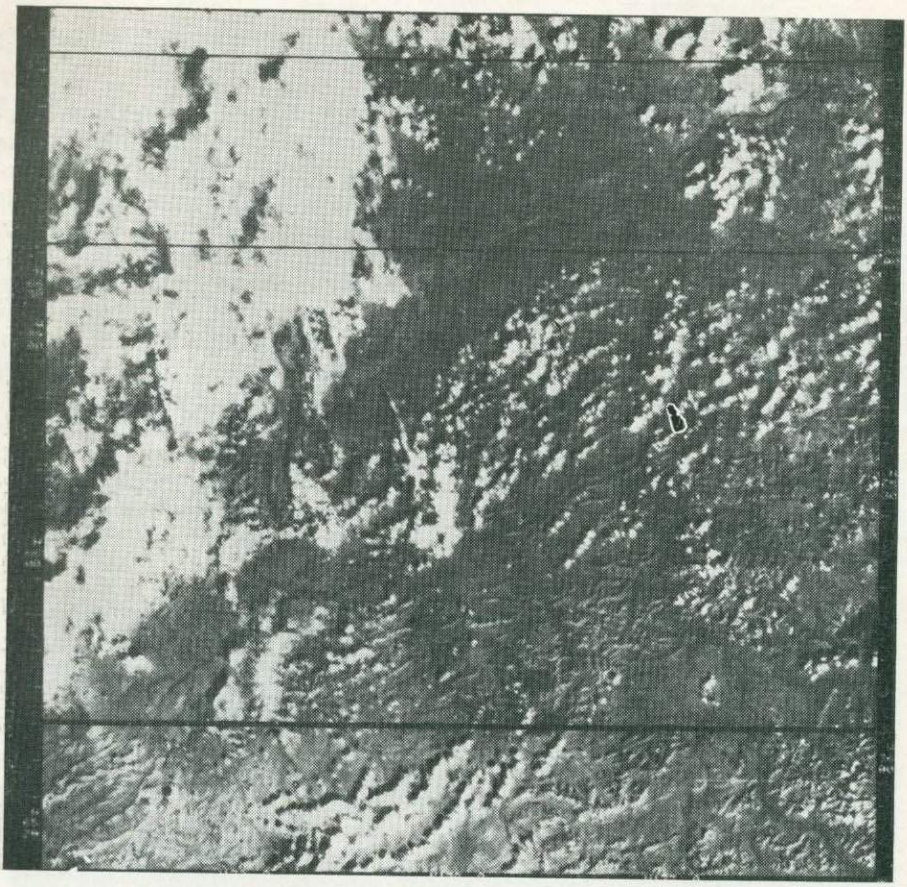


Фиг. 3. Снимок со спутника ЕРТС-1 района гор Огилви.
Сделан ранней зимой (9 октября 1972 г.). Угол солнечного освещения 18°; без геометрической коррекции; зона 6 МСС.

же обозначения, что и класс *B*. Отражения класса *E* соответствуют участкам слабо дренированного аллювия, перекрывающего в основном меловые и частично девонские обломочные породы. Границы между классами *A* и *B*, *B* и *C* и *C* и *D* довольно резкие и совпадают с геологическими границами определенных формаций или групп формаций (фиг. 1, 2). Граница классов *D* и *E* определяется с трудом и явно не коррелируется с закартированными структурами.

За исключением этого последнего случая, совпадение границ прекрасное, что может быть продемонстрировано путем наложения прозрачной пленки с данными снимка ЕРТС на карту того же масштаба. При этом, однако, наблюдаются некоторые расхождения, причины которых еще не установлены. Вполне вероятно, что эти расхождения обусловлены геологическими особенностями, не показанными на предварительной карте.

В районе гор Огилви, где породы дислоцированы более интенсивно (фиг. 3), аналогичные различия в литологии на снимках зоны 6 МСС видны не столь отчетливо. Высокие отражающие характеристики класса *F*, аналогичные отражающим характеристикам класса *C* (фиг. 1), соответствуют трем палеозойским карбонатным толщам (цифры 5, 6 и 7 на фиг. 2). В то же время высокие показатели отражения класса *G* характеризуют кварциты, обломочные породы и другие отложения до-



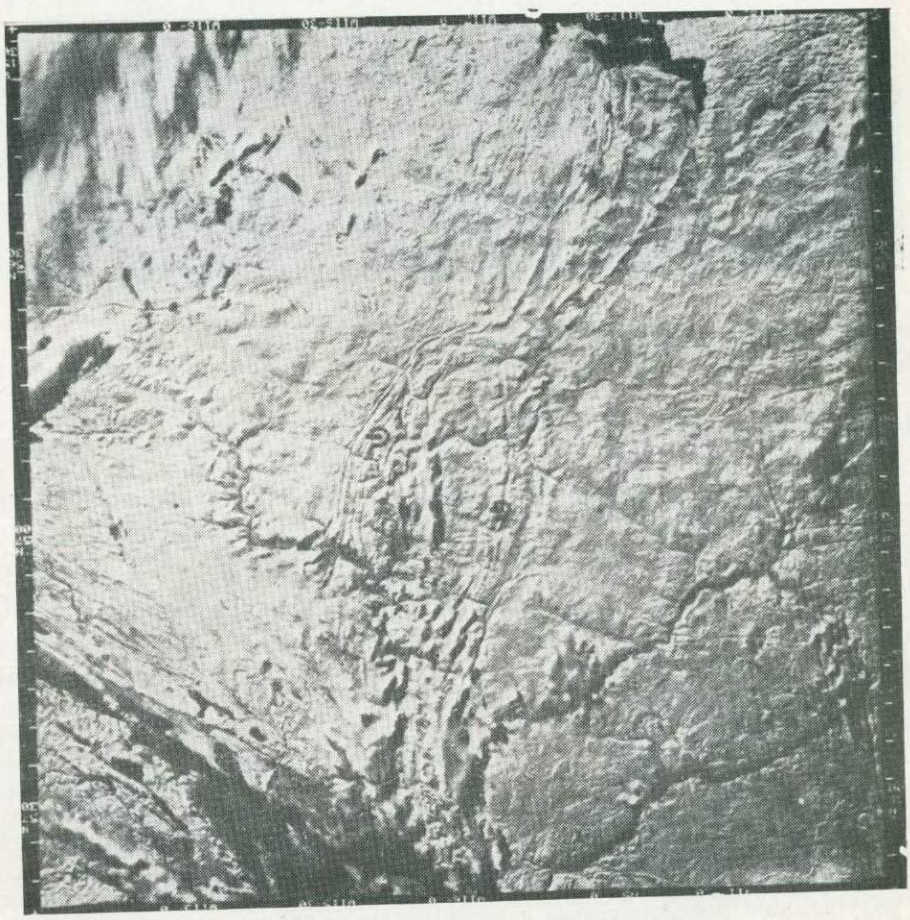
Фиг. 4. Снимок территории гор Огилви.
Сделан летом (30 июля 1972 г.). Угол солнечного освещения 42°; без геометрической коррекции; зона 6 МСС.

кембрийского возраста, встречающиеся совместно с ними. Палеозойские и мезозойские обломочные породы отличают от упомянутых выше на основании показателей отражательной способности. В дальнейшем, вероятно, окажется возможным отличать палеозойские обломочные породы от мезозойских. К югу от района листа карты (фиг. 2) классы с высокой отражательной способностью, вероятно, охватывают большой диапазон пород разного состава [3]. Многоспектральные характеристики этих пород еще не изучались. Типы характеристик, использованные при классификации отражательной способности для зоны 6 МСС, наблюдаются также и на летних снимках, хотя и менее отчетливо.

Структурные элементы всех указанных выше комплексов пород четко проявляются на снимках, сделанных в начале зимы. В частности, отмечаются складки и разломы, которые отсутствуют на предварительной геологической карте. Многие из этих структурных элементов видны также на летних снимках, но не так отчетливо. Следует также обратить внимание на то, что врезанные долины в нижнем течении реки Пил особенно хорошо видны на снимках, сделанных в начале зимы. Такие структуры, как друмлины, озы и ледниковые борозды, также лучше видны на снимках ЕРТС, сделанных в арктических областях в начале зимы. В то же время рельеф морен и ориентированные озера значительно отчетливее видны на летних снимках.

СНИМКИ РАЙОНА ЗАЛИВА БАТЕРСТ (СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЕ ТЕРРИТОРИИ) СО СПУТНИКА ЕРТС

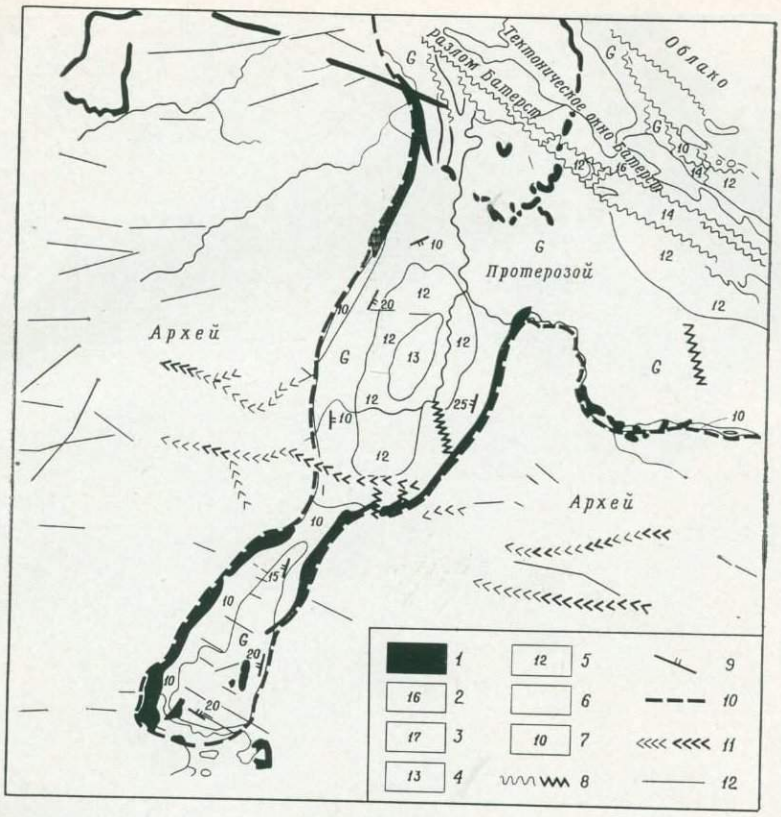
На зимнем снимке района залива Батерст (фиг. 5) отчетливо различаются складчатые протерозойские образования, область развития которых частично окаймлена габбровыми силлами (фиг. 6). Протерозойские отложения залегают несогласно на крутопадающих архейских гнейсах, гранитах и метаморфизованных породах. Перепады высот рельефа в пределах силлов обычно составляют 30—60 м, но иногда встречаются холмы высотой до 240 м. Отмечается отчетливая стратификация кварцитов Гулборн (*G* на фиг. 5 и 6), направление падения которых можно определить по элементам залегания обнажающихся маркирующих горизонтов. В протерозойских породах виден ряд складок и разломов; особенно четко выделяется крупный уступ в зоне разлома Батерст, где перепады высот составляют 200—300 м. Выделяется также несколько не закартированных ранее разломов. Много линейных структур имеется и в поле развития архейских пород. Одни из них совпадают с закартированными разломами, а другие, вероятно, отвечают разломам и трещинам, не показанным на предварительной карте. Эти структуры



Фиг. 5. Снимок со спутника ЕРТС.

Сделан ранней зимой (9 октября 1972 г.). Угол солнечного освещения 25°; без геометрической коррекции; зона 6 МСС.

(стилох перевернуть вверх ногами!)



Фиг. 6. Геологическая карта [2].

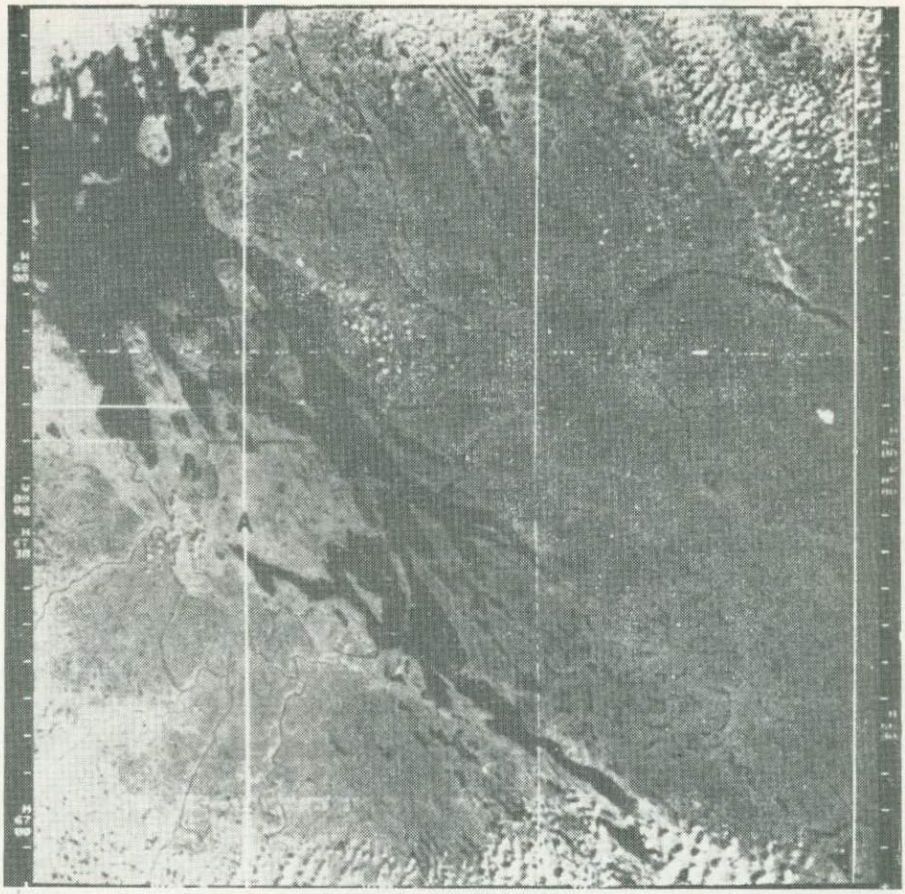
1 — габбровые силлы и дайки; *2* — песчаники; *3* — алевролиты и аргиллиты; *4* — доломитовые песчаники; *5* — аргиллиты; *6* — кварциты Кулбурн; *7* — аргиллиты; *8* — разлом (закартированный и проинтерпретированный на снимке); *9* — слоистость; *10* — несогласие в основании протерозоя; *11* — эскер (закартированный и проинтерпретированный на снимке); *12* — линейные формы, трещины и разломы (закартированные и проинтерпретированные).

лучше всего проявляются на участках, где перепад высот составляет не менее 30 м.

На снимке (фиг. 5, 6) видно также несколько даек габбро, выступающих в рельефе примерно на 30 м, хотя в основном дайки скрыты под покровными отложениями. Видны также плейстоценовые породы, в частности валы водно-ледниковых отложений — эскеры, высота которых редко превышает 30 м. На летнем снимке (см. соответствующие участки к юго-западу от залива Батерст на фиг. 6 и 7) большинство таких структур не различимы.

Высокие показатели отражательной способности инфракрасного излучения участков в пределах низменности залива Коронейшен [1] существенно отличаются от показателей отражательной способности пород на летнем снимке залива Батерст. В то же время на летнем снимке залива Батерст несколько участков за пределами низменности имеют одинаковую отражательную способность. Как показано ниже, эти различия отражательной способности интерпретируются как результат значительных различий в растительном покрове, а именно между обильной растительностью низменностей и редкой растительностью (или ее отсутствием) на возвышенности.

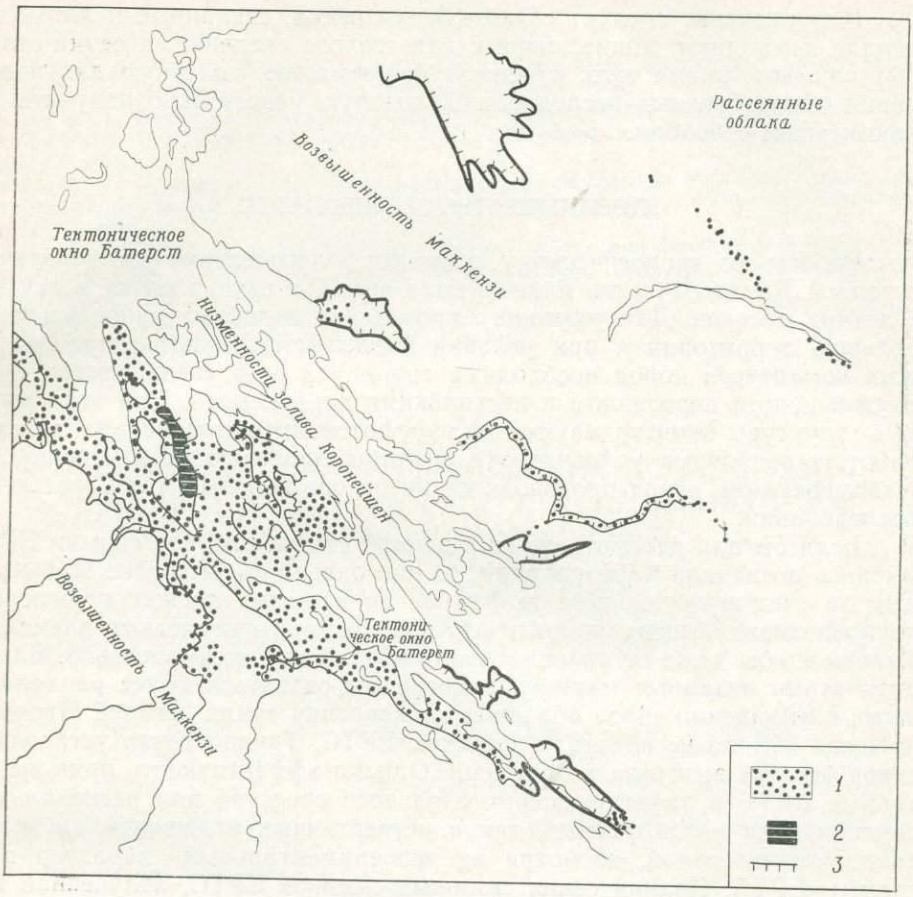
Возвышенности реки Маккензи [1] сложены коренными породами, которые покрыты прерывистым маломощным чехлом валунно-моренных



Фиг. 7. Снимок со спутника ЕРТС-1.
Сделан летом (28 июля 1972 г.). Угол солнечного освещения 40°; без геометрической коррекции; зона 6 МСС.

отложений. На хорошо дренируемой поверхности имеются лишь разрозненные, покрытые низкой травой участки, пятна лишайника и участки заболоченной тундры. С другой стороны, низменность залива Коронейшен сложена глинисто-моренными отложениями и коренными породами, покрытыми в основном морским илом; она расположена на высоте менее 120 м над уровнем моря (фиг. 8). Эта поверхность слабо дренирована и покрыта пышной растительностью [1], в основном болотно-тундровыми травами, низкой осокой и цветковыми растениями. Часто встречаются древовидные кустарники, особенно на западном берегу залива Батерст.

Участок с высокой отражательной способностью (*B* на фиг. 7) отвечает поясу зеленокаменных пород, окруженному гранито-гнейсами. Вследствие характера преобладающих на поверхности отложений и низкой абсолютной отметки участок *B* и другие аналогичные участки имеют высокую отражательную способность; они интерпретируются так же, как низменные участки, покрытые морскими илами и пышной растительностью. Несколько участков с низкой отражательной способностью на низменностях (к северу от *A* на фиг. 7) отвечают крупным выходам габбро.



Фиг. 8. Карта некоторых поверхностных структур [1, 2].
1 — морские илы и пески; *2* — крупное обнажение габбро; *3* — изогипса, соответствующая примерно 120 м.

ВЫВОДЫ

Предварительная интерпретация данных показывает, что в Арктике условия в начале зимы наиболее благоприятны для наблюдения за многими геологическими структурами, поскольку:

1) маломощный снежный покров подавляет «помехи», обусловленные растительностью, почвами, горными породами и водой, создавая равномерную отражающую поверхность, аномалии которой несут геологическую и геоморфологическую нагрузку;

2) низкий угол солнечного освещения усиливает выраженность структур и неровности поверхности, создавая тени, очень сходные с тенями на снимках, сделанных с помощью радара с боковым обзором.

Эти два преимущества съемки ранней зимой подчеркивают строение, перепад высот и характер пород на поверхности. Там, где такие формы рельефа отражают состав пород, можно дать широкую классификацию геологических формаций и оконтурить границы их распространения.

В то же время летние снимки дают возможность оконтурить почвенно-растительные комплексы и водные бассейны более точно, чем зимние снимки.

В заключение следует сказать, что снимки, сделанные и летом и в начале зимы дают общие, ценные для геолога сведения, а серии сезонных снимков, кроме того, содержат информацию, полезную для проведения разнообразных исследований, которую невозможно получить никаким иным способом.

ПРЕИМУЩЕСТВА ДАННЫХ ЕРТС

Работы по геологическому и геоморфологическому картированию северной Канады обычно планируются зимой и выполняются в течение 3 летних месяцев. Для успешного проведения подобных работ на такой большой территории и при условии квалифицированного опробования всех комплексов пород необходима группа из 5—6 специалистов с обслуживающим персоналом и несколькими вертолетами. При этом крупные структуры оконтуриваются по аэрофотоснимкам до начала полевых работ, а в полевых условиях эти границы проверяются и уточняются. Классификация пород производится на основе полевых и лабораторных исследований.

Если бы для рассмотренных в данной статье районов снимки ЕРТС имелись до начала картирования, то оно оказалось бы более эффективным за счет значительного выигрыша во времени, поскольку основное распределение многих геологических и геоморфологических элементов выявилось бы даже по сравнительно небольшому числу снимков. Благодаря этому наземные маршруты могли бы оказаться более рациональными в отношении сбора образцов и выявления таких деталей строения, которые обычно не видны на снимках ЕРТС. Трудно точно установить, каков был бы выигрыш во времени. Однако эффективность применения данных ЕРТС в качестве вспомогательного средства при региональном картировании как коренных, так и четвертичных отложений представляется значительной, несмотря на экспериментальный характер программы ЕРТС. Полная серия сезонных снимков ЕРТС, полученная для какого-либо района, может быть использована при решении большинства геологических вопросов, за исключением тех, которые связаны с динамическими явлениями (эрозия, оползни, вулканизм).

Дальнейшие преимущества такого картирования заключаются в использовании увеличенных снимков ЕРТС. Предварительная оценка снимков, увеличенных до масштаба 1 : 250 000 и 1 : 100 000, показывает, что они могут быть использованы в качестве основы при составлении карт. Снимки были увеличены до масштаба 1 : 30 000 для проверки возможности их использования при проведении аэрофотосъемки. Необходимо отметить, что картографическое качество при этом не гарантируется, а величина геометрических ошибок еще точно не установлена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Явное достоинство снимков ЕРТС заключается в их сравнительно простой предварительной интерпретации, позволяющей получить общие сведения о распространении и строении геологических формаций.

2. Предварительная интерпретация зоны 6 МСС не дает сведений о составе пород, но в определенных пределах она может быть использована для общей классификации пород.

3. Данные ЕРТС найдут наиболее успешное практическое применение там, где положен в основу принцип «идти дальше простого выяснения того, как поступить правильно, пытаясь достичь верной цели» (Питер Драккер).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bird J. B., Bird M. B.,* Bathurst Inlet, Northwest Territories, Memoir № 7, Geographical Branch, Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1961.
2. *Fraser J. A.,* Geological Notes on Northeastern District of Mackenzie, Northwest Territories, Paper № 63—40, Geol. Survey of Canada, Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1964.
3. *Green L. H.,* Geology of Nash Creek, Larsen Creek and Dawson Map-areas, Yukon Territory, Memoir № 364, Geol. Survey of Canada, Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1972.
4. *Norris D. K. et al.,* Geology, Northern Yukon Territory and Northwestern District of Mackenzie, Map 10—1963, Geol. Survey of Canada, Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1963.
5. *Norris K. K.,* Light Helicopter Reconnaissance — Operation Porcupine, 1962, Canad. Mining Journ., **84**, № 11 (November), pp. 45—50, 1963.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ ПЛАТО КОЛОРАДО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛУЧШЕННЫХ СНИМКОВ ЕРТС

А. Гёц, Ф. Биллингсли

(Лаборатория реактивного движения, Пасадена, Калифорния)

Д. Элстон, И. Лучитта

(Геологическая служба США, Флагстафф, Аризона)

Ю. Шумейкер

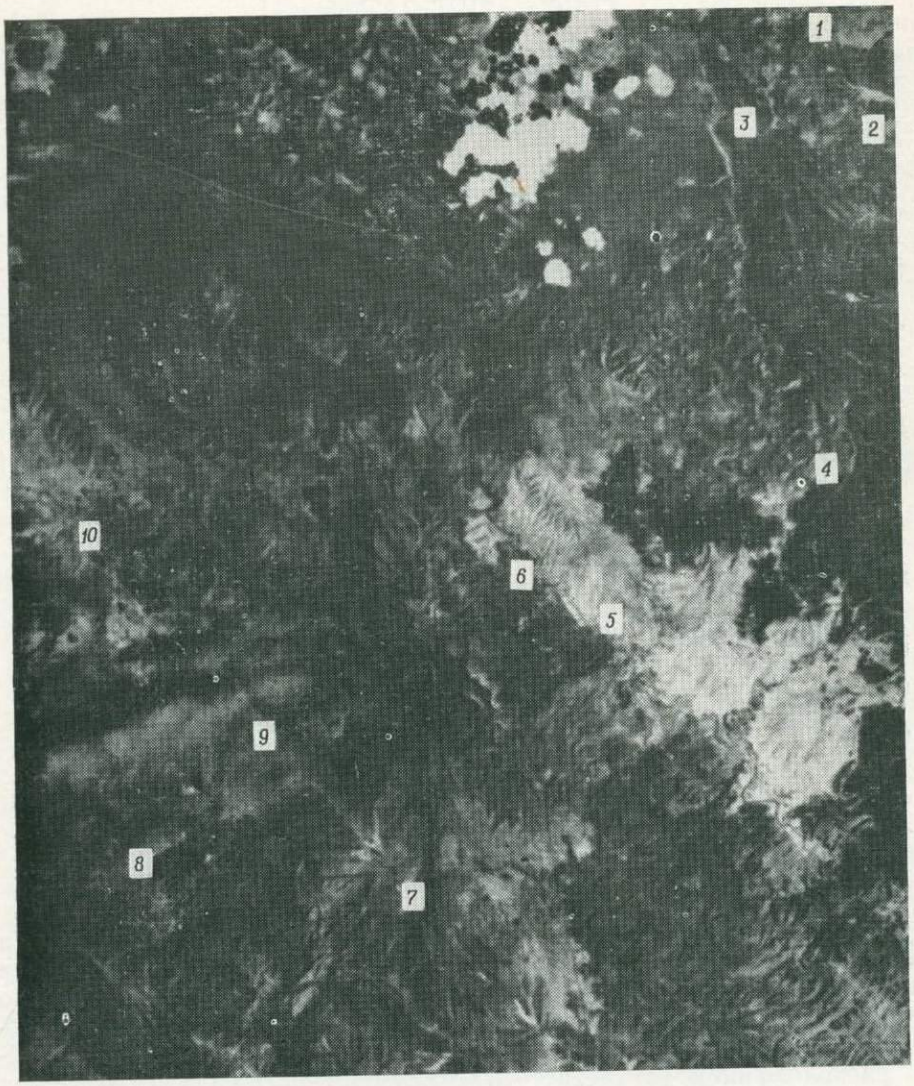
(Калифорнийский технологический институт, Пасадена, Калифорния)

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Цель настоящего исследования, проводившегося в центральной и северо-западной частях штата Аризона, — совместное использование данных компьютерной обработки снимков и полевого геологического картирования для решения некоторых особо интересных задач региональной геологии. В статье рассматриваются результаты работ в районе, расположенном на севере центральной части штата Аризона (фиг. 1); длина его с севера на юг достигает приблизительно 110 км, а ширина равна ~80 км. Сюда входит часть плато Колорадо и примыкающий с юга «горный район». Центральная часть района приурочена к долине реки Верде, а западная охватывает долину реки Чино. На северо-восточной границе района расположен город Флагстафф, а близ его западной границы — город Прескотт.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

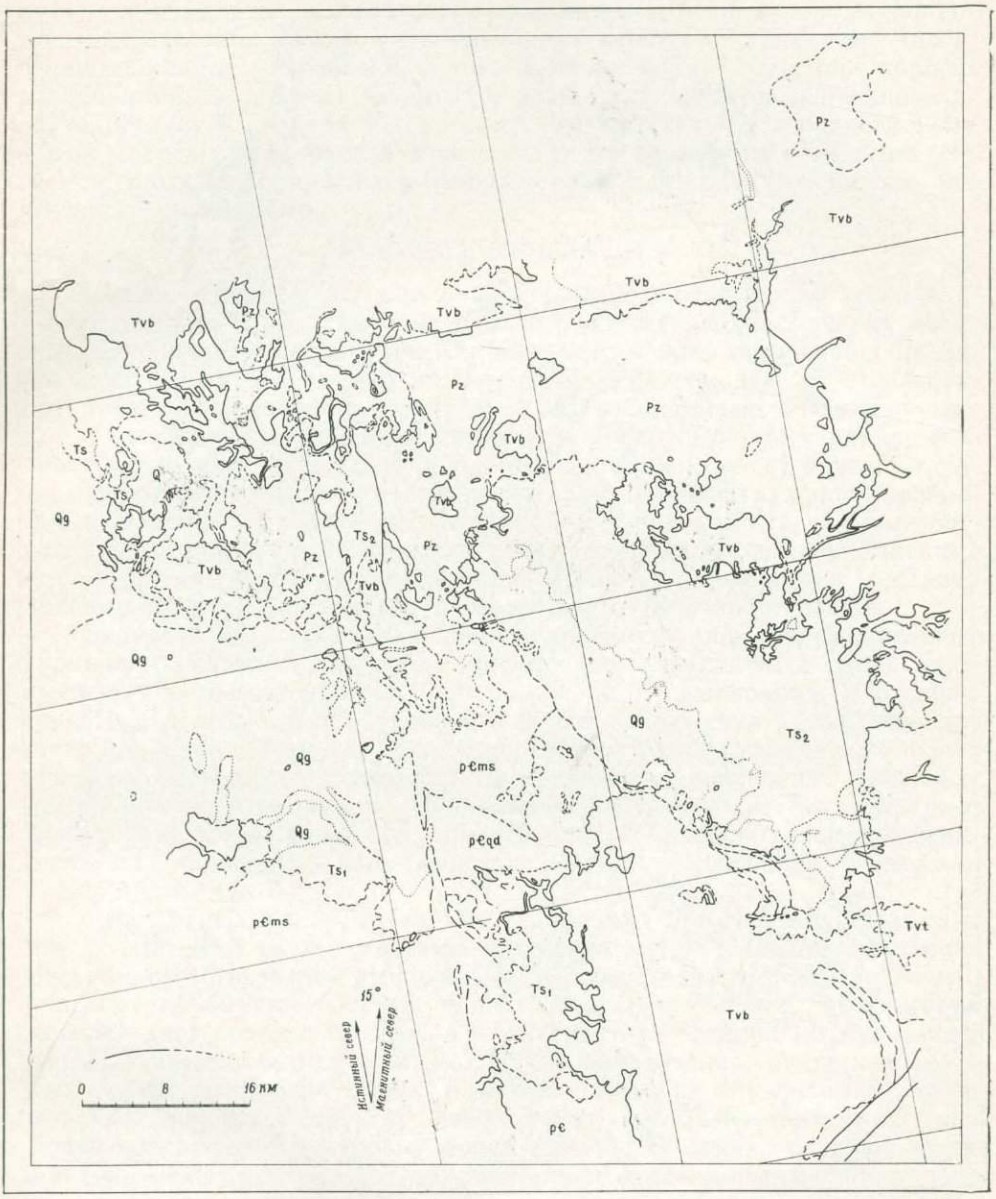
В районе плато Колорадо третичные базальтовые покровы мощностью от 30 до 100—150 м, излившиеся за последние 15 млн. лет из разрозненных центров извержений, перекрывают горизонтально залегающие осадочные породы палеозойского возраста (фиг. 2). Мощность палеозойских отложений достигает 1000 м и более. В районе долины реки Верде слои палеозойских пород воздымаются в южном направлении, и поэтому базальтовые потоки последовательно перекрывают более древние отложения. Палеозойские породы, сохранившиеся в централь-



Фиг. 1. Часть кадра ERTS 1019-17375-4, на которой показан район исследований.
1 — Флагстафф; *2* — оз. Мэри; *3* — Вуди-Маунтин; *4* — Седона; *5* — долина Верде; *6* — Кларкдейл, *7* — Гумбольдт; *8* — Прескотт; *9* — долина Чино; *10* — ранчо Стьюарта.

ной Аризоне, шире всего распространены на юго-западе, а по отношению к картируемой площади — на юге (фиг. 2). В западной и юго-западной частях района третичные базальты перекрывают различные докембрийские изверженные и метаморфические породы. Для большей части этого района имеются детальные геологические карты масштаба 1 : 62 500 и 1 : 48 000 (см. список литературы). Генерализованные геологические подразделения (фиг. 2) и разломы (фиг. 3) приводятся в основном по данным из указанных в конце статьи публикаций.

Недавно были исследованы месторождения нерудных ископаемых: известняков, гипса, вулканического пепла и гравия. Из добываемых рудных полезных ископаемых наибольшее значение имеет медь. Добыча ведется главным образом в районе Сером и на участке к югу от Гумбольдта.

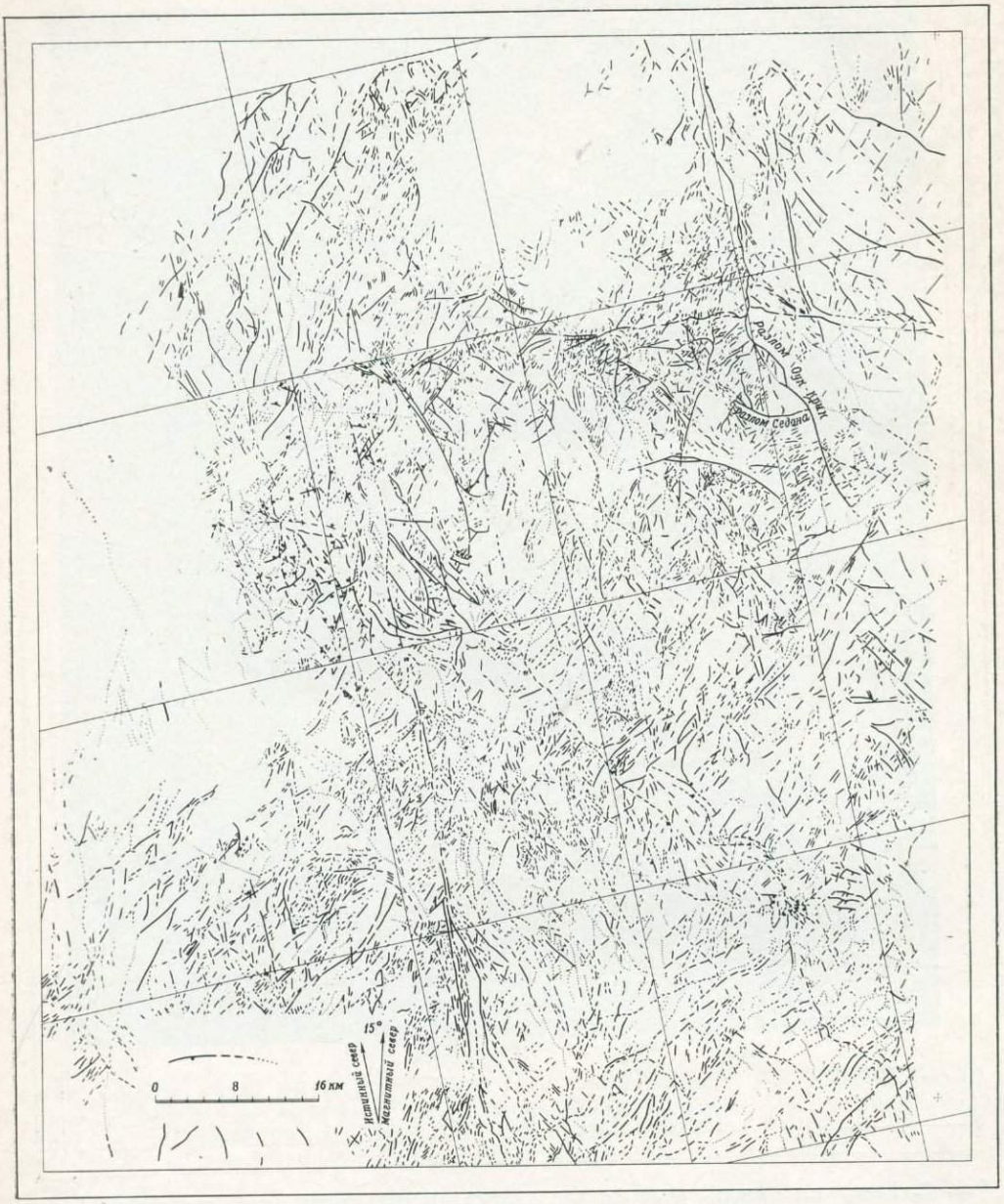


Фиг. 2. Генерализованная геологическая карта, составленная по приведенным в данной статье библиографическим данным.

Четвертичные отложения: Qg — гравий и отложения педимента. *Вулканические породы третичного возраста:* Tvb — базальтовые и андезитовые потоки; Tvt — риолитовые туфы и потоки. *Осадочные породы третичного возраста* (отложения водных потоков и озерные): Ts_2 — более молодые; Ts_1 — более древние. *Палеозой:* Pz — нерасчлененные палеозойские осадочные породы, в том числе кембрийские песчаники Тепите, девонские известняки Мартин, миссисипские известняки Редуолл, пенсильванская и пермская формация Супай, пермские песчаники Коконино и известняки Кайбаб. Докембрий: p€ms — метаморфизованные осадочные и вулканические породы, нерасчлененные; p€qd — кварцевые диориты. Сплошные линии — контакты; пунктирные линии — предполагаемые контакты; точечные линии — скрытые контакты.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные, полученные в результате простого совмещения цветных изображений в зонах 4, 5 и 7, усиленных компьютером для увеличения контрастности, хорошо коррелируются с генерализованной геологической



Фиг. 3. Карта линеаментов района долины Верде.

Более жирные линии — закартированные разломы, остальное — линеаменты, выявленные по снимкам ЕРТС. Сплошные линии — разломы; сплошные линии с точкой — опущенное крыло сброса; пунктирные линии — предполагаемые разломы; точечные линии — скрытые разломы.

картой, приведенной на фиг. 2. Районы, не покрытые сосновыми лесами, дают цветовые оттенки, по которым можно выделить конкретные геологические объекты; при этом растительный покров умеренной высоты, представленный можжевельником, полынью и травой, не влияет на тональность изображений. В районах с редким растительным покровом различаются все крупные геологические подразделения. На участках, где закартированы четвертичные отложения (Qg), невозможно отличить гравий и другие наносы от коренных пород, послуживших источником их

образования. Например, отложения в северной части долины Верде имеют ту же цветовую характеристику, что и коренные породы палеозойской формации Супай, служившие для первых источником сноса. Крупные медные разработки, в том числе отстойные бассейны, хорошо различаются на снимках (вплоть до одного элемента разрешающей характеристики) благодаря более низкой отражательной способности сульфидов меди в инфракрасной зоне спектра по сравнению с видимой. На совмещенных инфракрасных изображениях с искаженным цветом они выглядят ярко-синими.

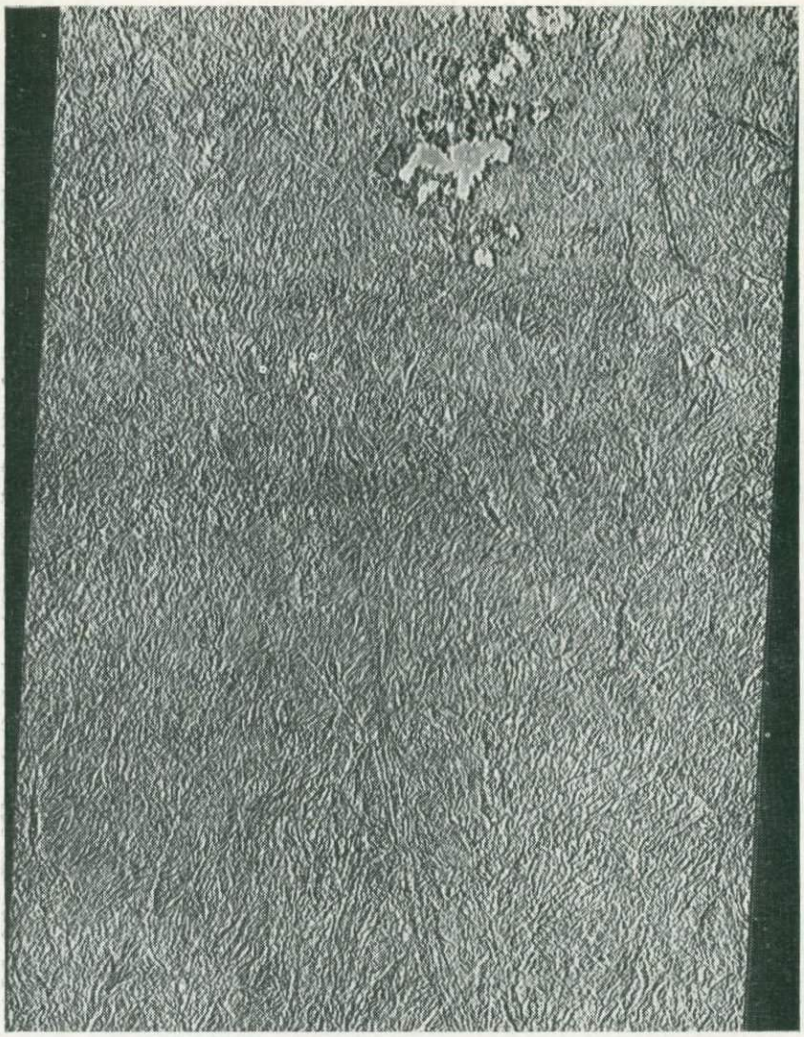
РАЗЛОМЫ И ЛИНЕАМЕНТЫ

Хорошо развитые региональные структуры удивительно четко видны на снимках ЕРТС, особенно в поле развития докембрийских метаморфизованных осадочных и вулканогенных пород, залегающих на небольшой глубине (например, в южной части района, фиг. 2, 3). Основные простирания древних структур — северо-восточные и меридиональные. Им подчинены линейные структуры широтного простирания, расположенные, как правило, на большом расстоянии друг от друга. Структуры и линеаменты северо-западного простирания отражают сравнительно поздние тектонические перестройки и находятся в прямом соответствии с современными формами рельефа в данном регионе. Линейные структуры северо-западной ориентировки обычно различаются хуже, чем линеаменты меридионального и северо-восточного простирания.

Снимки ЕРТС показывают, что большинство центров базальтового вулканизма на плато Колорадо, несомненно, локализуется вдоль линеаментов северо-восточного и меридионального простирания. Это свидетельствует о том, что локализацию центров извержения предопределили докембрийские структуры и что в период третичного вулканизма структурные перестройки происходили по древним направлениям. Например, предполагают, что разлом Оук-Крик перекрывает систему разломов фундамента меридиональной ориентировки и располагается кулисообразно по отношению к зоне разломов Шайлок, проходящей к северу от Гумбольдта.

Линеаменты, закартированные с помощью фотогеологических методов по снимкам ЕРТС, местами подтверждают, а в целом дополняют рисунок известных закартированных разломов. На незакартированных участках линеаменты служат единственным источником информации, которая дает общее представление о характере трещиноватости земной коры. Линеаментами считают различные образования: от сильно развитых систем трещин до слабо развитых, почти не определимых групп коротких линейных структур, которые в совокупности отображают наиболее вероятные структурные черты района. В одних случаях четкие линейные формы отражают напластования в метаморфизованных породах (к югу от Гумбольдта), в других подчеркивают зональность разрывных нарушений (в палеозойских породах близ района Седона). Необходимо отметить, что разрывы северо-западного простирания в районе Седона особенно многочисленны и расположены на близком расстоянии друг от друга; на снимках, сделанных с небольшой высоты, они напоминают структуры надвигов. Однако снимки ЕРТС этого района лучше вскрывают широко развитые линейные элементы северо-восточного и широтного простирания, многие из которых были ранее не известны. Аналогичным образом линеамент меридионального простирания, параллельный разлому Оук-Крик и расположенный к востоку от него, интерпретируется на снимках ЕРТС как элемент той же системы разломов.

Снимки ЕРТС дают также возможность «увидеть» главные черты строения осадочной толщи, скрытой под базальтовым покровом в районе



Фиг. 4. Изображение фиг. 1, усиленное с помощью компьютера.
Горизонтальный фильтр устраняет полосчатость и усиливает мелкие линейные структуры.

Флагстаффа. Хорошо прослеживаются и разрывные нарушения в фундаменте, даже если они скрыты мощными аллювиальными наносами. Примером может служить долина Чино, где прослеживается практически каждая линейная форма от Гумбольдта на северо-запад, до бывшего ранчо Стьюарта.

На фиг. 4 приведен пример направленной фильтрации с целью удаления горизонтальной полосчатости и усиления мелких структур, ориентированных в направлении фильтрации. На достаточно большой площади, охваченной снимком, видны структуры различных ориентировок. Этот прием позволяет привлечь внимание к незначительным структурам, ориентировка которых совпадает с направлением фильтрации. Однако, чтобы исключить возможные ошибки, необходима консультация опытного картографа. Более детальное объяснение различных методов обработки снимков дано в работе [4].

ПРИМЕНЕНИЕ СНИМКОВ ЕРТС ПРИ РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСОВ ГРУНТОВЫХ ВОД

В настоящее время изучается вопрос добычи грунтовых вод из песчаников Коконино на двух участках в окрестностях Флагстаффа: 1) в районе горы Вуди-Маунтин, где уже было пробурено несколько скважин, и 2) в наиболее глубокой части озера Мэри, где была пробурена одна скважина. В этих районах песчаники Коконино, вероятно, являются водонасыщенными, а продуктивность скважин зависит от степени трещиноватости пород. Участки пересечения различно ориентированных систем трещин наиболее перспективны для выбора места заложения скважин, которые планируется пробурить в песчаниках Коконино, а также для бурения глубокой скважины с целью опробования известняков Редуолл, залегающих стратиграфически ниже. Большие масштабы работ, связанных с водоснабжением, потребуют оценки структуры пород на участке протяженностью около 100 км к юго-востоку от Флагстаффа.

Данные о линеаментах в районе разлома Оук-Крик и озера Мэри, показанных на фиг. 3, были уже неофициально переданы властям города Флагстафф и нанесены на рабочую карту (район Вуди-Маунтин).

На фиг. 3 видно, что район, расположенный непосредственно юго-восточнее Вуди-Маунтин, в структурном отношении благоприятен для грунтовых вод. Отчетливые линеаменты северо-западного простирания протягиваются до меридионально ориентированных линеаментов системы разломов Оук-Крик и, возможно, пересекают их. Легко доказать также значение менее крупных линеаментов и их обусловленность региональными разрывными нарушениями. Чтобы подтвердить наличие линеаментов, установленных по снимкам ЕРТС, потребовалось составить карту линеаментов с использованием обычных аэрофотоснимков в аналитической стереопроекции. Для составления карты линеаментов был заказан фотоснимок RB-57, выполненный в масштабе 1 : 62 500 для обширной площади, включающей участки, на которых будет проводиться бурение. Эта карта будет использоваться как для текущего, так и для долговременного планирования разработок, связанных с изучением запасов подземных вод в районе Флагстаффа.

Район Седона. Геологи штата Аризона и отделения гидроресурсов Геологической службы США стремятся выявить новые крупные запасы подземных вод, необходимые быстро развивающемуся району Седона (долина реки Верде). Потенциально водоносными считаются известняки Редуолл, которые подстилают район Седона и клиффы формации Супай, а также известняки Коконино, которые опоясывают район Седона с севера и с востока. В обнажающихся слоях необходимо получить контрольные данные об уровне грунтовых вод относительно маркирующих горизонтов, что в свою очередь даст представление о характере залегания и пространственном положении перспективно водоносных горизонтов. Необходимо также установить характер распространения зон нарушений, что поможет выявить соотношение карстовых или кавернозных пород в нижней части известняков Редуолл. В случае обнаружения таких зон речь может идти о целых подводных реках.

Снимки ЕРТС (фиг. 3) и цветные фотографии RB-57, имеющиеся для района Седона, вскрывают характер трещиноватости этой территории. Несколько четко выраженных линеаментов широтной ориентировки пересекают распространенные системы линеаментов северо-восточного, северо-западного и меридионального простирания. Предполагается, что живописный «залив» на окраине плато Колорадо, где расположен район, образовался в результате интенсивной эрозии, обусловленной более ин-

тенсивной трещиноватостью этого участка по сравнению с соседними. Увеличение трещиноватости связано, вероятно, с наличием четвертой (широтной) системы разрывов. Успешная разведка гидроресурсов будет зависеть также от благоприятного структурного положения водоносных горизонтов и наличия трещинного коллектора. Начаты переговоры с целью проведения комплексных работ, направленных на решение этой проблемы.

Долина Чино, район ранчо Стьюарта. Другой район, представляющий интерес для геологов штата и Отделения гидроресурсов, находится в долине Чино, близ ранчо Стьюарта. Здесь богатые водоносные слои залегают близ поверхности и поэтому пробуренные на воду скважины фонтанируют. Участок выхода и поглощения подземных вод практически не изучен, хотя наличие обнажений докембрийских кварцитов Мазатцаль на соседних невысоких холмах (фиг. 2) свидетельствует о том, что водоносный горизонт (известняки Редуолл) испытывает структурный контроль.

Снимки ЕРТС позволили обнаружить ряд линеаментов в долине Чино, которая расположена к северо-западу от Гумбольдта. Линеаменты прослеживаются до ранчо Стьюарта и за его пределы. Предварительно их можно интерпретировать как отражение структуры коренных пород, скрытых осадками долины. Их наличие свидетельствует о том, что приповерхностные грунтовые воды контролируются наличием залегающей на глубине и не выявленной до сих пор «плотины».

Для разведки гидроресурсов необходимо изучить тектоническое строение района. Следует провести анализ распределения и характера линеаментов, выявленных на снимках ЕРТС и высотных фотографиях. Данные о тектонике, полученные в результате изучения обнаженных и необнаженных структур, должны пролить свет на состояние гидроресурсов в исследуемой части долины Чино.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anderson C. A., Blacet P. M.,* Precambrian Geology of the Northern Bradshaw Mountains, Yavapai County, Arizona, N. S. Geol. Survey Bull. 1336, p. 82, 1972.
2. *Anderson C. A., Blacet P. M., Silver L. T., Stern T. W.,* Revision of Precambrian Stratigraphy in the Prescott-Jerome Area, Yavapai County, Arizona, U. S. Geol. Survey Bull. 1324-C, pp. C1 — C16, 1971.
3. *Anderson C. A., Creasey S. C.,* Geology and Ore Deposits of the Jerome Area, Yavapai County, Arizona, U. S. Geol. Survey Bull. 1230-F, pp. F1 — F19 1958.
4. *Billingsley F. C., Goetz A. F. H.,* Computer Techniques Used for Some Enhancements of Erts Images, ERTS Investigator Symposium March 5—9, Goddard Space Flight Center, 1973.
5. *Huff L. C., Santos E., Raabe R. G.,* Mineral Resources of the Sycamore Canyon Primitive Area, Arizona, U. S. Geol. Survey Bull. 1230-F, pp. F1 — F19, 1966.
6. *Krieger M. H.,* Geology of the Prescott and Paulden Quadrangles, Arizona, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 467, p. 127, 1965.
7. *Lehner R. E.,* Geology of the Clarkdale Quadrangle, Arizona, U. S. Geol. Survey Bull. 1021-N, pp. N511 — N592, 1958.
8. *Twenter R. F., Metzger D. G.,* Geology and Ground Water in Verde Valley — the Mogollon Rim Region, Arizona, U. S. Geol. Survey Bull. 1177, p. 129, 1963.
9. *Wilson E. D., Moore R. T., Cooper J. R.,* Geologic map of Arizona (scale 1 : 500 000), Arizona Bureau of Mines and U. S. Geol. Survey, 1969.

СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИИ НЕВАДЫ С ПОМОЩЬЮ СНИМКОВ ЕРТС-1 (ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СООБЩЕНИЕ)

Л. Роуэн, П. Уэтлауфер
(Геологическая служба США, Вашингтон)

ВВЕДЕНИЕ

Снимки ЕРТС-1 особенно полезны при структурном анализе территорий со сложным геологическим строением, так как позволяют осуществить общий обзор больших площадей. При анализе и описании геологической структуры региона эффективно используются линеаменты, являющиеся индикаторами ослабленных зон земной коры, и округлые формы рельефа, вероятно связанные с интрузивной или вулканической деятельностью. Данные такого рода важны как для понимания геологической эволюции крупных регионов, так и для непосредственных поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

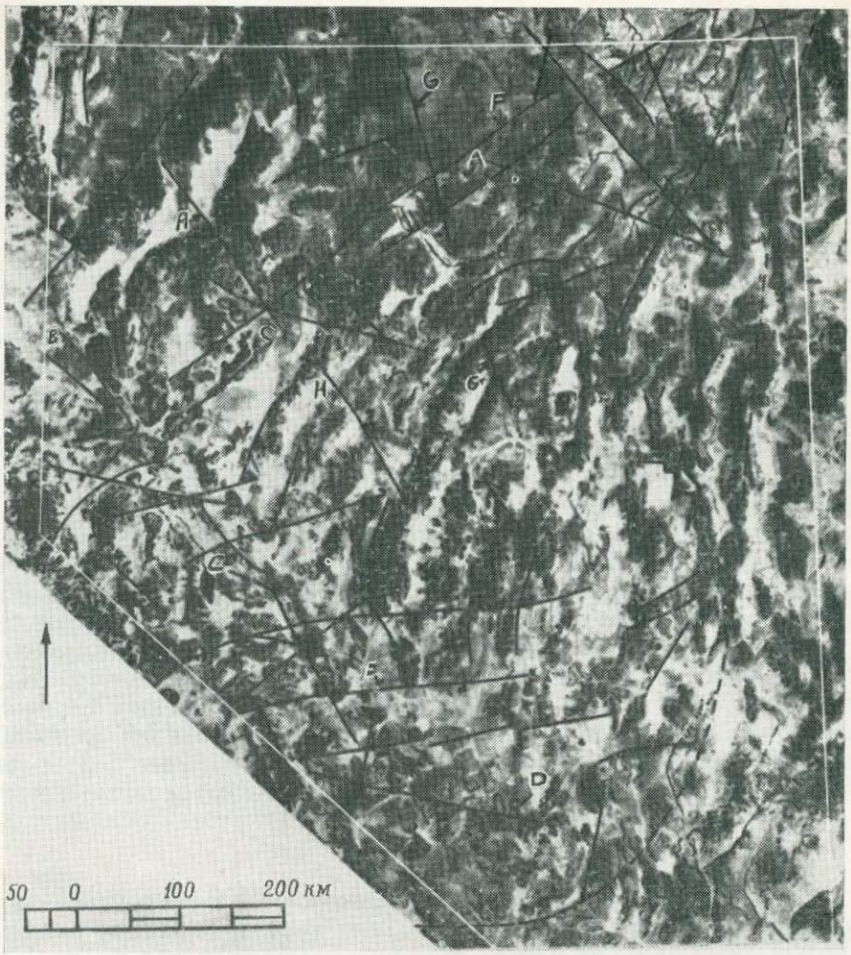
В статье кратко изложены предварительные результаты оценки применимости снимков ЕРТС для исследования одного из районов Невады. Главная цель этого эксперимента (НАСА SR-9648) — развитие методики структурного и радиометрического анализа для геологических исследований с космических аппаратов. Радиометрический анализ до настоящего времени был ограничен визуальным сравнением полос мультиспектрального сканатора (MCC) и применялся в основном с целью выделения площадей для их дальнейшего детального анализа. Поскольку некоторые результаты эксперимента сообщались ранее [1], в данной работе рассматриваются только структурные аспекты эксперимента.

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Рельеф Невады характеризуется северо-северо-восточным до северо-северо-западного направлением горных хребтов и межгорных впадин, разбитых разрывами на блоки. Этот рельеф типичен для физико-географической Провинции бассейнов и хребтов. Во многих местах хребты рассечены и ограничены разломами, которые наряду с линейными литологическими и почвенными зонами и многими линейными элементами гидросети создают чрезвычайно сложную картину линеаментов. Эта картина отражает проявление на поверхности зон дробления и разломов, характеризующих структуру региона, важного в геологическом и экономическом отношениях.

К северу и вдоль юго-западной границы штата ландшафт, характерный для Провинции бассейнов и хребтов, сменяется ландшафтом, типичным для областей развития вулканических пород. На данной площади в формировании рельефа вулканическая деятельность играла основную роль. Вулканические образования обычно слагают округлые или эллиптические формы рельефа, что обусловливает радиальный рисунок гидросети.

В связи с тем что рудные тела приурочены к зонам дробления, разломам и вулканическим центрам, структурные исследования сведены нами к выделению и первичному анализу линеаментов и округлых (и эллиптических) форм рельефа. Обзор опубликованных геологических карт и сообщений показывает, что некоторые из этих структурных образований ранее не были известны. Сходство распределения на территории штата основных линеаментов, округлых форм рельефа и рудников свидетельствует об их генетическом родстве. Следует отметить, что дан-



Фиг. 1. Фотомонтаж снимков МСС-5, полученных в сентябре 1972 г.

Показаны основные линеаменты на исследованной площади в штате Невада. Пунктирная линия — восточная граница площади. Фотомонтаж выполнен Управлением по аэрофотосъемке штата Невада для Невадского университета.

ная работа является предварительной, так как статистический анализ и полевые исследования не проводились, а многие аспекты этого эксперимента еще не были рассмотрены в комплексе и, таким образом, не получили соответствующей оценки.

Линеаменты. Анализ линеаментов на исследуемой площади (фиг. 1) проводился вначале по отдельным снимкам, из которых в дальнейшем был составлен фотомонтаж в масштабе 1 : 1 000 000. В настоящей работе рассматриваются только линеаменты, длина которых превышает 75 км, хотя картировались и линеаменты длиной 2—3 км.

На изученной территории преобладают линеаменты четырех направлений: северо-северо-восточного — северо-северо-западного [1], северо-восточного, северо-западного и восточно-северо-восточного (фиг. 1). Указанные направления линеаментов характерны для всей исследуемой территории, однако распределение линеаментов по плотности и интенсивности в пределах исследуемого района значительно варьирует.

[1] По-видимому, юго-юго-западного. — *Прим. ред.*

В юго-западной части линеаменты, главным образом северо-западного простирания, образуют зону Уолкер-Лейн, протягивающуюся вдоль границы штатов Невада и Калифорния. Линеаменты восточно-северо-восточного простирания практически наблюдаются только на исследованной площади и имеют протяженность более 100 км. В южной части площади система линеаментов северо-восточного простирания имеет второстепенное значение. В противоположность этому на севере описываемого района линеаменты северо-восточного простирания преобладают и образуют зону протяженностью более 500 км. К такому типу образований мы относим линеамент Майдас-Тренч в районе Майдас (штат Невада), который явно связан с узкими депрессиями в рельефе (*A* на фиг. 1). Четвертое преобладающее направление линеаментов (северо-северо-восточное — северо-северо-западное) представлено на исследуемой площади разломами, которые обычно имеют ограниченную длину, но тем не менее местами секут горные хребты. Эти линеаменты распределены более или менее равномерно. Между зоной Уолкер-Лейн и северной границей исследуемого региона, кроме линеаментов четырех основных простираний, выделяются четыре линеамента западно-северо-западной ориентировки, равномерно распределенные по площади (через 200 км).

Известно, что зона Уолкер-Лейн является основной структурой северо-западной ориентировки и представляет собой систему правосторонних сдвигов, протягивающуюся через Южную Неваду от озера Пирамид до Лас-Вегаса [18, 19]. Эта зона впервые была обнаружена [9] по правосторонним смещениям, возникшим в результате землетрясения 20 декабря 1932 года. Биллингсли и Лок [3] назвали ее региональным линеаментом Уолкер-Лайн; впоследствии Лок и др. [12] переименовали ее в линеамент Уолкер-Лейн.

На снимках ЕРТС-1 территории Невады наиболее четко выделяется выраженное в рельефе нарушение, пересекающее южную Неваду; оно отмечается также отчетливым изменением ориентировки горных хребтов. Севернее разрыва хребты имеют северо-северо-западное — северо-северо-восточное [1] простирание, в то время как южнее разрыва хребты преимущественно ориентированы на северо-запад. Можно предположить, что выделенный на снимке линеамент представляет собой зону тектонических разрывов вдоль этого топографического несогласия.

Южнее и юго-западнее озера Пирамид расположены два линеамента северо-западного простирания (*B* на фиг. 1), закартированные [4, 10] как правосторонние сбросо-сдвиги. Мы предполагаем, что эти разрывы являются частью системы Уолкер-Лейн. Продолжающиеся юго-восточнее озера Пирамид два параллельных линеамента северо-западного простирания имеют длину около 65 км и проходят восточнее озера Уолкер (*C* на фиг. 1). Северо-восточный из них получил название разлома Бэтл-Уэллс, а юго-западный — разлома Сода-Спрингс-Велли [14]. Оба разлома являются правосторонними сбросо-сдвигами. Алберс и Стьюарт [2] выделили три северо-западных правосторонних разлома, продолжающихся на юго-восток в округ Эсмеральда. Кроме этого, они выделяют правосторонний разлом (*E* на фиг. 1) восточно-северо-восточного простирания, пересекающий юго-западную часть округа. Мы продолжаем этот линеамент к востоку примерно на 175 км. По данным ряда авторов [8, 9, 12], южнее Голфилда (*D* на фиг. 1) также проходит правосторонний сбросо-сдвиг.

Зона линеамента Майдас-Тренч изучена гораздо хуже по сравнению с зоной Уолкер-Лейн; детально закартированы лишь ее небольшие

[1] По-видимому, юго-юго-восточное. — *Прим. ред.*

участки. Наиболее выразительные участки линеамента Майдас-Тренч представлены линейными депрессиями в рельефе близ Майдаса (*A* на фиг. 1) и расположенным юго-западнее уступом (*F* на фиг. 1). Северо-восточное продолжение этого уступа совпадает с прямолинейными отрезками гидросети в горной области.

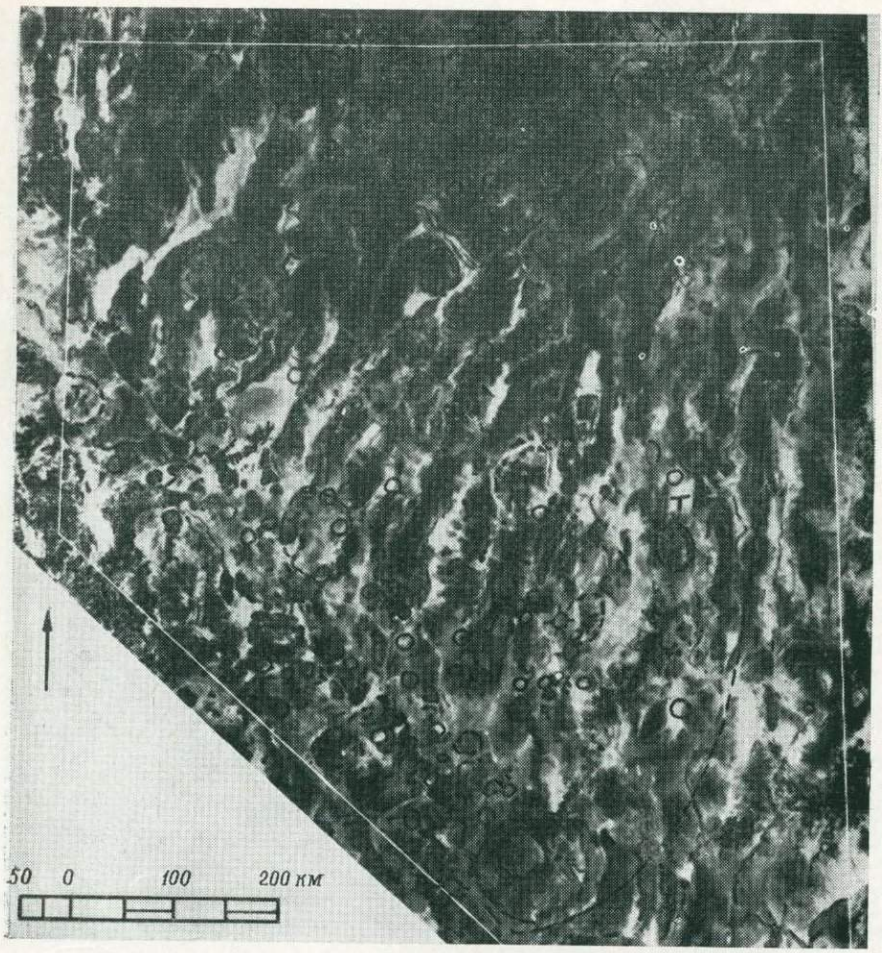
Имеющиеся геологические карты составлены только для относительно небольших участков северо-восточной части территории, пересеченной этим линеаментом. На листе Роуленд одна из главных структурных форм — разлом Трейл-Галч, который ориентирован в направлении СВ 40—70° и, по мнению Бушнела [5], характеризуется правосторонним смещением. На смежном листе Джарбидж в 1964 г. Котс [6] закартировал нормальный разлом восточно-северо-восточного простирания, а Деккер [7] на листе Вулл-Ран описал нормальный разлом восточно-северо-восточного простирания. Таким образом, разломы северо-восточного простирания представляют собой основные тектонические формы этого района, хотя характер тектонических подвижек остается неясным.

К юго-западу линеамент Майдас-Тренч выражен менее отчетливо. Однако линейное расположение глубоких каньонов и хребтов позволяет продолжить эту зону к озеру Пирамид и Карсон-Сити, где она пересекает разлом Уолкер-Лейн. Обзорные геологические карты района юго-западного продолжения линеамента Майдас-Тренч не только не подтверждают, но даже отрицают существование этой структуры. Интенсивность развития, амплитуду и характер смещения разрывов оценить трудно, хотя вдоль продолжения этой зоны картируются разломы северо-восточного и восточно-северо-восточного простирания [20]. Шейв [18] на основании анализа рельефа высказала предположение о наличии важного поперечного линеамента, который соответствует местоположению линеамента Майдас-Тренч. Она полагает, что этот линеамент представляет собой левосторонний сбросо-сдвиг первого порядка.

Упомянутые и другие наблюдаемые линии позволяют предположить, что линеамент Майдас-Тренч отражает крупный глубинный разлом. Северо-восточное продолжение этой структуры за пределы изученной площади соответствует юго-восточной границе района равнин реки Снейк. Продолженная далее структура пересекает зону развития вулканогенных пород Йеллоустонского национального парка. Данные магнитной съемки масштаба 1 : 1 000 000 указывают на общее северо-восточное простирание аномалий интенсивности геомагнитного поля, которые протягиваются от северной части центральной Невады через Йеллоустонский национальный парк и далее (устное сообщение А. Зиц). Линеамент Майдас-Тренч служит юго-восточной границей этой аномалии в северной Неваде и проходит вдоль равнин реки Снейк.

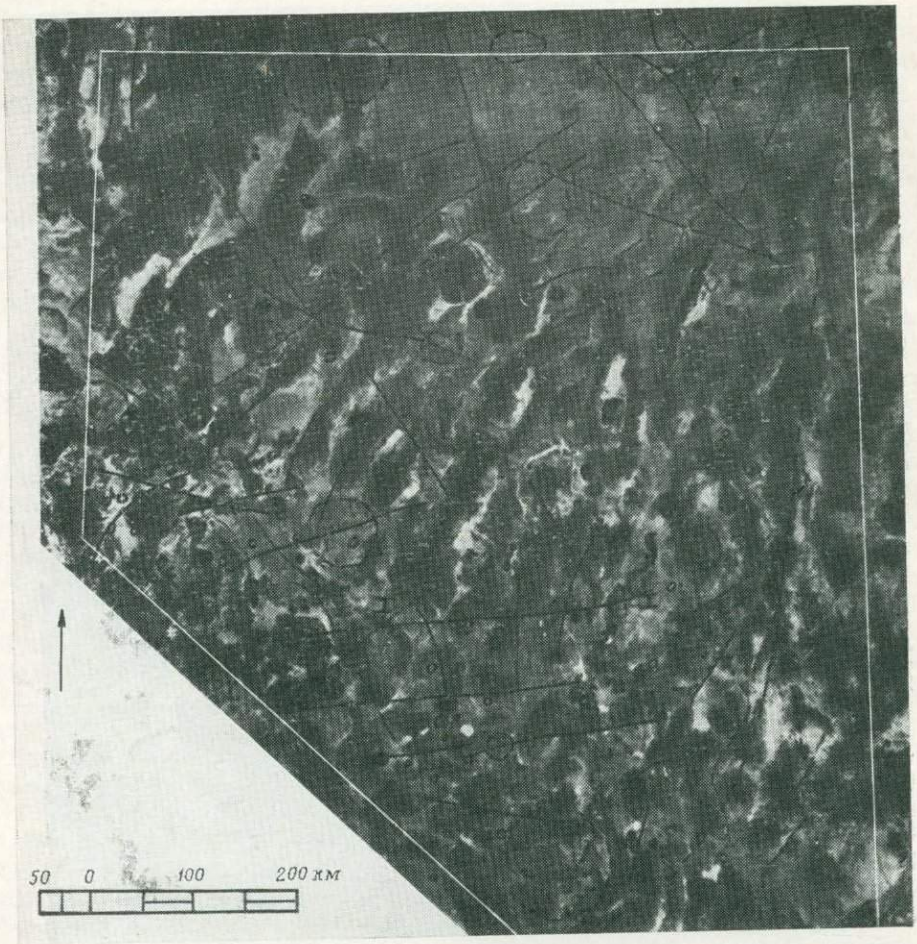
Следует отметить два других линеамента. Так, ряд выраженных в рельефе уступов длиной 10—20 км образует линеамент (*G* на фиг. 1), перпендикулярный линеаменту Майдас-Тренч. Этот линеамент отмечается отчетливой положительной магнитной аномалией длиной приблизительно 200 км [13, 16]. Эта аномалия, видимо, связана с дайками основного состава, интрудировавшими породы вдоль структурно ослабленной зоны. В северо-западной части штата два слегка смещенных относительно друг друга линеамента северо-западного простирания длиной около 200 км (*H* на фиг. 1) пересекают хребты, ориентированные в общем меридионально. Площадь, на которой наблюдается смещение, приблизительно соответствует месту пересечения этих линеаментов с продолжением линеамента Майдас-Тренч.

Округлые формы рельефа. Визуальный анализ ЕРТС-1 позволил выявить 50 округлых или эллиптических форм (фиг. 2), которые предположительно являются центрами вулканической или интрузивной дея-



Фиг. 2. Фотомонтаж снимков ЕРТС-1, полученных в сентябре 1972 г.
Показаны округлые и эллиптические формы рельефа (оконтурены пунктиром) и третичные вулканические центры [1] (оконтурены сплошной линией). Предполагаемые главные центры третичного вулканизма обозначены буквой *Т*.

тельности. Большинство этих образований располагается вдоль линеамента Уолкер-Лейн и в центре северной части штата вдоль границы Провинции бассейнов и хребтов и равнин реки Снейк. При сопоставлении местоположения 78 третичных вулканических центров, закартированных на изучаемой площади Алберсом и Клейнхамплом [1], с местоположением центров, выделенных авторами (фиг. 2), получено хорошее соответствие. Несмотря на то что сравнение затруднено рядом факторов (например, масштаб и выраженность в рельефе вулканических образований), оно полезно для определения местоположения еще не выявленных центров. Тридцать из известных третичных вулканов полностью или частично приурочены к области развития вулканических образований, выделенной на снимках. 21 вулканический центр не соответствует третичным вулканам, выделенным по данным Алберса и Клейнхампла. Из 21 выделенного нами вулканического центра 7 центров, по данным геологического картирования, не сложены третичными изверженными породами, а остальные 14 центров главным образом расположены в области развития третичных отложений (фиг. 2). Судя по диаметру и структур-



Фиг. 3. Фотомонтаж снимков ЕРТС-1, полученных в сентябре 1972 г.
Показаны основные линеаменты Невады, округлые и эллиптические формы рельефа и месторождения серебра, золота, меди, цинка и свинца.

ному взаимоотношению, из 14 выделенных по снимкам вулканических центров третичного возраста восемь являются главными. На фиг. 2 они обозначены буквой *T*.

Структурный контроль третичного вулканизма в зоне линеамента Уолкер-Лейн предположительно подтверждается тем, что вулканы расположены вдоль зоны разлома северо-западного простирания, там, где она пересекается разломами восточно-северо-восточного направления. Линейность расположения вулканических центров вдоль северо-восточной части линеамента Майдас-Тренч достаточно убедительна. Однако многие вулканические центры не обнаруживают явно выраженной связи с основными линеаментами.

Распределение рудных месторождений. В течение многих лет усиленно обсуждается проблема существования на западе США металлогенических поясов. До сих пор имеются значительные расхождения во взглядах относительно важности различных геологических факторов (характер вмещающих пород, характер среды, окружающей месторождение, тектоническая и магматическая активность), влияющих на фор-

мирование месторождений. Однако большинство исследователей подчеркивают важность пространственной и временной связи рудных месторождений с тектонической и магматической активностью. Структурное значение закартированных на исследуемой площади линеаментов пока еще не совсем ясно, но приуроченность промышленных рудных тел к главным линеаментам позволяет говорить об определенных генетических взаимоотношениях между ними.

Распределение промышленных месторождений серебра, золота, меди, свинца и цинка, по обобщенным данным Джерома и Кука [11], на первый взгляд кажется довольно случайным, за исключением их концентрации вдоль зоны Уолкер-Лейн (фиг. 3). Однако сравнение расположения главных линеаментов, выявляющихся на снимке ЕРТС, с местоположением рудников показывает, что несколько значительных месторождений расположено на пересечении линеаментов. Промышленные высокопродуктивные площади встречаются преимущественно вдоль северо-восточной части зоны линеамента Майдас-Тренч, причем концентрируются там, где этот линеамент пересекается линеаментом северо-западного простирания, обозначенным буквой *H* на фиг. 1.

Минерализация в зоне Уолкер-Лейн проявляется вдоль разломов в виде жильных образований в третичных породах [15]. Зона Уолкер-Лейн представлена в основном разрывами с кручением северо-западного простирания, однако сопоставление местоположения рудников и линеаментов, приведенное на фиг. 3, дает достаточно веские основания для предположения об определенной роли в локализации промышленных месторождений линеаментов восточно-северо-восточного простирания. Например, вдоль линеамента, обозначенного на фиг. 3 буквой *I*, расположено 14 рудников; многие другие участки разработок в этой части площади также размещаются вдоль сходно ориентированных линеаментов. Многочисленные вулканические центры тоже расположены вдоль линеамента *I*.

Генетическая связь между третичной вулканической деятельностью и типами рудных месторождений выявляется достаточно явно там, где промышленные месторождения расположены в непосредственной близости от изолированных вулканических центров, выделенных на снимках (фиг. 3). Оценка роли третичного вулканизма более затруднена, когда вулканические центры расположены вдоль линеаментов. Некоторые из этих центров, по-видимому, определяют положение рудных месторождений, в особенности там, где рудники расположены в их пределах. Однако с несколькими центрами, расположенными в линию, промышленные разработки не связаны.

ВЫВОДЫ

Результаты настоящего исследования демонстрируют возможность регионального структурного анализа снимков ЕРТС. Большинство закартированных нами линеаментов ранее не выделялось или было изучено лишь частично. Концентрация известных рудных тел вдоль некоторых линеаментов и в местах их пересечений дает достаточно веские основания для вывода о генетической взаимосвязи рудных тел и линеаментов. Вулканические центры третичного возраста расположены сходным образом, но, вероятно, менее важны для выделения таких месторождений. Для полной оценки этих предварительных результатов необходим тщательный геологический анализ, использующий геофизические, геохимические и структурные методы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Albers J. P., Kleinhampl F. J.,* Spatial relations of mineral deposits to Tertiary volcanic centers in Nevada, in: Geological Survey Research 1970, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 700-C, pp. C1 — C10, 1970.
2. *Albers J. P., Stewart J. H.,* Preliminary geologic map of Esmeralda County, Nevada, U. S. Geol. Survey Mineral. Inv. Field Studies Map MF-298, 1965.
3. *Billingsley P. R., Locke A.,* Structure of ore districts in the continental framework, Am. Inst. Mining Metall. Eng. Trans., **144**, pp. 9—59, 1941.
4. *Bonham H. F.,* Geology and mineral resources of Washoe and Storey Counties, Nevada, Nevada Bur. Mines Bull. 70, p. 140, 1969.
5. *Bushnell K.,* Geology of the Rowland quadrangle, Elko County, Nevada, Nevada Bur. Mines Bull. 67, p. 38, 1967.
6. *Coats R. R.,* Geology of the Jarbidge quadrangle, Nevada — Idaho, U. S. Geol. Survey Bull. 1141-M, p. 24, 1964.
7. *Decker R. W.,* Geology of the Bull. Run quadrangle, Elko County, Nevada, Nevada Bur. Mines Bull. 60, p. 65, 1962.
8. *Ekren E. B., Anderson R. E., Rogers C. L., Noble D. C.,* Geology of the northern Nellis Air Force Bombing and Gunnery Range, Nye County, Nevada, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 651, p. 91, 1971.
9. *Gianella V. P., Callaghan E.,* The earthquake of December 20, 1932, at Cedar Mountain, Nevada, and its bearing on the genesis of Basin and Range structure, Journ. Geology, **42**, № 1, pp. 1—22, 1934.
10. *Gimlett J. I.,* Gravity study of Warm Springs Valley, Washoe County, Nevada, Nevada Bur. Mines, Rept. 15, p. 31, 1967.
11. *Jerome S. E., Cook D. R.,* Relation of some metal mining districts in the western United States to regional tectonic environment and igneous activity, Nevada Bur. Mines Bull. 69, p. 35, 1967.
12. *Locke A., Billingsley P. R., Mayo E. B.,* Sierra Nevada tectonic patterns, Geol. Soc. Am. Bull., **51**, pp. 513—540, 1940.
13. *Mabey D. R.,* Regional gravity and magnetic anomalies in part of Eureka County, Nevada, in: Mining Geophysics, **1**, Case Histories, Tulsa, Okla., Soc. Exploration Geophysicists, pp. 77—83, 1966.
14. *Nielsen R. L.,* Right-lateral strike-slip faulting in the Walker Lane, west-central Nevada, Geol. Soc. America Bull., **76**, pp. 1301—1308, 1965.
15. *Roberts R. J.,* Metallogenic provinces and mineral belts in Nevada, in: AIME Pacific Southwest Mineral Industry Conf., Sparks, Nevada, 1965; Papers, Pt. A, Nevada Bur. Mines Report 13, pt. A, pp. 47—72, 1966.
16. *Robinson E. S.,* Relations between geological structure and aeromagnetic anomalies in central Nevada, Geol. Soc. Am. Bull., **81**, pp. 2045—2060, 1970.
17. *Rowan L. C.,* Iron-absorption analysis for the discrimination of iron-rich zones, USGS ERTS-1 Type 1 Progress Report, 1 Sept. — 31 Oct., 1972, NASA CR 129286, U. S. Dept. Commerce, Natl. Tech. Inf. Service, № E72-10294, p. 3, 1972.
18. *Shawe D. R.,* Strike-slip control of Basin-Range structure indicated by historical faults in western Nevada, Geol. Soc. Am. Bull., **76**, pp. 1361—1378, 1965.
19. *Stewart J. H., Albers J. P., Poole F. G.,* Summary of the regional evidence for right-lateral displacement in the western Great Basin, Geol. Soc. Am. Bull., **79**, pp. 1407—1414, 1968.
20. *Tatlock D. B.,* Preliminary geologic map of Pershing County, Nevada, U. S. Geol. Survey open-file map, scale 1 : 200 000, 1969.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНИМКОВ ЕРТС-1 В КАЧЕСТВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ГЕОТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ЮЖНО-АФРИКАНСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЩИТА

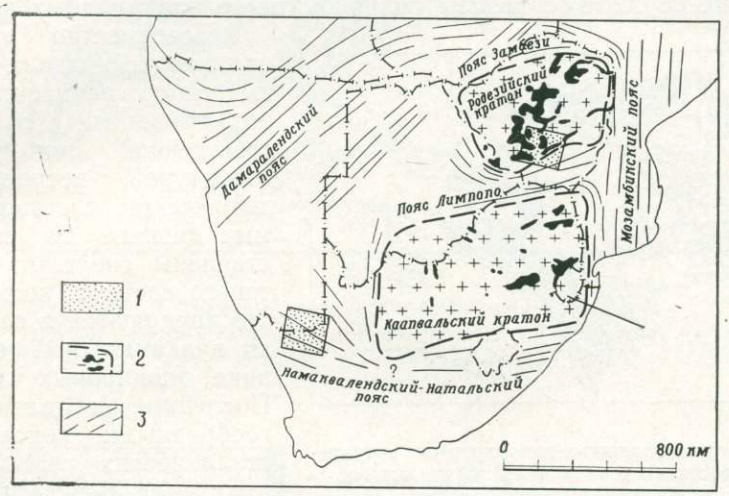
М. Вильжоан, Р. Вильжоан

(Отдел геологических исследований, «Иоганнесбург Консолидейтед Инвестмент Компани», Рандфонтейн, ЮАР)

ВВЕДЕНИЕ

Главная цель настоящего исследования — распознавание и документирование основных тектонических структур Южно-Африканского кристаллического щита. Здесь выделяют две основные геологически раз-

личные области: древнее, так называемое гранито-зеленокаменное кратонное ядро и более молодые, обрамляющие это ядро, метаморфические мобильные пояса. Настоящее исследование заключается в изучении снимков ЕРТС-1, полученных для некоторой части этих образований (фиг. 1). В дальнейшем предполагается расширение исследований с целью более полного прослеживания зоны контакта между кратонным ядром и метаморфическими мобильными поясами, а также для более



Фиг. 1. Южно-Африканский кристаллический щит и его основные геотектонические области и районы, снятые с помощью спутника ЕРТС-1.

1 — положение снимков, полученных с помощью спутника ЕРТС; *2* — древние гранито-зеленокаменные толщи (Каапвальский и Родезийский кратоны); *3* — более молодые метаморфические мобильные пояса. Покров четвертичных отложений снят.

детального изучения внутренних структур и литологии обеих областей. В результате этих исследований предполагается собрать необходимые данные, относящиеся к тектонике плит в докембрии.

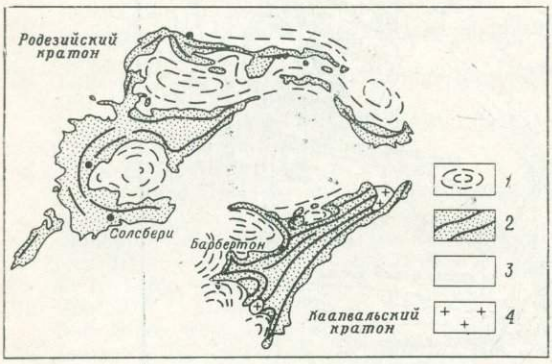
ГРАНИТО-ЗЕЛЕНОКАМЕННЫЕ КРАТОНЫ

Архейские гранито-зеленокаменные серии часто образуют наиболее древние и устойчивые области континентов и в значительной степени сходны на всех хорошо изученных щитах. Наиболее отличительная особенность этих регионов — наличие областей развития вулканогенно-осадочных пород, известных как зеленокаменные пояса; они представляют собой остатки зон широко распространенной в прошлом аккумуляции вулканических и осадочных пород.

Несмотря на значительный возраст, эти пояса не испытали существенного термального метаморфизма, поэтому здесь часто наблюдаются первичные вулканические и осадочные структуры. Большинство поясов подверглось сильной тектонической деформации, которая и объясняет их столь характерную форму. Особый интерес представляют узкие дугообразные зоны развития кристаллических сланцев, ответвляющиеся под различными углами от основного пояса, а также крупные изоклинальные складки, оси которых более или менее параллельны региональному простиранию пояса. Типичный гранито-зеленокаменный комплекс, имеющий, кроме всего прочего, и дугообразные синклинальные ответвляющиеся зоны кристаллических сланцев, показан на фиг. 2.

Самая нижняя вулканическая формация большинства зеленокаменных поясов начинается со свиты ультраосновных и родственных им по-

род, переходящих в кислые туфы и базальты с высоким содержанием магния. Некоторые ультраосновные породы представляют собой подводные перидотитовые лавы, в то время как другие слагают расслоенные интрузивные ультраосновные комплексы. Самые нижние части разреза вулканических пород перекрываются в основном толеитовыми метабазальтами (зеленокаменными породами) с тонкими прослойками кислых лав и кремнистых пород. Сланцы, граувакки и кварциты образуют самые верхние горизонты большинства зеленокаменных поясов.



Фиг. 2. Типичная гранито-зеленокаменная структура с дугообразными зонами зеленокаменных пород, обрамляющими тоналитовые купола.

Видны более молодые секущие граниты, обогащенные калием. Примеры приведены по материалам, полученным при изучении Родезийского и Каапвальского кратонов Южной Африки.

1 — простирания тоналитовых гнейсов; *2* — простирания зеленокаменных поясов; *3* — граниты; *4* — посттектонические калиевые граниты.

Повсеместно выявлено наличие нескольких различных типов гранитоидных пород, каждый со своей собственной тектонической структурой, петрологией и химическим составом. Самые древние из них представлены гнейсами тоналитового состава, которые часто внедряются в самые низы вулканической толщи в виде диапировых куполов. Последние окаймляются дугообразными поясами кристаллических сланцев. Тоналитовые гнейсы часто образуют поднятия в рельефе среди совершенно ровной низменной поверхности.

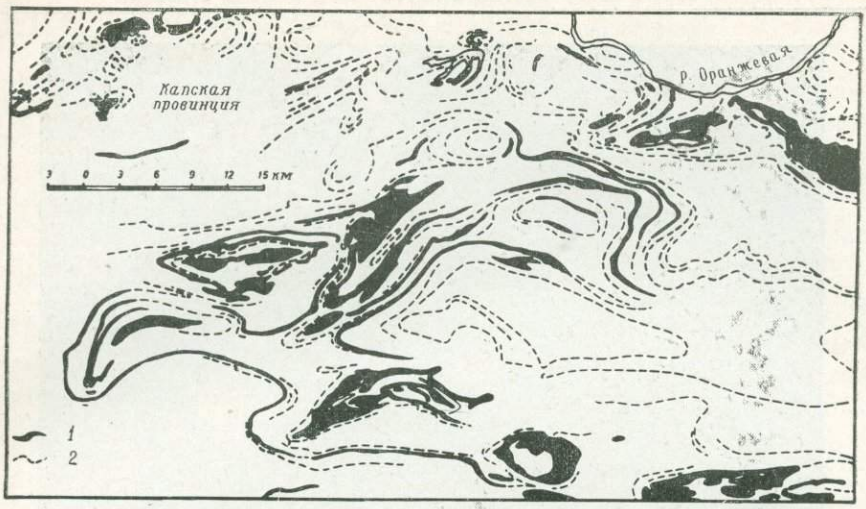
Более молодые гранитные интрузии с богатым содержанием калия четко секут ранее образованные структуры как в древних гнейсах, так и в зеленокаменных поясах. Эти интрузии более устойчивы к эрозии и образуют холмы, покрытые валунами.

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ МОБИЛЬНЫЕ ПОЯСА

Метаморфические мобильные пояса обрамляют и разделяют кратонное ядро. Они представляют собой, как правило, линейные зоны, сложенные в высокой степени гранитизированными метаморфическими тектонитами, которые обнаруживают четкие доказательства течения и складкообразования в пластическом состоянии. В результате последовательной деформации возникли сложные вторичные складки (фиг. 3). Обычны линейные зоны поперечных дислокаций, особенно вдоль краевых зон мобильных поясов, что объясняется повторными тектоническими подвижками по разрывам. Из всего сказанного выше, а также из сравнения фиг. 2 и 3 видно, что основные структуры, типичные для мобильных поясов, значительно отличаются от структур, встречающихся в зеленокаменных поясах, и отражают фундаментальные различия в геотектонике этих двух образований.

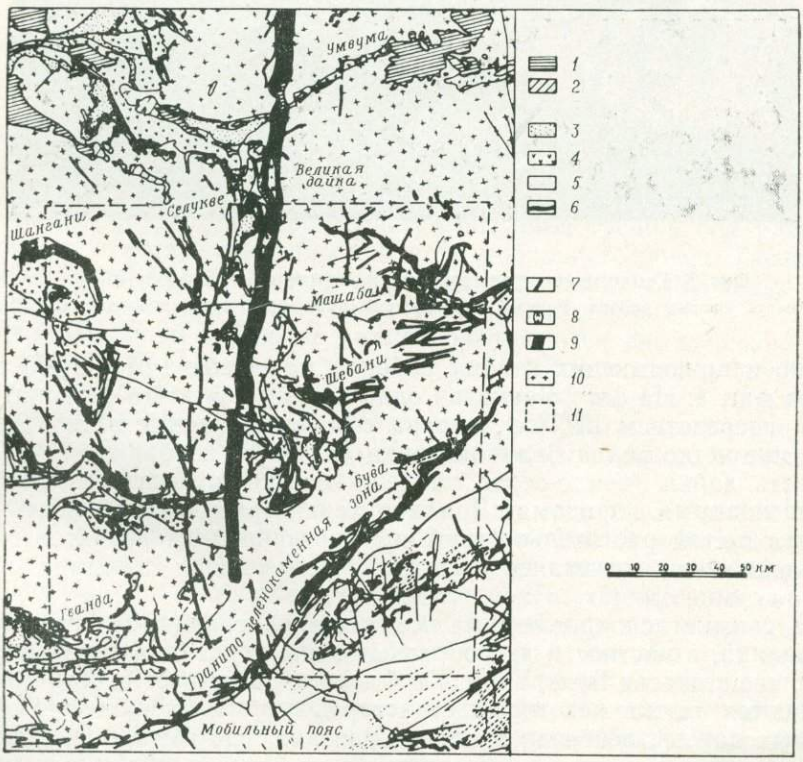
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНИМКОВ ЕРТС-1 ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЩИТА

Гранито-зеленокаменные формации. Снимок ЕРТС-1 1103-07291 покрывает часть южного сектора Родезийского кратона и часть северной краевой зоны мобильного пояса Лимпопо (фиг. 1). Геологическая кар-



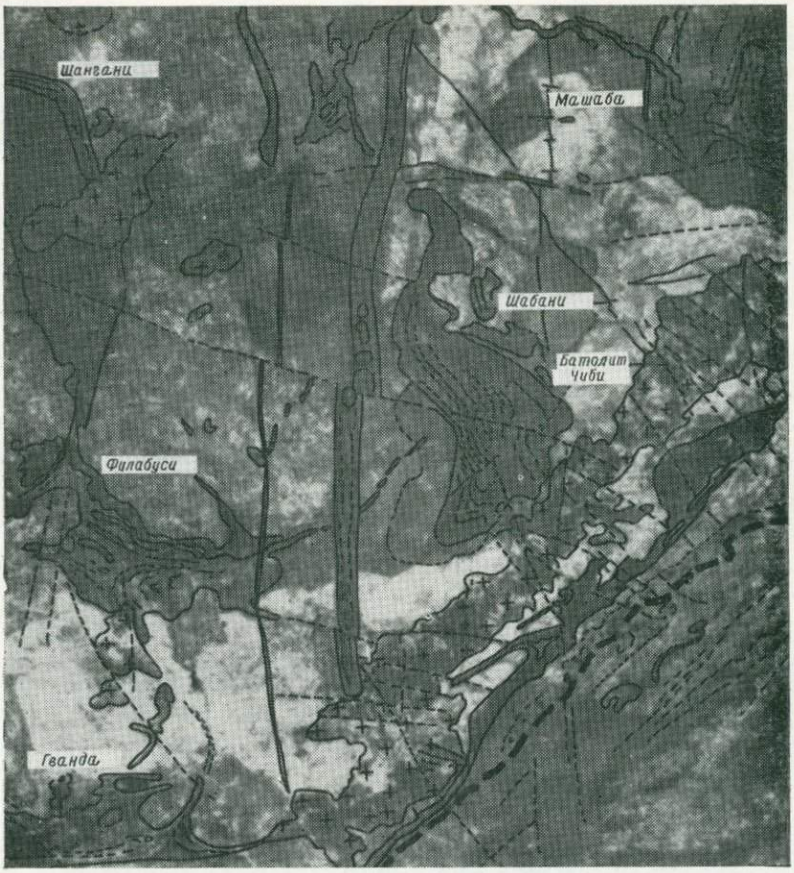
Фиг. 3. Типичный метаморфический мобильный пояс.

Показана сложная складчатая структура высокометаморфизованных пород.
1 — кварциты; *2* — кварц-полевошпатовые породы и ассоциирующие с ними гнейсы.



Фиг. 4. Геологическая карта части Родезийского кратона и северной краевой зоны пояса Лимпопо.

1 — современные пески Калахари; *2* — отложения Карру (пермо-триас). Архей: *3* — метаосадочные породы; *4* — основные до кислых вулканиты; *5* — главным образом кислые пирокласты; *6* — ультраосновные породы. Интрузивные породы различного возраста; *7* — долеритовые дайки; *8* — нориты и габбро Великой дайки; *9* — серпентиниты и пироксениты Великой дайки; *10* — различные граниты; *11* — площадь, покрытая съемкой с ЕРТС-1.



Фиг. 5. Геологическая интерпретация снимка ЕРТС-1103-07251.
Видна часть южного района Родезийского кратона и северная краевая зона пояса Лимпопо.

та этого и прилегающих к нему районов масштаба 1 : 1 000 000 приведена на фиг. 4. На фиг. 5 показан один из снимков этого региона, полученный посредством ЕРТС-1, и дана его геологическая интерпретация. На снимке четко видна Великая дайка (в центре изображения). Основная часть дайки (темно-серая на черно-белых отпечатках) сложена ультраосновными породами. Для нее характерны расслоенность (подчеркнута густой растительностью) и включения линз реликтов габбро, которые особенно отчетливо выявляют внутреннюю структуру образования.

На снимке ясно различимы все признаки гранито-зеленокаменных образований, в частности дугообразные зоны кристаллических сланцев; их наличие в поясах Бува, Гванда и Филабуси вызывает особый интерес. Выделяются также некоторые стратиграфические компоненты зеленокаменных поясов, особенно в поясе Шангани, где самые нижние стратиграфические комплексы, состоящие из прочных расслоенных ультраосновных и полосчатых железорудных пород, образуют устойчивую зону, обрамляющую восточный край пояса. Эта зона четко различается на снимке в виде темно-серой полосы, которая прослеживается к югу, где раздваивается: одна ветвь протягивается к западу, а другая — к юго-востоку, образуя северный край пояса Филабуси. На снимке отчетливо видны ультраосновные комплексы Шабани и Машаба, а также

отвалы пустой породы из асбестовых рудников. О более молодом возрасте интрузивного ультраосновного комплекса Машаба можно судить по наложению его западного края на меридиональные структуры ответвлений зеленокаменного пояса, развитых среди тоналитовых гнейсов.

Во всех случаях различима внутренняя структура (особенно складчатость) и общая стратиграфия зеленокаменных поясов. Кроме того, по отвалам пустой породы в данном районе легко распознаются все крупные рудники.

На снимке выявляются также геотектонические признаки различных кратонных гранитов. Площади с совершенно ровным рельефом, которые на снимке, как правило, выглядят более светлыми, подстилаются тоналитовыми гнейсами. В эти площади вдаются дугообразные языки зеленокаменного пояса, которые, возможно и определяют (или частично определяют) местоположение отдельных диапировых тоналитовых батолитов. В регионе встречаются многочисленные секущие богатые калием гранитные тела, которые благодаря значительной устойчивости и трещиноватости содержат больше подземных вод. В результате здесь развита более пышная растительность, которая особенно четко выделяет такие тела.

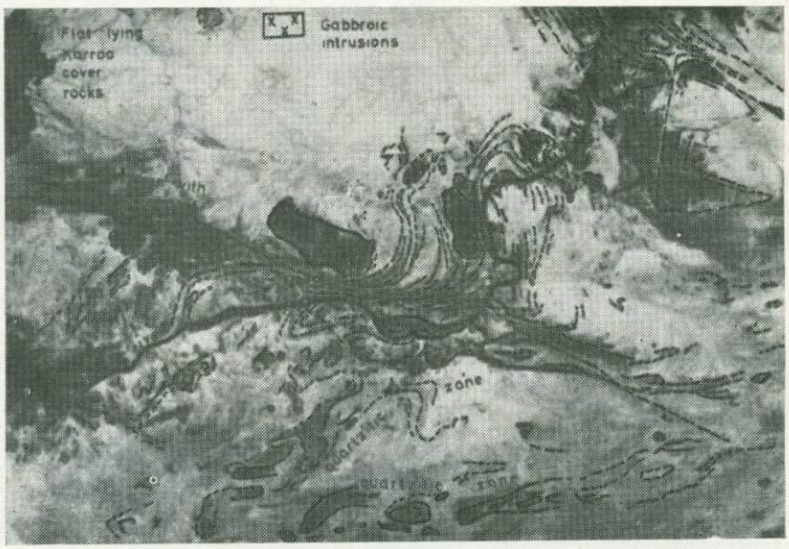
Лучше всего эти интрузии выявляются в поясе Шангани, который резко сечет все стратиграфические образования. Кроме того, в левой части снимка различается несколько сходных, но меньших по размеру образований. Геологическая служба Родезии на этом основании выделила между зеленокаменными поясами Шабани и Бува до сих пор не закартированную удлиненную зону богатых калием гранитных пород. Контакты этого гранитного тела (названного батолитом Чиби), которые, вероятно, соответствуют краевому проявлению метаморфизма мобильного пояса Лимпопо, можно точно закартировать по снимку. Гранитное тело характеризуется хорошо развитой системой трещин или разрывов, нормальных относительно зоны контакта мобильного пояса. Трещиноватость ведет к образованию в рельефе многочисленных сложенных гранитами поднятий, которые окружены густой растительностью.

Кроме Великой дайки, на снимке различаются две узкие, но хорошо очерченные параллельные дочерние дайки. Эти и многие другие дайки, также наблюдаемые на снимке, указывают на тип и простирание разрывов, которые играют в исследуемом районе существенную роль. Все основные разломы широтного простирания отражают, по-видимому, правосторонний сдвиг.

Метаморфические мобильные пояса. Юго-восточный участок снимка 1103-07291 соответствует части северной краевой зоны мобильного пояса Лимпопо. Хотя на снимке отсутствуют признаки складкообразования, отмечающиеся лишь в центральной зоне пояса, характерные для этой части снимка линейная зернистость, дифференциация тональности и отсутствие дугообразных форм свидетельствуют о том, что этот комплекс отличается от гранито-зеленокаменного комплекса на севере.

Строгая линейная ориентировка пластов вдоль северного края пояса обусловлена продольными и поперечными тектоническими подвижками, которые произошли, по-видимому, сразу же после образования синтектонических эвтектоидных гранитных интрузий, одна из которых различается на снимке. В качестве примера типичной складчатой структуры мобильных поясов был изучен снимок ЕРТС 1055-08053, представляющий часть Намаквалендского массива вдоль реки Оранжевой. Лишь для большей части этого района составлено несколько еще не опубликованных карт. Поэтому интерпретация, представленная здесь, целиком базируется на данных снимка ЕРТС (фиг. 6).

Для исследуемого района характерна типичная картина складкообразования в результате течения материала, находящегося в пластическом состоянии, с развитием сложных складчатых структур в виде поперечных складок, «окообразных» складок и т. д. Породы представлены главным образом парагнейсами и в подчиненном количестве амфиболитами, доля которых возрастает к северо-востоку. В южной части района расположен кварцитовый массив, расчлененный на два кряжа; он имеет важное экономическое значение, так как в его пределах открыты крупные рудные месторождения. Простирание и распространение этой зоны,



Фиг. 6. Фрагмент снимка ЕРТС-1 1055—08053 (северо-запад Капской провинции), на котором видна типичная складчатость течения в метаморфическом мобильном поясе.

не известные до сих пор, легко определяются по снимкам ЕРТС благодаря устойчивой природе кварцитовых кряжей. Кроме того, в центральной части снимка выделяется обширная зона дислокаций с правосторонним смещением, о которой прежде ничего не было известно. С этой зоной тесно связаны габбровые интрузии; в одной из них была обнаружена медно-никелевая минерализация. В этой же зоне присутствуют танталсодержащие пегматиты. Таким образом, в целом регион очень перспективен в отношении самых разнообразных месторождений полезных ископаемых.

ВЫВОДЫ

По мнению авторов, большая обзорность, обеспечиваемая снимками ЕРТС, идеально отвечает целям изучения макроструктур геотектонических областей, рассмотренных в данной работе. Снимки ЕРТС-1 помогут лучше распознать и точнее определить зоны контакта этих областей, что имеет большое экономическое значение, так как на Канадском щите вдоль подобных зон контакта были обнаружены богатые никелем основные и ультраосновные породы. К ним приурочены месторождения мобильного пояса Томпсона, расположенного на границе кратона озера Верхнего с мобильным поясом Черчилл, и никелевое оруденение интрузий Садбери, расположенной в пределах зоны контакта фронта мобиль-

ного пояса Гренвилл с гранито-зеленокаменной провинцией озера Верхнего.

Предварительные результаты указывают на необходимость проведения более детальных работ, что послужило основанием для внесения некоторых предложений в программу ЕРТС-Б. Эти предложения предусматривают изучение гранито-зеленокаменных кратонов и окружающих их мобильных поясов с целью более полного понимания тектоники плит в докембрии. Вполне возможно, что мобильные метаморфические пояса представляют собой корневые зоны горных систем и поэтому могут рассматриваться как вероятные зоны субдукции (поддвигания) земной коры в раннем архее. Зеленокаменные пояса часто приравнивают к системам островных дуг и рассматривают в качестве древних зон субдукции. Изучение литологических, гравитационных, магнитных и других особенностей в зоне перехода кратона в мобильный пояс имеет огромное значение для выявления характерных признаков, позволяющих обнаруживать древние трансформные разломы.

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕКТОНИКЕ АЛЬП И АПЕННИН, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКА ЕРТС-1

И. Бодехтель, Б. Ламмерер

(Центр по геофотограмметрии и дистанционным методам исследования, Мюнхен, ФРГ)

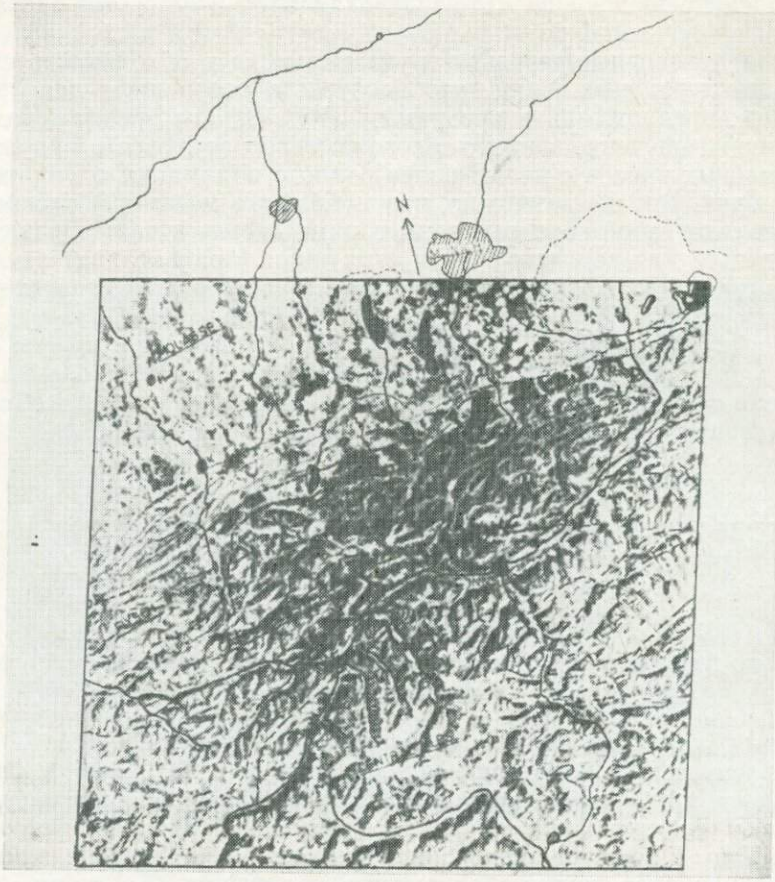
Альпийская область — одна из самых сложных и наиболее изученных на земном шаре; поэтому сравнение данных ЕРТС с фактическим материалом по этому региону представляется особенно интересным. Казалось бы, никакие новые структуры здесь обнаружить уже невозможно.

На фиг. 1 показан рельеф, основные петрографические комплексы, а также наиболее крупные разрывные нарушения (Tollmann, 1969 г). Обращает на себя внимание большое количество пересекающихся под острым углом разрывных нарушений в северной части Известняковых Альп, несколько структур в молассовом комплексе, а также ряд линеаментов в кристаллических породах Центральных Альп, выявленных полевыми геологическими исследованиями.

В то же время изображение на фиг. 2 дает представление о том, насколько большой объем данных можно получить, используя снимки ЕРТС. Здесь видно значительно большее количество структур, чем на любой карте аналогичного масштаба.

При избирательном анализе информации, получаемой со снимка, различаются наиболее крупные линеаменты этого региона, показанные схематично на фиг. 3. Такого рода информацию о разломах, многие из которых продолжаются за пределы региона, раньше получить было невозможно. Только в одном случае европейский геолог проф. Трюмпи, Цюрих, Швейцария, на основании полевых данных высказал предположение о продолжении разломов Лойзах — Цугшпитце в пределы массива Бергель.

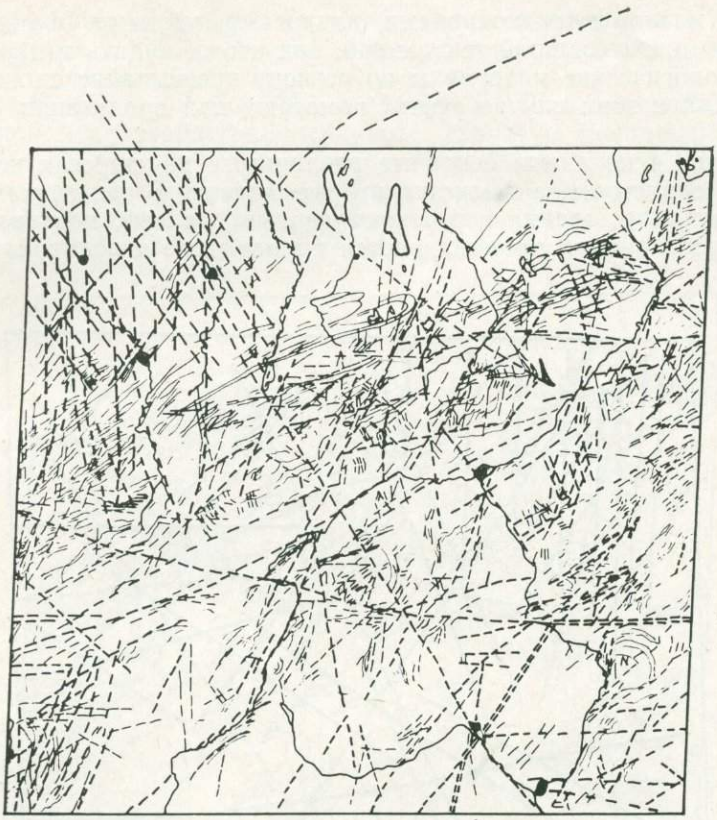
Системы покровов или какие-либо характерные свойства пород, как правило, не вызывают изменений в структуре крупных линеаментов. Это позволяет предположить, что последние образовались во время самой поздней стадии альпийского орогенеза. Убедительным свидетельством сдвиговых деформаций служит парное расположение и прямолинейность линеаментов. На фиг. 3 (квадрат в верхней части схемы) показано предполагаемое направление сдвига при меридиональной ориентировке наи-



Фиг. 1.

большего сжатия. Показанные направления подтверждаются полевыми наблюдениями. Основное направление левосторонних сдвигов — северо-восток — юго-запад; правосторонние сдвиги ориентированы с северо-запада на юго-восток. Это означает, что вся Альпийская система подвергалась действию сил сжатия даже после образования покровов и что наблюдающиеся на отдельных участках сбросо-сдвиги относятся к огромной, имеющей большое протяжение системе сдвигов.

Эта система не ограничивается Альпийской складчатой зоной, а продолжается в пределы прилегающих жестких массивов, где развиты отложения молассового комплекса, представленные молодыми слабо уплотненными осадками. Разломы и небольшие разрывные нарушения здесь обнаруживаются с трудом, в основном по геофизическим данным или в процессе бурения. В то же время на снимках ЕРТС-1 различные линеаменты видны очень четко. Как правило, они обрываются у границ Альпийского орогена или в зоне смятия пород молассового комплекса. Часть региона, где породы молассового комплекса смяты в складки, вероятно, приняла на себя определенную долю общих тектонических напряжений, уменьшив их до величины, при которой вместо пликативных дислокаций или надвигов образовалась система сдвигов. Знание истории тектонического развития и строения молассового комплекса особенно важно при поисках нефти.



Фиг. 2.

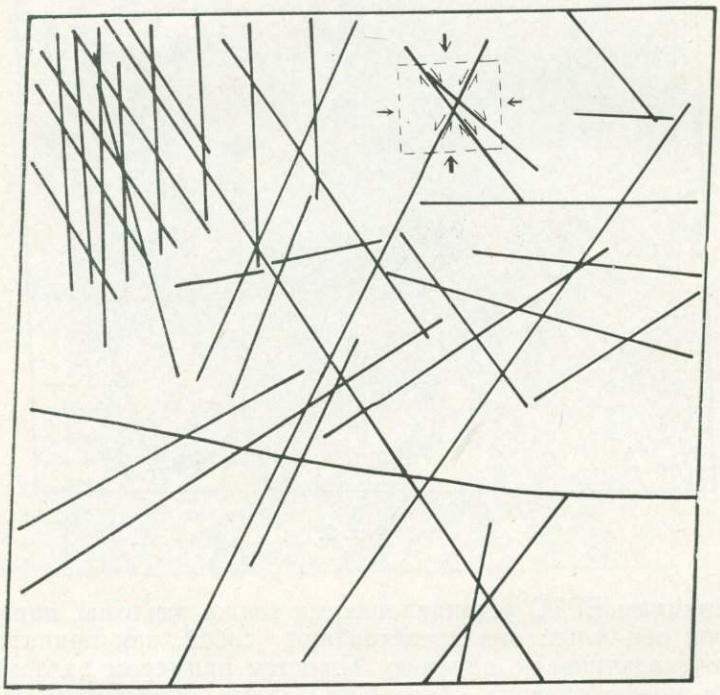
По снимкам ЕРТС устанавливаются также разломы, параллельные продольной оси Альп; они представляют собой, как принято считать, сбросы со смещением по падению. Хорошим примером разломов подобного типа может служить сброс Инн-Велли, отделяющий мезозойские известняки от палеозойских пород или от пород кристаллического комплекса. Таким же образом проявляется Периадриатический шов широтного простирания, который, как известно, «отсекается» на западе поперечным разломом (Юдикарийский линеамент), простирающимся с северо-востока на юго-запад. Однако на снимках ЕРТС-1 улавливается продолжение этого шва, который в виде линеамента протягивается на большое расстояние. Следовательно, данный линеамент, по-видимому, остается активным и в настоящее время. Точные нивелирные измерения проводятся здесь уже несколько лет, и первые результаты подтверждают это предположение.

Имеется несколько причин, объясняющих, почему геологи не обнаруживают некоторые сдвиги и линеаменты. Первая причина кроется в размере линеаментов. Они имеют очень большую протяженность и часто проходят вдоль широких долин, так что масштаб аэрофотоснимков оказывается слишком большим и не позволяет выявить их особенности. Вторая причина состоит в том, что смещения по разлому обычно невелики и их проявление в основном ограничивается чисто механическим изменением в зоне, которая, как правило, плохо обнажена.

И наконец, геологи в Альпах обычно работают в очень сложных районах, где соотношения между соседними петрографическими ком-

плексами маскируются покровами, надвигами, частыми фациальными изменениями и локальной тектоникой, так что обобщить и проанализировать геологические материалы по региону чрезвычайно сложно. Данные ЕРТС-1 в этом случае очень помогают при проведении полевых работ.

На фиг. 4 показаны основные различимые на снимках комплексы пород, их слоистость, а также некоторые морены. В тех случаях, когда плоскости напластования пересекают горный рельеф, нередко, кроме общего простирания, устанавливается направление и величина падения пластов.



Фиг. 3.

В сериях кристаллических пород Центральных Альп на снимках ЕРТС иногда наблюдается сланцеватость, ориентированная параллельно основным водотокам. Имеются новые данные о характере залегания пород молассового комплекса: здесь даже на участке горизонтального залегания слоев различаются плоскости напластования; но эти данные еще не подтверждены наземными методами.

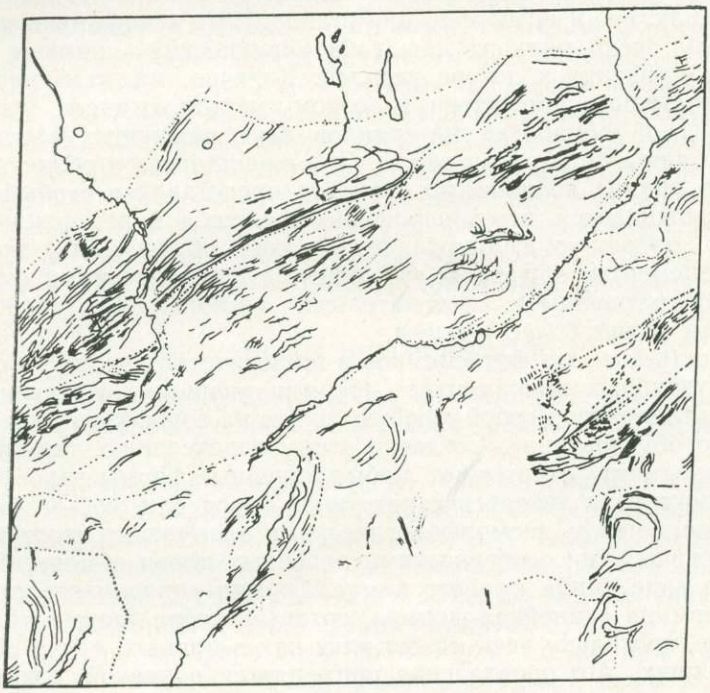
В заключение можно сказать, что данные ЕРТС-1 дают возможность получить новые сведения о геологическом строении даже очень хорошо исследованного района. В частности, выявляются новые линеаменты и разломы, а также устанавливается характер взаимоотношений между разломами. В ряде случаев появляется возможность проверить или уточнить некоторые тектонические гипотезы, а также, что особенно важно, выявить современные активные структуры в молассовом комплексе, представленном сравнительно рыхлыми породами, частично перекрытыми ледниковым материалом.

Снимки ЕРТС-1 дают новые сведения об Альпийской складчатой зоне и прилегающих жестких массивах и способствуют пониманию остальной тектоники Альпийского орогена и его соотношений с молас-

совым прогибом. Данные о строении молассового комплекса исключительно важны с экономической точки зрения при поисках и разведке нефтяных залежей.

Так же как для района Альп, снимки ЕРТС-1 применимы для тектонической характеристики основных структур Апеннинского хребта Италии.

Системы разломов (преимущественно сдвиги), известные ранее на отдельных участках, а также некоторые горстовые структуры впервые оказалось возможным проследить на расстоянии более 100 км. Удалось



Фиг. 4.

также получить новые данные даже о хорошо изученных системах разломов. Были выявлены два основных направления линеаментов. Северо-западное — юго-восточное направление характерно для осей складок и сбросов со смещением по падению, образующих иногда горстовые структуры. В этом же направлении, в частности, ориентирована цепочка вулканов Италии. Другая группа линеаментов имеет широтное простирание и обычно сопровождается сдвигами.

СТРУКТУРНЫЕ ЛИНЕАМЕНТЫ ПОЛУОСТРОВА ГАСПЕ ПО ДАННЫМ СНИМКОВ ЕРТС-1

Р. Стеффенсен

(Консультант по дистанционным методам изучения земных ресурсов, Оттава, Канада)

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья посвящена оценке пригодности снимков ЕРТС-1 для получения данных, способствующих расшифровке региональных геологических особенностей. Анализировались изображения полуостро-

ва Гаспе, Квебек, полученные с помощью мультиспектрального сканирующего устройства, установленного на спутнике ЕРТС. Изучение проводилось для того, чтобы ответить на следующие вопросы: какой тип геологической информации может быть извлечен из снимков ЕРТС? Как эта информация будет соотноситься с традиционными источниками геологических данных? Какое значение имеют интерпретируемые данные для поисков и разведки полезных ископаемых?

АНАЛИЗ ЛИНЕАМЕНТОВ

Геологическая интерпретация космических снимков основана на тех же принципах, что и интерпретация стандартных аэрофотоснимков [12], но с учетом очень мелкого масштаба космических снимков, который неизбежно приводит к потере деталей. Конечно, масштаб наблюдений может значительно изменяться, и поэтому нельзя ожидать, что при фотогеологической обработке материалов двух различных съемок будут получены одни и те же результаты. Для специалиста в области аэрофотогеологии анализ космических снимков представляет особый интерес, поскольку ожидается, что уменьшение масштаба будет «сжимать» информацию, даваемую изображением, таким образом, что крупномасштабные элементы, обычно не связанные с геологическими факторами, будут отфильтрованы и, следовательно, региональные геологические особенности станут более четкими.

Сущность анализа фотоснимков в геологических целях — оконтуривание структурных линеаментов (термин впервые употребил Аллум [1]), представляющих собой «любую линию на аэрофотоснимке, которая структурно обусловлена». Согласно этому определению, термин «структурный линеамент» охватывает любые линейные формы рельефа, растительного покрова и литологических типов пород или любые другие граничные линии между геоморфологическими элементами, которые связаны с геологическими особенностями коренных пород и могут быть прослежены в виде линий на фотоснимке. Термин «линеамент» предпочтительнее термина «линейная форма», который также часто встречается в литературе, поскольку речь может идти как о прямых, так и об искривленных линиях. Это определение применяется в равной степени при геологическом анализе аэрофотографий и космических снимков. Однако методика извлечения информации в этих двух случаях различна.

Обычно при работе с аэрофотоснимками используется стереоскопический эффект, что облегчает выделение и распознавание геоморфологических особенностей территории. Изучение объемной модели рельефа значительно помогает интерпретатору при выделении линий, которые обусловлены геологическими факторами и отличаются от линий, не связанных с геологическими процессами.

Из-за незначительного отношения базиса к высоте съемки стереоскопическая модель местности, полученная при совмещении двух перекрывающихся космических снимков, сделанных со смежных орбит, характеризуется малым вертикальным превышением. Слабый стереоэффект в сочетании с малым размером наблюдаемых форм рельефа ограничивает возможность применения стереоскопического анализа космических снимков. Специалист в области аэрофотогеологии, занимающийся изучением снимков, полученных со спутника ЕРТС, будет успешно работать и без помощи стереоскопа. Выявить различия между линеаментами, обусловленными геологическими процессами, и линеаментами, возникшими в результате процессов иной природы, в том числе и в результате деятельности человека, более трудно. Успех точной идентификации геологических линеаментов будет в значительной степени зависеть от умения и опыта специалиста.

Процедура изучения снимков полуострова Гаспе, полученных со спутника ЕРТС, включала выбор наиболее информативных зон спектра и последующее увеличение отобранных оригиналов до формата, который бы ясно отразил линеаменты и в то же время обеспечил соответствующий масштаб для проведения корреляции космических снимков с геологической и геофизической картами.

Предварительная оценка относительной информационной ценности четырех зон спектра МСС показала, что для территории Канады зона спектра с длиной волны света 700—800 нм обладает наилучшими свойствами для проведения геологических исследований. На снимках, полученных в зоне 6, водные бассейны характеризуются очень темными тонами, растительные массивы — широким спектром фотографических тонов, а между освещенными и затененными участками наблюдаются большие контрасты. Плотность матрицы элементов изображения, составляющая 2400×3400 информационных точек на кадр, полученных посредством МСС, дает возможность увеличить оригиналы снимка приблизительно в 15 раз без заметного ухудшения их качества, как это часто бывает с обычными аэрофотоснимками. Для того чтобы не снизилось качество снимка при увеличении, применяют специальную фотооснову. В этом случае можно получить снимки масштаба 1 : 250 000, что соответствует стандартному масштабу региональных геологических карт Канады.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Объектом детального визуального анализа послужил ряд снимков полуострова Гаспе, полученных 21 сентября 1973 г. на 793-м витке спутника ЕРТС.

Часть территории в западной части (фиг. 1) снимка покрыта облаками, и поэтому итоговая карта линеаментов полуострова Гаспе (фиг. 2) отражает строение главным образом восточной части исследуемой территории. Карта линеаментов (фиг. 2) представляет собой лишь объективное отображение данных без всякой попытки определения значения закартированных линий с точки зрения геологии.

Такая степень интерпретации достигается только при наличии общих сведений о геологии района. Однако, для того чтобы классифицировать эти линии, т. е. для отнесения линеаментов к различным категориям, необходимы хорошее понимание геологии региона, а также некоторая доля априорной аргументации.

Геологическое строение полуострова Гаспе показано на карте, составленной Мак-Герриглом и Скидмором [9] и опубликованной Департаментом национальных ресурсов провинции Квебек. Эта карта послужила основой для построения тектонической схемы полуострова и карты месторождений полезных ископаемых этой территории, составленной Дугасом и др. [3].

Полуостров Гаспе представляет собой пояс развития палеозойских осадочных пород, являющийся частью Аппалачской геосинклинали. Эта область претерпела ряд последовательных фаз деформаций, с которыми было связано внедрение изверженных пород. В зоне слабо метаморфизованных пород, занимающей северную часть полуострова, преобладают кембро-ордовикские граувакки и сланцы, которые были смяты в складки в период таконской орогении. В центральной и южной частях полуострова развиты известняки, сланцы и песчаники ордовикского, силурийского и девонского возрастов, дислоцированные во время более поздних фаз акадской орогении. Местами более древние породы несогласно перекрыты недеформированными породами каменноугольного возраста. Самые крупные тела изверженных пород встречаются на севере полу-



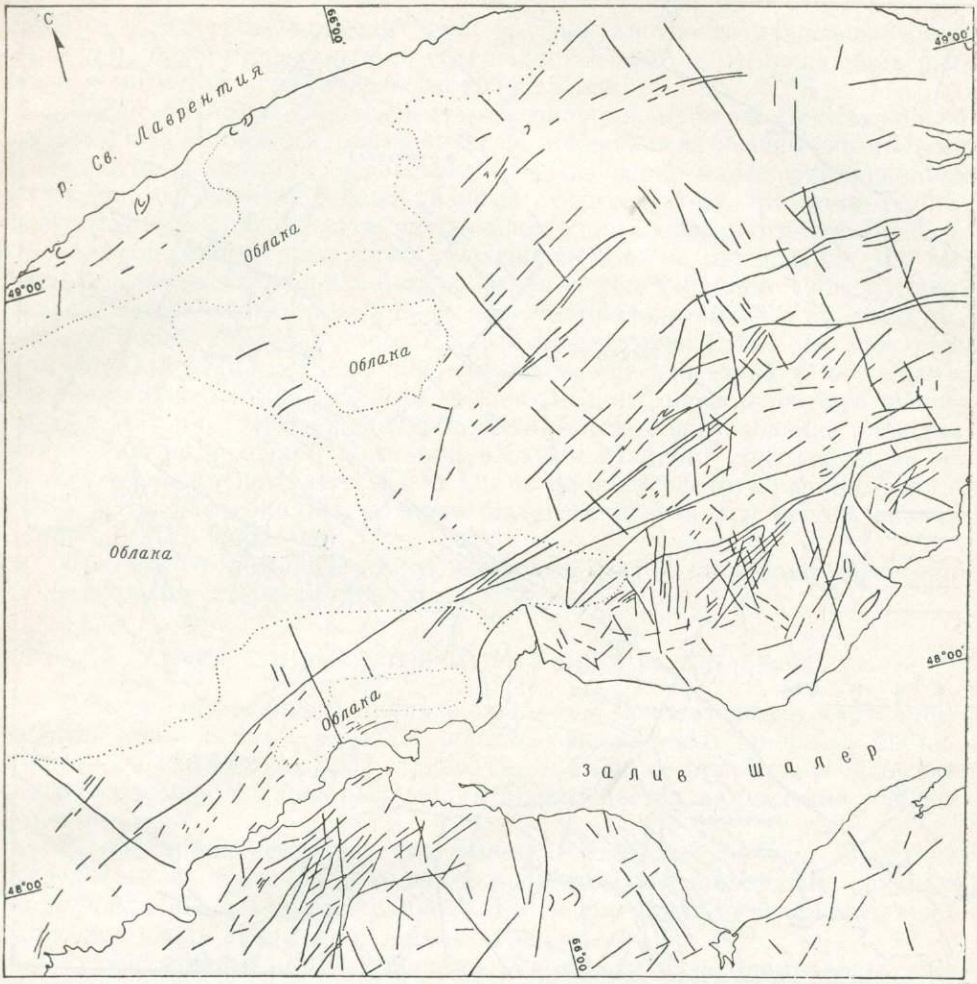
Фиг. 1. Снимок полуострова Гаспе, переданный мультиспектральным сканирующим устройством спутника ЕРТС-1, 793-й виток, кадр 1057-14473, зона 6 (700—800 нм).

острова. Рудная минерализация происходила в течение всех последовательных стадий орогенеза и обычно связана либо с основными, либо с кислыми интрузиями.

С учетом известной ранее геологической информации, вида линеаментов на снимках, их общего взаимоотношения и связи с формами рельефа было проведено разделение структурных линеаментов на пять категорий: морфо-литологические границы, морфо-литологические линеаменты, следы трещин, следы разломов и линеаменты неопределенной природы. Соответствующая карта приведена на фиг. 3.

Морфо-литологические границы. Линеаменты данной категории разделяют площади, которые характеризуются различным рисунком гидросети. Эти площади иногда совершенно отличны и по тону. На интерпретируемом снимке, полученном со спутника ЕРТС, гидросети отвечает более темный тон по сравнению с тоном окружающей местности. Эти отличия связаны как с низкой отражательной способностью воды в руслах, так и с тенью, возникающей в понижениях рельефа.

Сравнение снимков с геологической картой полуострова Гаспе указывает на соответствие между этой категорией линеаментов и границами региональных стратиграфических подразделений.



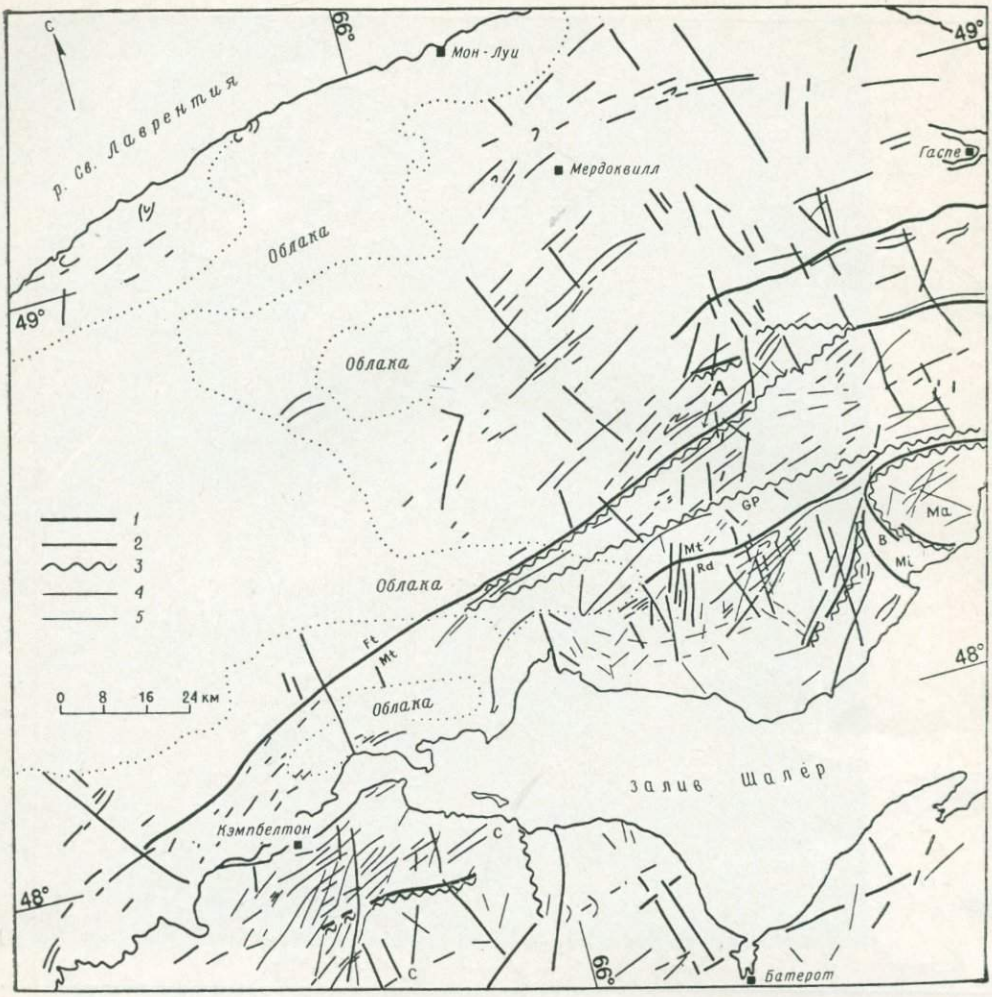
Фиг. 2. Структурные линеаменты полуострова Гаспе, полученные в результате дешифрирования снимков ERTS-1, кадр 1057-14473, зона 6.

Самая протяженная морфо-литологическая граница, показанная на фиг. 3, совпадает с линией раздела известняков и глинистых сланцев группы Матапидия к югу от области развития сланцев и алевролитов группы Фортин.

Морфо-литологическая граница эллиптической формы на востоке района оконтуривает породы свиты Макверо, включающей метаосадочные и метавулканические породы, обрамленные более молодыми палеозойскими отложениями. Резкое изменение характера пород поперек участка границы развития группы Матапидия и всей границы распространения серии Макверо свидетельствует о их возможном контакте по разрыву.

Так же четко группа Матапидия отделена от известняков и алевролитов группы Раудин, развитой на юго-востоке полуострова Гаспе.

Морфо-литологические линеаменты имеют главным образом восточное простирание и отражают характер залегания нижележащих осадочных формаций. Линеаменты этой категории могли бы возникнуть, в частности, за счет силлов, устойчивых против эрозии. Некоторые морфо-литологические линеаменты образуются вследствие влияния пересечения



Фиг. 3. Структурные линеаменты полуострова Гаспе.

GP — разлом Гранд-Пабос; *Mi* — группа Миктау; *Mt* — группа Матапидия; *Ft* — группа Фортин; *Ma* — группа Макверо; *Rd* — группа Раудин. *1* — морфо-литологические границы; *2* — зоны разрывов; *3* — следы разломов; *4* — морфо-литологические линеаменты; *5* — линеаменты неустановленного происхождения.

пластов гидросетью, тогда как другие обусловлены различным эрозионным воздействием на формы рельефа. В некоторых местах замыкание складок проявляется в виде изогнутых контуров.

Следы трещин. Эта категория включает линейные элементы рельефа, проявляющиеся в виде нарушения сплошности земной поверхности и связанные с трещинами, незначительными разрывами и дайками. Их с трудом можно отличить от морфо-литологических линеаментов из-за внешнего сходства на фотоснимках. Разделение этих категорий основано на особенностях пространственного распределения элементов, так как зоны дробления (разрывов и трещиноватости), имеющие сходную ориентировку, обычно группируются в системы. Так, в северо-западной части снимка особенно заметна система трещин с простиранием СЗ 20°, которое перпендикулярно основному простиранию пластов. На юге хорошо выражена система линеаментов меридионального простирания, представляющих собой южную часть разлома Гранд-Пабос. На юго-

востоке полуострова проходит зона высокой плотности разрывов (линеаментов), ориентированных на северо-восток (20°) и пересекающих различные литостратиграфические подразделения.

Следы разломов. На исследуемой площади наблюдается несколько линеаментов, которые характеризуются признаками, обычно связанными с крупными разломами, вследствие чего эти линии классифицировались как разломы. Основной след разлома соответствует разлому Гранд-Пабос, который на снимке, полученном с помощью спутника ЕРТС-1, проявляется в виде шва, легко распознаваемого на протяжении 100 км. Непрерывность следа разлома, особенно в его западной части, удивительна, если сравнить полученные данные с информацией о разломе, известной ранее. На геологической карте полуострова Гаспе [9] этот разлом показан отчасти предположительно в виде изогнутой к югу линии, однако данные ЕРТС свидетельствуют о том, что разлом нанесен неправильно. Автор в 1969 г. провел фотогеологическое исследование площади для геологоразведочной компании «Квебек Майнинг Эксплорейшн» по фотоснимкам масштаба 1 : 35 000. Он не смог проследить разлом Гранд-Пабос с такой точностью, которая была достигнута при использовании данных ЕРТС.

Линеаменты неопределенной природы. К этой категории отнесены линеаменты неустановленного происхождения.

КАРТЫ ЛИНЕАМЕНТОВ И ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Для исчерпывающего анализа проблемы использования карт линеаментов при поисках и разведке полезных ископаемых пришлось бы намного превысить объем этой статьи. Поэтому ниже приводится лишь несколько примеров, иллюстрирующих преимущества применения данных о линеаментах.

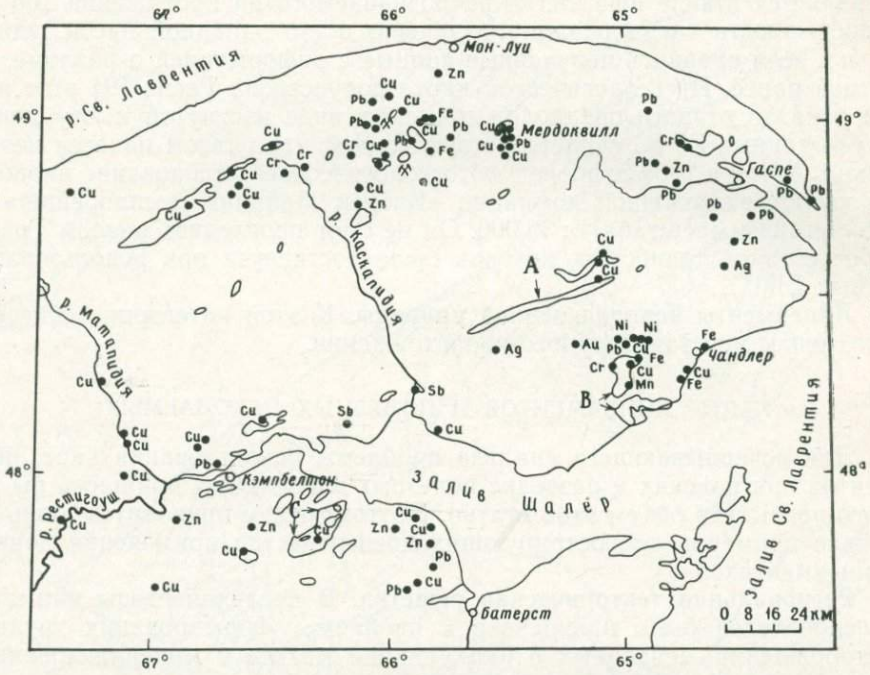
Региональная тектоническая решетка. В последние годы внимание исследователей было привлечено к проблеме формирования рудных месторождений, связанных с циркуляцией магмы и минерализованных растворов вдоль разрывов в земной коре.

Кутина и Фаббри [6] и Кутина [7] отметили закономерность распределения месторождений полезных ископаемых относительно основных морфологических линеаментов и основных систем разрывов. Верц [13] подчеркивал роль, которую играют пересечения региональных линеаментов в локализации интрузий и, следовательно, в региональном распределении рудных месторождений. Дугас и др. [3] высказали мнение, что на полуострове Гаспе, где ранее отмечалась минерализация, связанная с изверженными породами, поперечные региональные разрывы могут объяснить широтное протяжение батолита Мак-Герригл, следовательно, они являются контролирующим фактором как локализации интрузий, так и распределения зон минерализации. По мнению Дугаса, система широтных линейных аэромагнитных аномалий может соответствовать разрывам. Таким образом, изучение данных ЕРТС выявило три меридиональные зоны разрывов, которые оказались дополнительным геологическим обоснованием приведенной выше гипотезы Дугаса и др. Дальнейшие исследования должны более точно определить взаимоотношение между зонами минерализации и разрывными линеаментами.

Выявление площадей для поисковых исследований. Знание генетического типа минерализации в интересующем нас регионе, т. е. на полуострове Гаспе, позволило бы выявить и оценить связь между типами структур, показанных на карте линеаментов, и проявлениями минерализации. Показатели взаимосвязи между линеаментами и минерализацией могут быть получены также путем сравнительного анализа карты

линеаментов и регионального распределения месторождений полезных ископаемых.

Карта распределения месторождений для региона Гаспе показана на фиг. 4, где каждая точка представляет месторождение, а стоящий рядом символ металла указывает на преимущественный тип минерализации. Корреляция между линеаментами и месторождениями может быть установлена эмпирически, путем простого наложения двух карт. Тот же результат может быть достигнут статистическими методами.



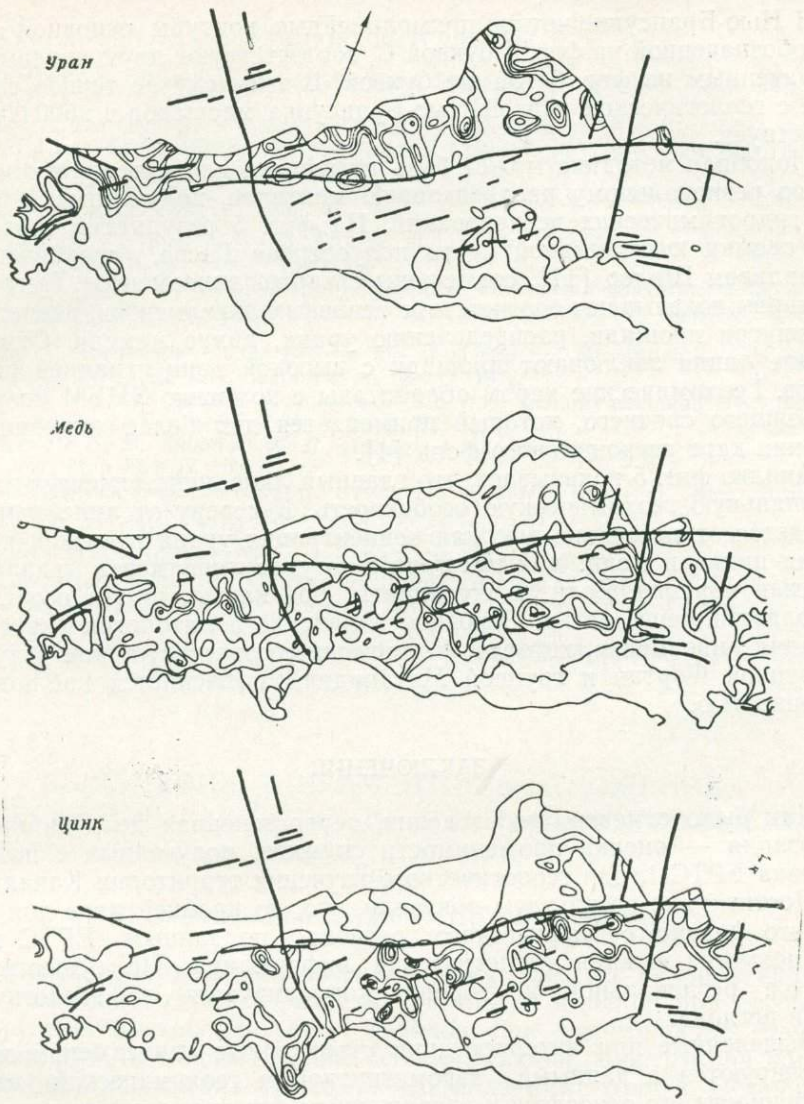
Фиг. 4. Местоположение месторождений полезных ископаемых и контуры основных аэромагнитных аномалий на полуострове Гаспе.

Аномалии *A*, *B* и *C* коррелируются с линеаментами, показанными на фиг. 3.

При изучении данных по полуострову Гаспе очевидная корреляция между линеаментами и минерализацией получена только для разлома Гранд-Пабос, вдоль которого месторождения располагаются линейно. Сходные доказательства, подкрепленные данными о генетических факторах, о местоположении полезных ископаемых и сведениями о структурных линеаментах, могут направить внимание геолога на специфические линеаменты, на пересечение двух линеаментов или на другие особенности, проявляющиеся в ориентации и рисунке линеаментов.

Интерпретация данных геофизических и геохимических исследований. Геофизические и геохимические аэрометоды обычно используются для определения площадей, благоприятных для поставки дальнейших наземных поисковых работ.

Достоверные аэромагнитные аномалии полуострова Гаспе, т. е. оконтуренные площади, где величина магнитного поля больше, чем средняя величина для исследуемого района, показаны на карте месторождений полезных ископаемых (фиг. 4). Данные взяты из опубликованных аэромагнитных карт. Эти аномалии связаны как с различными типами изверженных пород — интрузивными или вулканическими (ту-



Фиг. 5. Корреляция структурных линеаментов с картой распределения металлических полезных ископаемых.

фы и лавы), так и с осадочными породами, богатыми магнетитом. На полуострове Гаспе магнитные аномалии тесно связаны с месторождениями меди.

Корреляция аномалий со структурными линеаментами может быть полезна для обоснования происхождения аномалий.

Линейно вытянутая аэромагнитная аномалия, обозначенная на фиг. 4 буквой *A*, совпадает с большим линеаментом, обозначенным той же буквой на фиг. 3. Можно предположить, что аномалия вызвана основной интрузией, протягивающейся вдоль линеамента, который, следовательно, фиксирует местонахождение разрыва в земной коре.

Буквой *B* на фиг. 4 обозначены две значительные аномалии, общая форма которых находится в соответствии с кривизной двух линеаментов, ограничивающих площадь, обозначенную на фиг. 3 символом *Mi*. Эта площадь сложена вулканическими граувакками группы Миктау.

В Нью-Брансуике четкие прямолинейные контуры основной аномалии, обозначенной на фиг. 4 буквой *С*, соответствуют двум линеаментам, обозначенным на фиг. 3 той же буквой. В этом случае точное соответствие с геологической картой Нью-Брансуика масштаба 1 : 500 000 [10] отсутствует.

Подобная методика может быть применена для интерпретации данных по региональному распределению металлов, полученных в результате гидрохимических исследований. На фиг. 5 результаты геохимической съемки юго-западной части полуострова Гаспе, ограниченной с юга заливом Шалер [11], совмещены с картой линеаментов. Три отдельные карты показывают соответствие основных линеаментов, расположенных внутри площади, распределению урана, цинка и меди. Оконтуривающие линии заключают площади с высокой концентрацией полиметаллов. Геохимические карты обработаны с помощью ЭЦВМ по методу скользящего среднего, который применяется для более надежного построения карт регионального фона [4].

Анализ фиг. 5 показывает, что главный линеамент отмечает важную региональную геохимическую особенность. К северу от линеамента наблюдается относительно высокая концентрация урана и низкая концентрация цинка и меди: для площади к югу от линеамента характерна обратная картина. Если не совмещать обе карты, то эта особенность проявляется менее четко. Основное изменение в литологии вкрест простирания линеамента, который фактически соответствует контакту между группой Фортин и группой Матапидия, объясняется наблюдаемой особенностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как было отмечено во введении, первостепенная цель данного исследования — оценка применимости снимков, полученных с помощью спутника ЕРТС-1, для геологического изучения территории Канады.

Достигнутые результаты показали, что, по крайней мере для Аппалачского физико-географического региона, по данным ЕРТС может быть получена важная геологическая информация. По существу она является региональной и хорошо коррелируется с геологической картой региона.

Выделенные при интерпретации структурные линеаменты хорошо коррелируются с данными аэромагнитной и геохимической съемки; в особенности это относится к протяженным зонам разрывов, из которых ни одна не показана на геологической карте. В районе Гаспе зоны разрывов могут быть связаны с глубоко залегающими ослабленными зонами земной коры и, следовательно, могут быть использованы как индикаторы возможного местоположения интрузий и зон минерализации.

В плане будущих исследований рекомендуется изучение снимков, полученных посредством спутника в разное время в течение года. Сезонные факторы, по-разному влияющие на отдельные типы земного покрова, предоставляют благоприятную возможность для исследования самых различных геологических особенностей территории.

Большая часть выявленных на полуострове Гаспе элементов имеет геоморфологическое происхождение, и, следовательно, снимки, полученные в условиях зимнего сезона, должны обеспечивать большее количество визуальных данных о геологических особенностях. Изучая зимние снимки и сравнивая результаты с данными, полученными при изучении снимков, сделанных в конце лета, можно, видимо, более точно определить природу каждой категории структурных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allum J. A. E.*, Photogeology and Regional Mapping, Pergamon Press, pp. 1—107, p. 1966.
2. *Béland J.*, The Geology of Gaspe, CIM Bulletin, **62**, № 8, pp. 811—818, 1969.
3. *Dugas J., Assad R., Marleau R.*, Metallogenic Concepts in Gaspe, CIM Bull., **62**, № 8, pp. 846—853, 1969.
4. *Gleeson C. F., Martin L.*, Application of Reconnaissance Geochemistry in Gaspe, CIM Bull., **62**, № 8, pp. 819—823, 1969.
5. *Hackman R. J.*, Time, Shadows, Terrain, and Photointerpretation, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 575-B, pp. B155 — B160, 1967.
6. *Kutina J., Fabbri A.*, Relationship of Structural Lineaments and Mineral Occurrences in the Abitibi Area of the Canadian Shield, Geol. Survey of Canada, Paper 71-9, pp. 1—36, 1972.
7. *Kutina J.*, Regularities in the Distribution of Hypogene Mineralization Along Rift Structures, 24th IGC, 1972, Section 4, pp. 65—73, 1972.
8. *Malila W. A.*, Multispectral Techniques for Contrast Enhancement and Discrimination, Photogrammetry Engineering, **34**, № 6, pp. 566—575, 1968.
9. *McGerrigle H. W., Skidmore W. B.*, Geological Map of Gaspé Peninsula, Quebec Dept. Nat. Res., Map № 1642, 1967.
10. New Brunswick Dept. of Natural Resources, Geologic map of New Brunswick, 1 : 500 000, Map № N. R. 1, 1968.
11. Quebec Dept. of Natural Resources, Geochemistry of stream sediments, Map B-1035-A (Copper), Map B-1035-B (Zinc), Map B-1035-H (Uranium), 1971.
12. *Van der Meer Mohr H. E. C.*, Geological Interpretation of Hyperaltitude Photographs from Gemini Spacecraft, Proc. Eleventh Int. Soc. of Photogrametry Congr., Lausanne, pp. 1—6, 1968.
13. *Wertz J. B.*, Monolithic Expressions of Structure as Related to Mineralization, Western Miner, **45**, № 10, pp. 15—25, 1972.

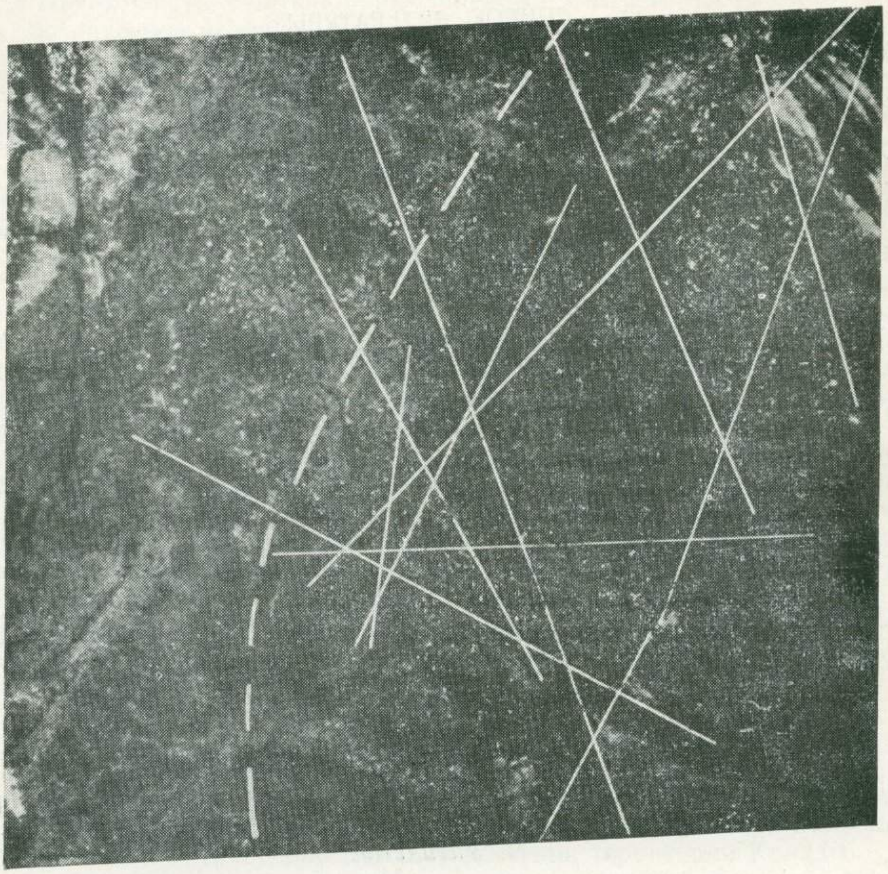
ВЫЯВЛЕНИЕ ЛИНЕАМЕНТОВ В ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИБРЕЖНОЙ РАВНИНЫ ПО ДАННЫМ СНИМКОВ ЕРТС-1

Ч. Уитингтон

(Геологическая служба США, Вашингтон)

Прогнозирование землетрясений приобретает все большее значение в планировании будущего развития страны и особенно при строительстве крупных быстро растущих городов, при строительстве крупных сооружений, в частности атомных электростанций, конструкция которых должна быть рассчитана на возможные подземные толчки. Потенциальную возможность землетрясений необходимо учитывать даже в сравнительно сейсмически спокойных районах, таких, как Атлантическая Прибрежная равнина. К сожалению, для большей части страны возможность возникновения землетрясений изучена сравнительно слабо. Только для районов, в которых землетрясения часто повторяются, таких, как Калифорния, можно установить площадь распространения и магнитуду земных толчков. Однако и здесь местоположение всех активных разломов не известно. Потенциальная сейсмичность Атлантической Прибрежной равнины наименее изучена по сравнению с другими районами страны, и, хотя здесь происходили землетрясения, причем некоторые из них были достаточно сильными и разрушительными, почти ничего не известно ни об их источнике, ни о проявлении вызвавших их разломов на поверхности.

Космическая съемка явилась новым средством изучения сейсмичности страны; она позволила выявить линеаменты, которые, несомненно, служат выражением на поверхности до сих пор незакартированных разломов. В данной статье приводится материал изучения линеаментов, которые выделяются на снимках ЕРТС 1062-15190, сделанных 23 сентяб-



Фиг. 1. Некоторые линеаменты в отложениях Прибрежной равнины близ Вашингтона, различимые на снимках ЕРТС.

По крайней мере часть этих линеаментов является следами разломов на земной поверхности.

ря 1972 г. для района Атлантической Прибрежной равнины близ Вашингтона (фиг. 1).

Снимок охватывает район, расположенный на границе Прибрежной равнины и Пидмонта; на нем видна также Линия водопадов. Два крупных города — Балтимор (вверху над центральной частью снимка) и Вашингтон (влево от центра снимка) — расположены по обе стороны от Линии водопадов. Чесапикский залив, который занимает почти всю правую сторону снимка, расположен полностью в пределах Прибрежной равнины.

Для понимания природы линеаментов, которые видны на поверхности Прибрежной равнины, необходимо кратко описать этот район. Атлантическая Прибрежная равнина, протягивающаяся вдоль побережья от Нью-Джерси на юг до Флориды, сложена слабо консолидированными осадками от мелового до голоценового возраста. Мощность этих отложений постепенно увеличивается от западной границы Прибрежной равнины, где они выклиниваются в районе выходов кристаллических пород провинции Пидмонт, на восток, к побережью Атлантического океана, где отложения достигают мощности 3000 м. Прибрежную равнину обычно рассматривают как район, имеющий простое геологическое строение, в котором развиты широкие региональные структуры, такие,

как сводовое поднятие Кейп-Фир или впадина залива Солсбери. Хотя предполагалось, что в данном районе имеется большое количество мелких структур, на снимке ЕРТС было выявлено лишь несколько таких структур, так как слабо консолидированные однородные осадки маскируют проявление дизъюнктивных нарушений и пликативных структур на поверхности.

На снимках ЕРТС выделяются три типа линеаментов:

1) линеаменты, возникшие в результате деятельности человека, например линии электропередач, шоссейные и железные дороги;

2) линеаменты, представляющие собой единую естественную форму рельефа (пляж, береговая линия и т. п.);

3) линеаменты, которые нельзя причислить ни к одному из указанных выше типов. Они определяются сочетанием факторов, характеризующих рисунок речной сети, береговые линии, растительный покров и другие черты поверхности.

Ниже мы рассмотрим линейные формы только третьего типа. Их трудно установить на снимках до тех пор, пока они не становятся объектом поиска. Рекомендуется держать снимок под углом около 45° и рассматривать его в направлении от края; при этом легче всего устанавливаются линейные формы, совпадающие с направлением взгляда; чтобы выявить другие линеаменты, снимок следует повернуть. Указанные линеаменты лучше всего различаются на снимках зоны 5 или на цветных аддитивных (совмещенных) изображениях, однако предполагается, что при наличии зимних снимков и лучшей обнаженности вдоль небольших водотоков линейные формы можно будет различить также на снимках зон 6 и 7, близких к инфракрасным.

Линеаменты имеют три основных направления: СВ 40° (примерно параллельно Линии водопадов), СЗ 355° и СЗ 325°. Видны также второстепенные линеаменты, имеющие иное простирание. Каждый из выделенных линеаментов прослеживается на расстояние не менее 50 км; многие линеаменты срезаются краем снимка и поэтому их максимальная длина не известна. Некоторые линеаменты, пересекающие линию водопадов и уходящие в район Пидмонта, прослеживаются на расстояние по крайней мере 15 км.

Значительное число выявленных линейных форм является отражением на поверхности зон дизъюнктивных нарушений, которые контролируют положение речной сети и береговых линий. Следы разломов образуют в неконсолидированных осадках ослабленные зоны, которые в наибольшей степени подвергаются эрозии. Ослабленные зоны не всегда легко выявляются в рельефе, на топографических картах или на снимках, сделанных с большой высоты; из-за слабой выраженности и прерывистого характера линейные формы плохо заметны на крупномасштабном, очень детальном снимке. Это как раз тот случай, когда из-за деревьев не видно леса. В результате перенесения данных о линеаментах с космических снимков на карту устанавливается четкая взаимосвязь линеаментов с некоторыми особенностями рельефа, например, такими, как аномалии рисунка речной сети. Фактически, система разломов, описанная Якобином (*Jacobeen F. H., Jr.,* Seismic evidence for high angle reverse faulting in the Coastal Plain of Prince Georges and Charles Counties, Maryland, Md. Geol. Survey Inform. Circular, **13**, p. 21, 1972), впервые была установлена при наблюдении за аномалиями рисунка речной сети.

Изучение снимков ЕРТС позволило установить, что указанная система разломов имеет значительно большую, чем предполагалось ранее, протяженность, превышающую 50 км.

Время образования системы разломов не известно. Якобин смог лишь отметить, что ее формирование было прерывистым и происходило начиная с мелового времени и по крайней мере на протяжении всего раннего миоцена. Однако неконсолидированный, гомогенный характер осадков Прибрежной равнины препятствует обнаружению каких-либо свидетельств тектонических движений до глубины около 60 м.

В районе Прибрежной равнины на протяжении последних 350 лет были зарегистрированы многочисленные землетрясения. Самым сильным было землетрясение в 1886 г., разрушившее Чарлстон, Южная Каролина. Вблизи Ричмонда ощутимые подземные толчки отмечаются примерно каждые 4 года. Почти полное отсутствие на поверхности явных следов дизъюнктивных нарушений, вызванных землетрясениями, создало общее представление о слабом влиянии сейсмической активности на осадки Прибрежной равнины. Если удастся показать, а это вполне вероятно, что большинство (если не все) линеаментов, выявленных по данным ЕРТС, являются следами разломов на поверхности, то это позволит по-новому оценить сейсмичность исследуемого района. Судя по этим проявлениям, движения происходили и сравнительно недавно, что является важным фактором для прогнозирования масштабов будущих дизъюнктивных нарушений на данной территории.

Однако еще многое необходимо сделать для определения масштаба дизъюнктивных дислокаций в районе Прибрежной равнины. Во-первых, следовало бы нанести на карту все линейные формы, различимые на снимках ЕРТС, для всей территории Прибрежной равнины. Следовало бы также определить относительные смещения по разломам. Только после завершения этих исследований можно будет получить детальные и точные сведения о геологической истории территории Прибрежной равнины. Такие результаты смогут дать сведения, имеющие большое значение для дальнейшего планирования экономики и строительства в районе Прибрежной равнины.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СТРУКТУР НА СНИМКАХ, СДЕЛАННЫХ СО СПУТНИКА ЕРТС-1, В РАЙОНЕ БИГ-ХОРН (ШТАТЫ ВАЙОМИНГ И МОНТАНА)

Р. Хоппин

(Геологический факультет Университета штата Айова)

ВВЕДЕНИЕ

Данное исследование проводилось в районе (480×240 км), простирающемся от восточных предгорий гор Блэк-Хилс до западной границы бассейна Биг-Хорн и от южной части Монтаны до южной оконечности бассейна Биг-Хорн. Основная задача заключалась в определении возможности использования снимков со спутника ЕРТС для выявления линеаментов.

Линеаменты играют существенную роль при структурном анализе и решении теоретических вопросов тектоники Кордильер Северной Америки. Линеаменты считают также важными структурами в связи с поисками полезных ископаемых. К сожалению, данные о наличии и размерах линеаментов не всегда легко поддаются оценке, как это полагают некоторые авторы. Если часть линеаментов выделена вполне обоснованно, то местоположение других намечается лишь условно. Для точного опреде-

ления наличия или отсутствия этих крупных структур и установления их характеристик необходимо провести довольно большую работу.

Частично проблема линеаментов (и линейных элементов) сводится к их определению. В основном это, вероятно, обусловлено несоответствием между их описанием и интерпретацией. Предлагаемое здесь определение — чисто описательное. Линеаменты определяются как преимущественно прямолинейные дискордантные структурные линии или зоны большой протяженности (от 150 км и более). На поверхности они проявляются по-разному. Иногда это отдельные крупные разломы или группы разломов, расположенные почти параллельно, или кулисообразные диагональные разломы, пояса складок, крупные моноклинали, границы прилегающих друг к другу блоков, отличающихся строением и литологией. В некоторых случаях в качестве линеаментов выделяют линейные тела изверженных пород или линейные рудные тела. И наконец, линеаменты иногда устанавливаются по линейным гравитационным или магнитным аномалиям, вызванным залегающими на глубине породами.

Линейными элементами называют отдельные прямые линии протяженностью несколько километров или десятков километров. Они обычно выражены в рельефе и чаще всего структурно обусловлены. Линейные элементы могут отражать следы отдельных разломов и осевых частей складок, крутопадающие дайки, прямолинейные отрезки речной сети, квестообразные гребни коренных пород и т. д.

В данной статье рассмотрен лишь один снимок МСС (1085-17294), куда попадает большая часть гор Биг-Хорн и значительная часть бассейна Биг-Хорн. Основное внимание в ней уделено геологическому строению района. Вопросы гляциологии, геоморфологии и растительного покрова в настоящее время изучаются двумя другими исследователями.

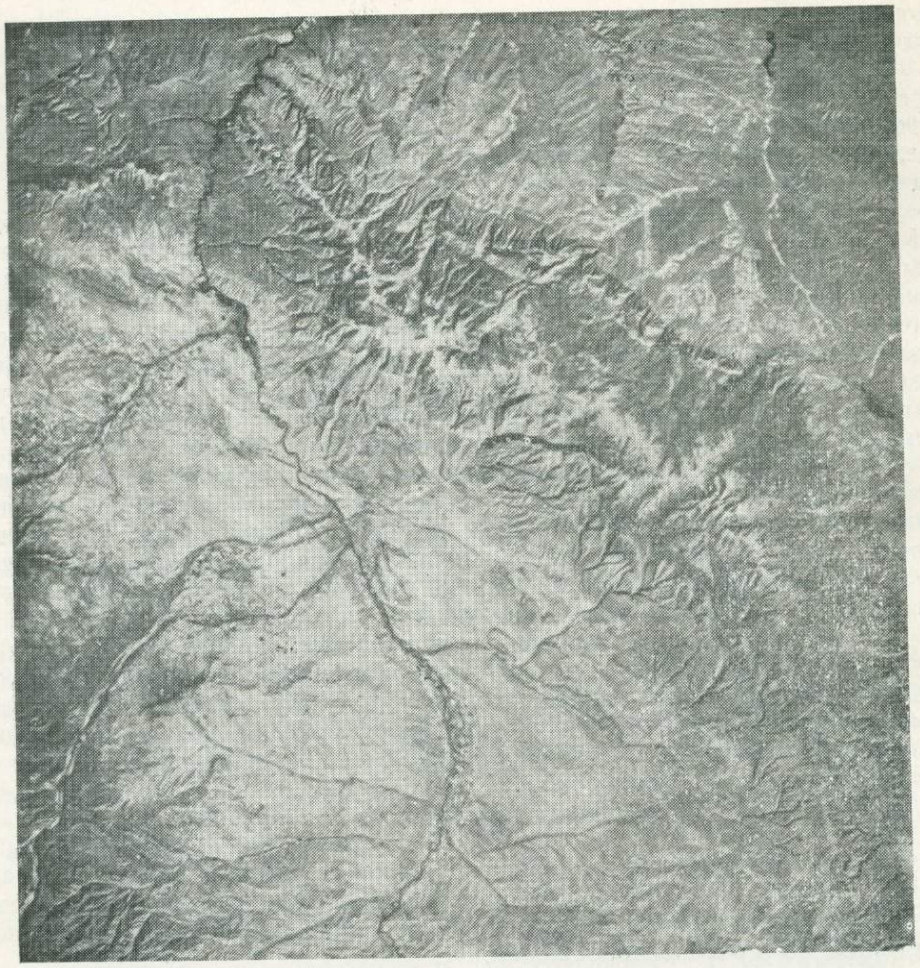
МЕТОД АНАЛИЗА

Геологическое строение данного района отражается главным образом в рельефе и рисунке речной сети. Превышения рельефа наиболее отчетливо видны в зоне 7 (фиг. 1), причем они различаются не только в стерео-, но и в моноизображении.

Увеличенные негативные отпечатки (фиг. 2), сделанные с прозрачных негативов, особенно удобны для использования в качестве прозрачной основы. Как правило, чтобы выделить детали структур на возвышенностях и во впадинах используют две разные экспозиции. Анализ снимков зоны 7 сопровождался сравнением с аналогичными отпечатками зоны 5, где особенно четко видны контрасты в растительном покрове. При просмотре фотографий, сделанных в инфракрасном свете с искаженными цветовыми характеристиками, использовали проектор «I^2 s Addcol», что не оказало значительного влияния на интерпретацию структур, а лишь послужило дополнительным средством анализа литологии и растительного покрова.

Линейные элементы и оси складок нанесены на прозрачную основу фиг. 2. При вычерчивании линейных элементов использовались такие критерии, как перепад высот, рисунок речной сети и различия в тональности на снимках. Следует обратить внимание на то, что линейные элементы концентрируются в основном не во впадинах, а на возвышенностях, где они лучше различимы. На прозрачной основе были показаны также выявленные на снимке складки, очертания возвышенностей и контакт между докембрийскими и палеозойскими породами. На фиг. 3 приведена карта изученных структур.

Наличие значительного количества наземных данных явилось одной из причин выбора этого района для проведения исследований. Однако



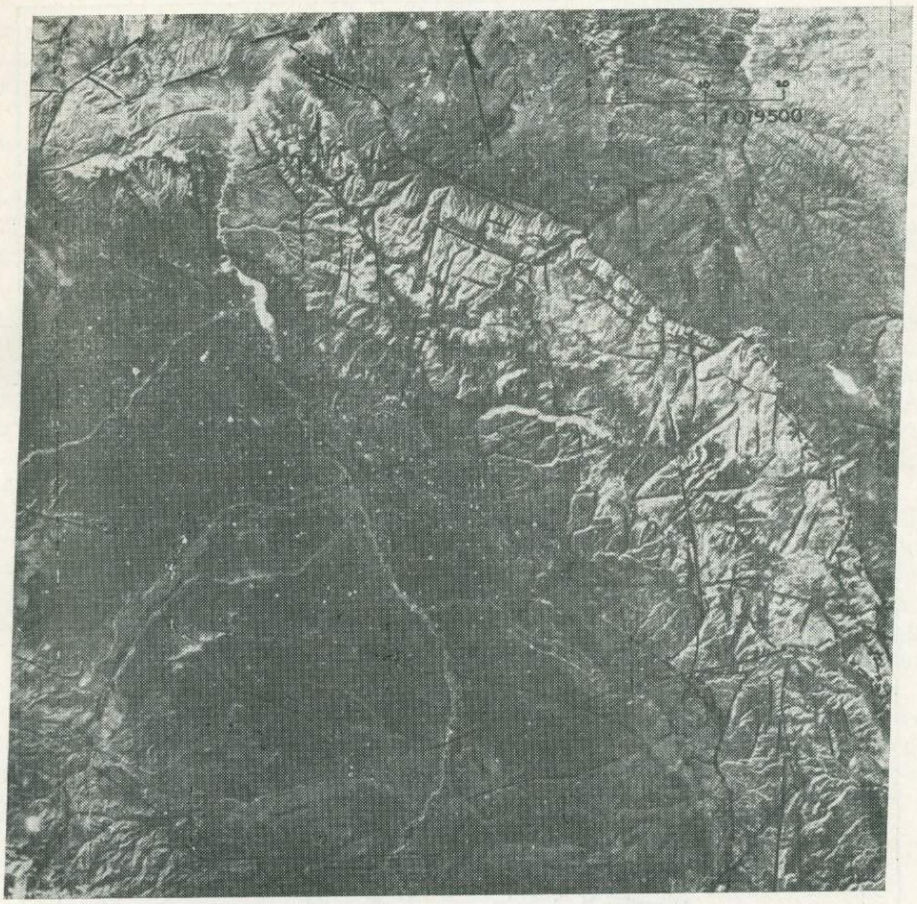
Фиг. 1. Позитивный отпечаток, зона 7 МСС.

при изготовлении прозрачной основы не всегда удавалось остаться объективным и пренебречь уже имеющимися результатами геологических исследований. Для того чтобы сократить количество неизбежных ошибок, изготовление прозрачных основ выполняли исследователи, не знакомые или слабо знакомые с районом. Сравнение показало высокую степень сходимости данных. Основные различия сводились к индивидуальным оценкам спрямленности и минимальной длины линейных элементов. Полагают, что полученная в результате прозрачная основа сделана вполне грамотно и является объективной в первом приближении.

Фотография с U-2 сделана для двух широтных полос: одной на широте Грейбулла и другой на широте Тен-Слипа. Кроме того, получены обычные сверхвысотные фотографии для ключевых участков, выбранных на основе изучения снимков ЕРТС.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рисунок линейных элементов создается несколькими четкими направлениями: восток — запад, северо-северо-восток — юго-юго-запад, северо-восток — юго-запад и северо-запад — юго-восток. Эти направле-

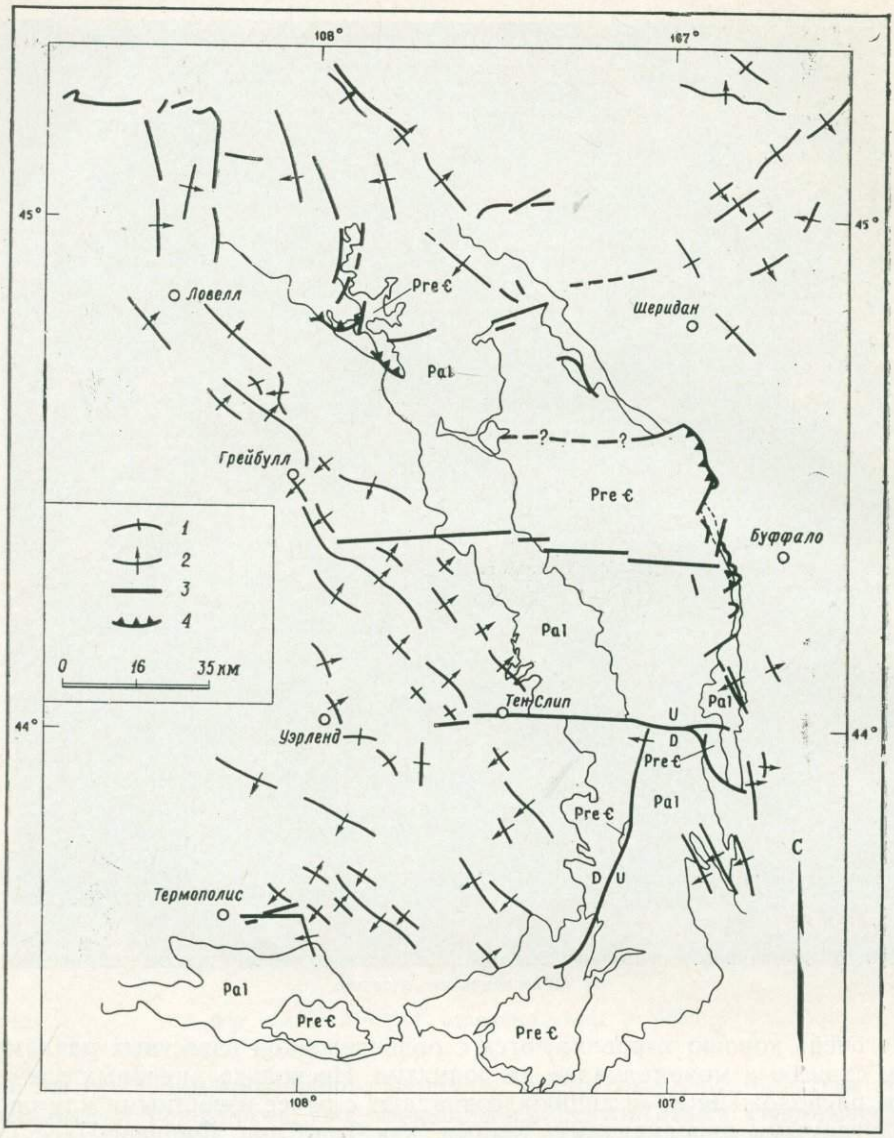


Фиг. 2. Негативный отпечаток, зона 7 МСС, с наложенной прозрачной основой. Объяснения см. в тексте.

ния очень хорошо коррелируются с ориентировкой известных разломов, зон сдвигов и моноклиналей на поднятии. Несколько линейных элементов, расположенных «в линию», совпадают с ранее известными или предполагаемыми линеаментами, такими, как Тен-Слип, Флоренс-Пасс (западнее Буффало) и реки Тонг (к северу и западу от Шеридана). Однако на крыльях складок в более молодых породах они или совсем не проявляются, или проявляются намного хуже, чем в ядре.

Два четких линейных элемента в ядре поднятия ранее не были закартированы. Один из них простирается с севера на юг от покрытой ледником долины Западная Тен-Слип через ядро поднятия до четкого изгиба северо-восточного склона хребта; эти данные требуют проверки в полевых условиях. Другой, имеющий четкое северо-восточное простирание, совпадает с вновь закартированным разломом в докембрийских породах.

С другой стороны, восточное окончание линеамента Тен-Слип не выявляется. Оно не распознается на снимке ЕРТС из-за галечникового и травянистого покрова, однако фиксируется на снимках с U-2 и на высотных фотографиях. Оно также четко устанавливается по глубоким горизонтам в бассейне Биг-Хорн, хотя его следы на поверхности проявляются очень слабо или совсем отсутствуют. Различные нарушения в выхо-



Фиг. 3. Карта, иллюстрирующая расположение известных структур.
1 — симметричные антиклинали; *2* — асимметричные антиклинали; *3* — крутопадающие сбросы; *4* — надвиги.

дах пород на поверхности на западном борту бассейна Биг-Хорн будут изучаться летом. Наличие линеамента, показанного на фиг. 3, не подтверждается снимком ЕРТС, поскольку отвечающий ему разлом у северной оконечности надвига представляет собой, вероятно, локальное разрывное нарушение, приуроченное к надвигу. Линеамент реки Тонг виден очень четко, хотя его наличие долгое время подвергалось сомнению.

Во впадинах линейные элементы различаются значительно хуже. Складки, которые показаны в юго-западном углу прозрачной основы, можно определить благодаря выступающим на поверхность гребням пластов прочных меловых песчаников Меса-Верде. Две складки на севе-

ре фиксируются по прочным пластам верхнепалеозойских карбонатных пород и песчаников. Некоторые складки иногда нельзя расшифровать из-за отсутствия обнажений прочных пород или из-за того, что они скрыты третичными отложениями.

Четко выраженные линейные элементы встречаются в основном вдоль наиболее древних структур, подвергшихся частичной переработке в кайнозое. Их слабая выраженность во впадинах объясняется одной из двух или обеими указанными ниже причинами:

1) мощный чехол, перекрывающий фундамент, замаскировал или уничтожил следы происходивших движений;

2) происходившие движения сконцентрированы на поднятии.

Различия в тональности на снимке бассейна Биг-Хорн объясняются главным образом различиями в литологии коренных пород, так как мощность почвенного покрова здесь невелика, а растительность редкая. Отсутствие различий в тональности при большой густоте речной сети бассейна реки Паудер объясняется более влажным климатом, создающим густой растительный покров, а также увеличением мощности и более широким распространением послепалеоценовых отложений.

До настоящего времени различия в растительном покрове слабо использовались для получения структурной информации. Меловые песчаники, на которых произрастают хвойные леса, дали возможность оконтурить несколько гребней, например, в окрестностях гор Блэк-Хилс. Участки даек шириной больше 45 м в пределах докембрийского ядра отличаются по произрастающей на них растительности от окружающих гнейсов.

На снимке РБВ того же района (1013-17291) детали видны менее четко, чем на снимке МСС. При этом увеличенный и усиленный отпечаток полосы пока является единственным снимком, дающим обобщенную картину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Снимки ЕРТС — МСС, в частности в зоне 7, дают ни с чем не сравнимое общее представление о структурах, которое нельзя получить никаким другим способом. На снимках отчетливо выделяются горные поднятия, а также прилегающие впадины, где послепалеоценовые отложения уничтожены эрозией. Даже в том случае, когда структуры во впадинах маскируются осадочным чехлом, можно провести экстраполяцию краевых частей структур, видимых на снимках. Иными словами, в районах, где геология изучена очень слабо, как в данном случае, можно прогнозировать необнаженные складки и линеаменты и, следовательно, с большей уверенностью проводить разведку структур, перспективных на нефть и другие полезные ископаемые.

Например, вдоль разлома Тен-Слип наблюдается рудная минерализация. Разлом прослеживается на снимке лишь частично, но известно, что он имеет большую протяженность. Снимки позволяют наметить наиболее рациональные маршруты опорных полетов (в данном случае U-2) для отбора необходимых фотографий из имеющихся фотомонтажей и планирования наземных полевых работ. Без снимков, по которым намечают главные объекты изучения и уточняют задачи, пришлось бы буквально идти на ощупь, чтобы подтвердить наличие или отсутствие линеаментов во впадинах.

И наконец, анализ снимков показывает, что сдвиги по линеаментам невелики или вообще отсутствуют. Такой вывод противоречит предположению о крупномасштабных горизонтальных движениях по линеаментам в Кордильерах.

ИЗУЧЕНИЕ СНИМКОВ ЕРТС-1 ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ И ДЛЯ ФОТОГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ В ШТАТЕ МОНТАНА (ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СООБЩЕНИЕ)

Р. Вейдман, Д. Олт, Р. Флуд мл., К. Холи, Л. Уоквиц

(Университет штата Монтана)

Р. Берг, У. Джонс

(Горнорудное и геологическое управление штата Монтана)

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Карта линеаментов западной Монтаны (фиг. 1) была построена на прозрачной основе с использованием фотомонтажа зоны 7, полученного непосредственно с 23-сантиметровых отпечатков, представленных НАСА. Большинство закартированных линеаментов, вероятно, является следами разломов в рельефе (уступы, прямые каньоны); некоторые линеаменты соответствуют выходам крутопадающих пластов коренных пород. Длина линеаментов колеблется от 8 до 130 км. Было проведено сопоставление карты линеаментов с геологической картой штата Монтана масштаба 1 : 500 000 [5] и новыми геологическими картами эталонных участков, занимающих в целом около $^1/_4$ всей исследуемой площади.

Более 50 линеаментов оказались разломами, которые ранее не были известны и требуют изучения. Около 130 линеаментов образуют диагональные системы, причем линеаменты северо-восточной ориентировки встречаются гораздо чаще, чем это предполагалось, а северо-западной — значительно реже. Возможно, здесь сказывается влияние теневого усиления линеаментов на снимках, способствующего выявлению всех направлений, кроме северо-западного.

На карте линеаментов показано большинство крупных сбросов. К востоку и северу от озера Флатхед такие сбросы проявляются в виде уступов. В юго-западной Монтане линеаменты фиксируют границы между горными массивами и межгорными впадинами. Особенно хорошими примерами таких линеаментов служат разломы, ограничивающие с северо-востока и северо-запада хребет Руби, с запада — горы Тобакко, а также западные склоны хребтов Мадисон, Галлатин и Бриджер. Линеаменты, выявленные по снимкам ЕРТС в юго-западной Монтане, хорошо коррелируются с разломами, закартированными геофизическими методами [2].

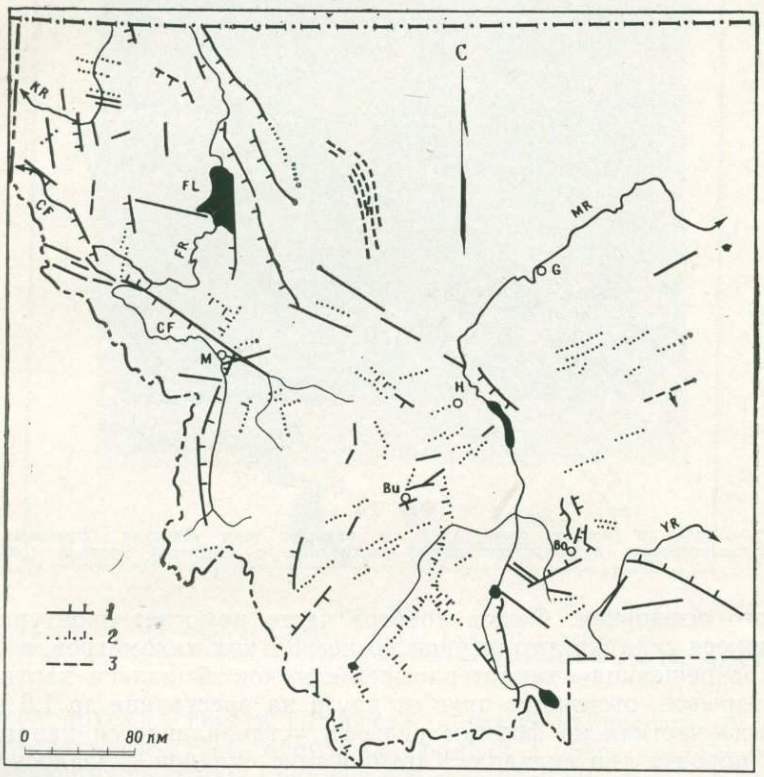
Пологопадающие нарушения, такие, как надвиг Льюис, выявляются с большим трудом. Наличие крутопадающих взбросов, например, в структурном выступе хребта Саутут, расположенного примерно в 120 км к западу от Грейт-Фолс, устанавливается на основании дуговидного рисунка параллельных кряжей.

Короткие и средние по длине линеаменты северо-восточного простирания выделяются в широкой зоне к юго-востоку от линии, соединяющей Мизулу и Грейт-Фолс; вероятно, это значительные по величине разломы, которые до сих пор не были выявлены. Один из таких линеаментов соответствует прямолинейному падающему на юго-восток крылу поднятия Литл-Белт. Другой линеамент, по которому проходит долина Литл-Боулдер, совпадает по простиранию с зоной сильной минерализации в горнорудном районе Бьютт.

Разломы северо-западного простирания выявляются с трудом, так как ориентированы параллельно направлению солнечного освещения.

Исключение составляет разлом Шродер-Крик, который хорошо виден и выделяется на снимке ЕРТС в виде линеамента в 27 км к западу от озера Флатхед, однако и его было трудно закартировать. Ла-Пойнт [4], закартировавший этот разлом, отмечает наличие по разлому правостороннего сдвига на 1,5—3,0 км.

Ни один из шести четко различимых линеаментов западного простирания, пересекающих каньон реки Кутеней на крайнем северо-западе штата Монтана, не показан как разлом на геологической карте штата. Лишь два линеамента, выявленные на самом юге района, имеются



Фиг. 1. Предварительная карта линеаментов, составленная по данным ЕРТС-1 для западной Монтаны.

Вычерчена первоначально в масштабе 1:1 000 000 на прозрачной основе по монтажу снимков, полученных в зоне 7 (по состоянию на конец августа 1972 г.). M — Мизула; Bu — Бьютт; Bo — Бозмен; H — Хелина; G — Грейт-Фолс; KR — р. Кутеней; CF — р. Кларк-Форк; FR — р. Флатхед; MR — р. Миссури; YR — р. Йеллоустон. Пунктирные линии — уступы, сплошные линии — прямолинейные каньоны. *1* — известные разломы, выявленные как линеаменты на снимках ЕРТС; *2* — линеаменты, не показанные на геологической карте штата или эталонного участка; *3* — наклонные слои устойчивых пород.

на геологической карте масштаба 1 : 125 000 [3]. К этим линеаментам приурочены эпицентры двух небольших землетрясений, зарегистрированных сейсмической станцией у плотины Либби в августе 1972 г. (устное сообщение Г. Кросби, Университет штата Монтана).

В районах с умеренным перепадом высот рельефа и слабой залесенностью возможно весьма детальное картирование складок, развитых в палеозойских и мезозойских в различной степени эродированных отложениях. Как показало изучение района между горами Элкхорн и Крейзи-Маунтинс, для такого картирования лучше использовать снимки, сделанные не в августе, а в ноябре (1106-17465-7), при низком угле



Фиг. 2А.

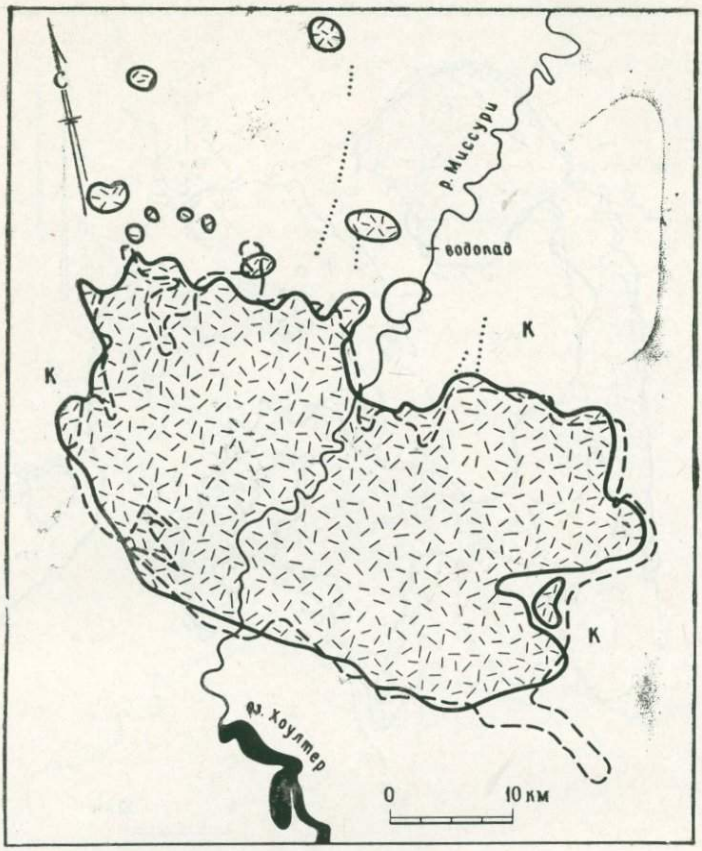
Вулканическое поле в районе горы Адель и каньона реки Миссури (фрагмент снимка ЕРТС-1). Изолированные останцы на севере — лакколиты с размытой кровлей (1089-17515-7).

солнечного освещения. Форма хребтов часто помогает оконтурить погружающиеся складки амплитудой до нескольких километров, в то время как разрешающая характеристика снимков позволяет картировать следы разрывов, отстоящие друг от друга на расстояние до 1,6 км. На отдельных участках по формам рельефа устанавливается направление падения пород и тип складок. Картирование складок оказалось наиболее эффективным при увеличении снимков до масштаба 1 : 500 000, на прозрачной основе и дальнейшей печати на электронно-копировальном устройстве при двукратном увеличении. На примере погружающихся складок установлено, что геологическая карта штата нуждается в существенных поправках, касающихся ориентировки и конфигурации складок.

ФОТОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Попытки выявить критерий для фотогеологического дешифрирования типов пород и формаций по снимкам ЕРТС оказались довольно безуспешными. Возможно, привлечение наземных данных поможет оконтурить области распространения некоторых крупных литологических комплексов, таких, как кайнозойские отложения во впадинах, наклонные палеозойские и мезозойские толщи, а также тела изверженных пород, о которых подробнее будет сказано ниже.

Крупные скопления вулканических продуктов четко различаются на снимках ЕРТС благодаря высокому качеству фототона, отсутствию в этих породах четкой внутренней геологической структуры или тектониче-

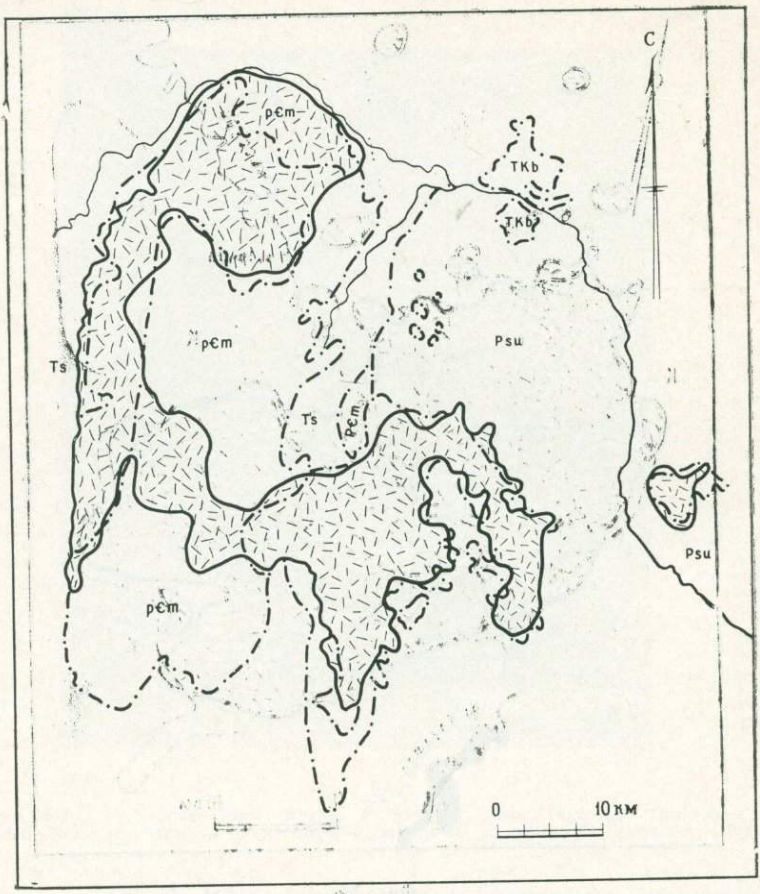


Фиг. 2Б.

Сравнение границ распространения вулканогенных пород в районе горы Адель, перенесенных со снимка (сплошная линия), с данными геологической карты штата (пунктирная линия). Точечные линии — дайки. К — меловые породы.

ски контролируемых систем гидросети, а также вследствие их способности скрывать структуры, прослеживающиеся в более древних породах на прилегающих участках. Границы выходов вулканогенных пород позднемелового или раннетретичного возраста в районе горы Адель, а также местоположение лакколитов на севере этого района (фиг. 2А, 2Б), нанесенные по снимку со спутника, лишь незначительно расходятся с контурами, показанными на геологической карте штата. Были выявлены четыре выраженные в рельефе дайки из группы даек, протягивающихся на север от основного массива вулканогенных пород, хотя их мощность намного меньше пределов разрешающей характеристики снимков. Другие крупные скопления вулканического материала в западной Монтане, такие, как горы Элкхорн или поля Лоуленд-Крик, различаются на снимках несколько хуже, хотя последние все же удалось закартировать достаточно детально. Участки структурно-деформированных вулканогенных пород Элкхорн, расположенные в стороне от основного поля их развития, на снимках не различаются.

Крупные гранитные батолиты, например батолит Боулдер, на снимках ЕРТС выделяются не очень отчетливо из-за среднего качества фототона, отсутствия четкой геологической структуры и из-за того, что речные системы в их пределах контролируются сеткой трещин. Более мелкие гранитные интрузии распознаются лучше, но скорее из-за тех струк-

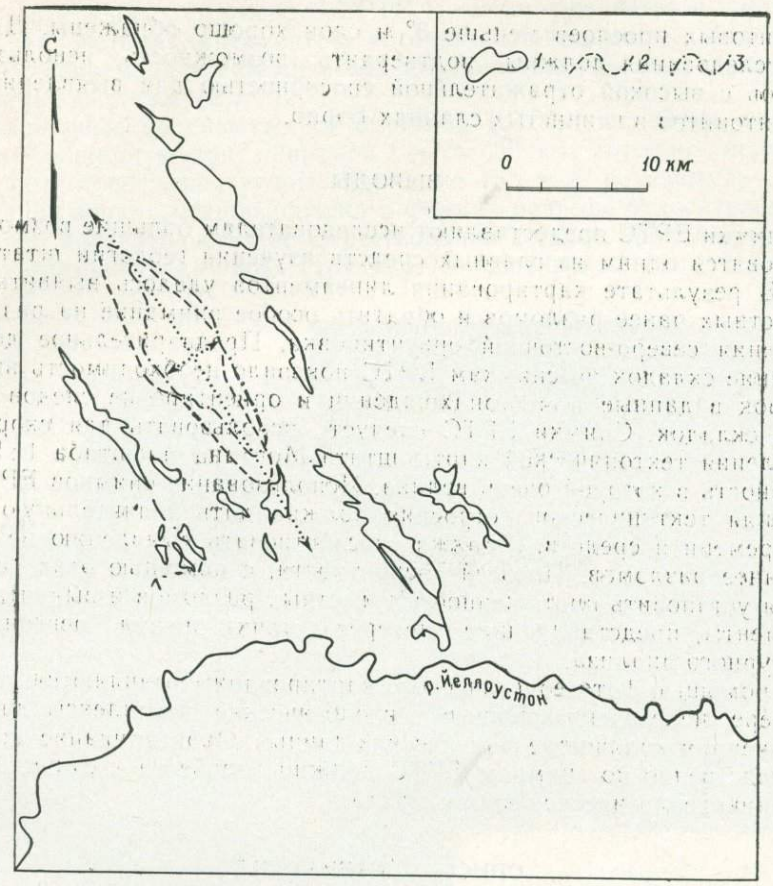


Фиг. 3. Контакты гранитных пород в горах Пайонир по данным снимка ЕРТС (1035-17520-7).

Местоположение других формаций заимствовано с геологической карты штата. Расхождение в центре западной части карты будет проверено полевыми исследованиями. Сплошная линия — контуры по снимкам ЕРТС; штрихпунктир — контуры по данным геологической карты. Ts — третичные отложения, Tkb — граниты; Psu — нерасчлененные палеозойские отложения; pЄm — метаморфический комплекс Мизула.

турных особенностей, которые они придают вмещающим породам, чем благодаря внешнему виду самой интрузивной породы. Границы гранитных батолитов в горах Пайонир были нанесены на карту (фиг. 3); сравнение с геологической картой штата Монтана указывает как на сходство, так и на большие различия контуров, что в равной степени интересно. Поэтому во время предстоящего полевого сезона в этом районе работы будут продолжены.

На отдельных участках исследуемого района, для которых имеются снимки ЕРТС, часто встречаются небольшие гранитные штоки и лакколиты щелочных пород. Они выявляются благодаря темному фототону, который обусловлен не столько окраской самой породы, сколько тональностью развитого на них растительного покрова, хотя эти породы выделяются и по некоторым другим признакам. Лакколиты имеют обычно округлые очертания и куполовидную форму независимо от того, насколько они эродированы. На снимках ЕРТС хорошо различаются пласты осадочных пород, залегающие наклонно по краям лакколитов и гранитных штоков.



Фиг. 4. Карта антиклинали Ингомар.

Видны ядро песчаников и глинистые толщи Бэрпо, с которыми ассоциируются бентонитовые прослои. Увеличена до масштаба 1 : 500 000 (1085-17291-5). *1* — глинистые толщи с высокой отражательной способностью по данным снимка ЕРТС; *2* — тональные границы на снимке ЕРТС; *3* — контакт между кровлей формации Джудит-Ривер (песчаники) и основанием глинистых сланцев Бэрпо по наземным данным.

ИЗУЧЕНИЕ БЕНТОНИТОВ В ГЛИНИСТЫХ СЛАНЦАХ БЭРПО

Для изучения возможности распознавания глинистых сланцев Бэрпо, содержащих в промышленных количествах бентониты, был выбран участок на крыльях хорошо изученной антиклинали Ингомар [1], расположенной приблизительно в 130 км к северо-востоку от Биллингса. С помощью негативного отпечатка масштаба 1 : 500 000 на прозрачной основе вычерчена карта, на которой показаны неправильных очертаний участки с высокой отражательной способностью, а также непрерывная тональная граница, соответствующая литологическому контакту. Полученные результаты сравнивались с картой, составленной по наземным данным, и с крупномасштабными аэрофотоснимками, покрывающими большую часть площади распространения бентонитовых отложений.

Известные обнажения бентонитов в этом районе слишком малы, чтобы их можно было выявить по данным ЕРТС, но пятна неправильной формы на снимках косвенно указывают на их наличие. Участки с высокой отражательной способностью соответствуют глинистым слоям на поверхности или заполненным илом руслам и депрессиям, которые формируются в глинистых сланцах Бэрпо на участках, где угол падения

бентонитовых прослоев меньше 3° и слои хорошо обнажены. Дальнейшие исследования должны подтвердить возможность использования участков с высокой отражательной способностью для выявления залежей бентонитов в глинистых сланцах Бэрпо.

ВЫВОДЫ

Снимки ЕРТС предоставляют исследователям большие возможности и становятся одним из главных средств изучения геологии штата Монтана. В результате картирования линеаментов удалось выявить много неизвестных ранее разломов и обратить особое внимание на разрывные нарушения северо-восточной ориентировки. Предварительное документирование складок по снимкам ЕРТС показало необходимость внесения поправок в данные о местонахождении и ориентировке следов осевых частей складок. Снимки ЕРТС следует использовать для скорейшего составления тектонической карты штата Монтана масштаба 1 : 500 000, потребность в которой очень велика. Использование снимков ЕРТС для уточнения тектонического строения должно дать значительную экономию времени и средств, а также способствовать выявлению не известных ранее разломов. По всей вероятности, с помощью этих снимков удастся установить протяженность известных разломов и выявить новые линеаменты, представляющие интерес с точки зрения регионального структурного анализа.

С помощью фотогеологического картирования выявляются, по меньшей мере, некоторые основные литологические комплексы даже при ограниченном количестве фактических данных. Оконтуривание их границ непосредственно по снимкам ЕРТС должно привести к существенному уточнению геологической карты штата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berg R. B.*, Bentonite deposits in the Ingomar-Vananda area, Treasure and Rosebud Counties, Montana, Montana Bureau of Mines and Geology, Spec. Publ. 51, 1970.
2. *Burfeind W. J.*, A gravity investigation of the Tobacco Root Mountains, Jefferson Basin, Boulder batholith, and adjacent areas of southwestern Montana, unpulb. Ph. D. thesis, Dept. of Geology, Indiana Univ., 1967.
3. *Johns W. M.*, Geology and mineral deposits of Lincoln and Flathead Counties, Montana, Montana Bureau of Mines and Geology, Bull. 79, 1970.
4. *LaPoint D. J.*, Geology and geophysics of the southwestern Flathead Lake region, Montana, unpubl. Master's thesis, Dept. of Geology, Univ. of Montana, 1971.
5. *Ross C. P., Andrews D. A., Witkind I. J.*, Geologic Map of Montana, U. S. Geol. Survey, 1955.

НОВЫЙ ЛИНЕАМЕНТ — РАЗЛОМ В ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ

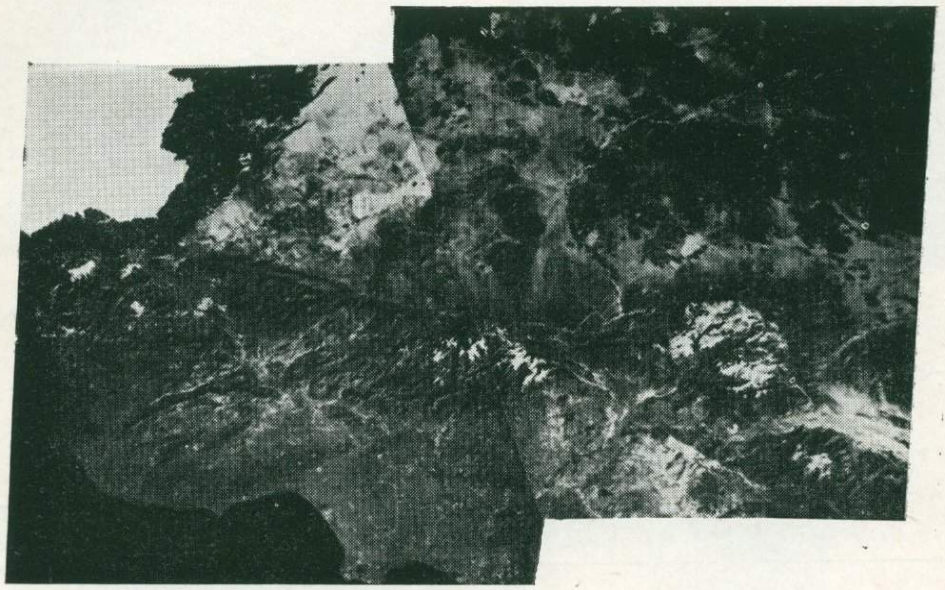
Р. Пиз, К. Джонсон

(Географический факультет Калифорнийского университета, Риверсайд, Калифорния)

Бассейн Лос-Анджелес и осложняющие его отрицательные структуры разбиты на блоки вследствие пересечения характерных для полуострова Калифорния разрывов северо-западного простирания, относящихся к системе разломов Сан-Андреас, и широтных структур Поперечных хребтов, которые относятся к зоне разлома Марри. Сейсмичность данного района обусловила интерес к разломам, относящимся к двум указанным выше тектоническим системам. На снимках Южной Кали-

форнии, полученных с помощью ЕРТС-1, четко выделяется и третья тектоническая система линеаментов, которая, по-видимому, более тесно связана с современной сейсмической активностью, чем две традиционно выделяемые системы (фиг. 1, 2).

Выявленные по снимкам со спутника ЕРТС-1 линейные элементы образуют обширную зону шириной около 80 км, которая пересекает Поперечные хребты под углом примерно 15°, т. е. по азимуту СВ 70°. Поперечная зональность выражена в формах рельефа относительно слабо, однако доказательства ее существования хорошо проявляются в отдельных элементах крупных структур Поперечных хребтов. Например,

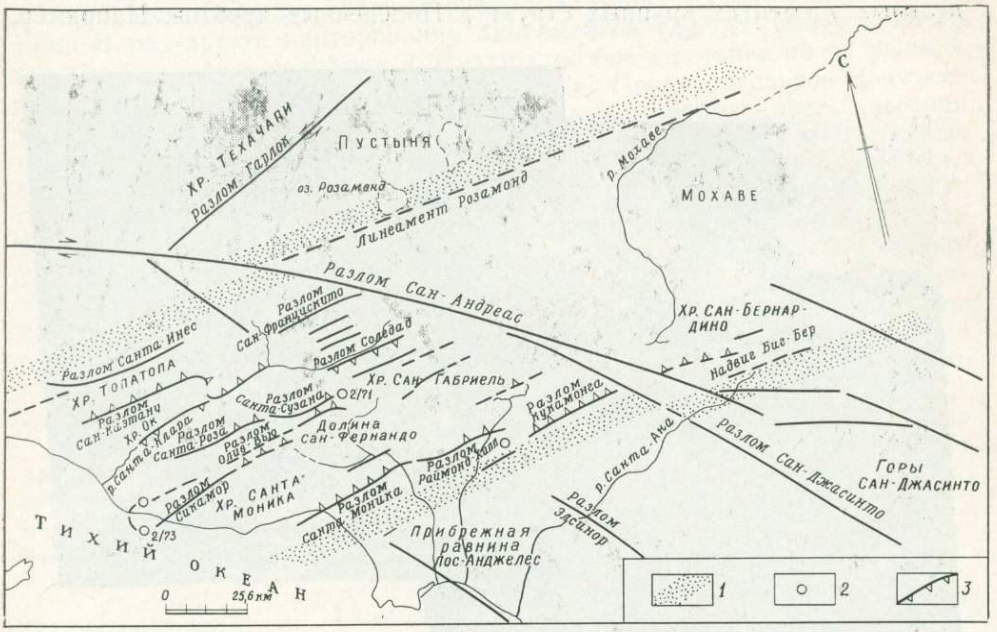


Фиг. 1. Фотомонтаж снимков ЕРТС-1, полученных 25 ноября (RH) и 26 ноября (LH). Видны бассейн Лос-Анджелес, Поперечные хребты и пустыня Мохаве. Зона развития тектонических линейных элементов, простирающихся на СВ 70°, показана на фиг. 2.

хребты северо-западной окраины гор Сан-Габриель ориентированы должным образом и образуют вместе с хребтом Ок линию, идущую в западно-юго-западном направлении к Тихому океану. Эта линия обусловила ориентировку долины реки Санта-Клара. Северная часть долины и четко выраженный хребет Топатопа, расположенный под углом к Поперечным хребтам, приблизительно соответствуют северной границе зоны, выявленной по снимкам ЕРТС-1.

Южная граница зоны проходит по известному разлому [1], большая часть которого перекрыта аллювиальными отложениями, выполняющими бассейн Лос-Анджелес. Западная граница образована разломом Санта-Моника, а восточная — разломом Кукамонга, который ограничивает с юго-востока горы Сан-Габриель в районе перевала Кахон, там, где разлом Сан-Андреас расчленяет Поперечные хребты. Важно отметить, что выделенный здесь по данным ЕРТС-1 линеамент, пересекающий разлом Сан-Андреас, характеризуется правосторонним смещением на 1 км. Этот факт может явиться ключом к определению возраста линеамента. Направленность тектонических процессов оказала влияние на структуру гор Сан-Бернардино, расположенных восточнее перевала Кахон, придав формам рельефа ориентировку, поперечную к основному

простиранию горных хребтов. К указанному линеаменту приурочены основные вершины горного южного пояса, система озер Биг-Бер — Болдуин и основная часть каньона реки Санта-Ана. Этот линеамент рассматривается нами в качестве южного края выделяемой зоны. Однако ориентировка хребтов и наличие разломов, выявленных южнее гор Сан-Габриель, на возвышенности Сан-Хосе могут служить основанием для предположения о большей ширине зоны. Данные снимков ЕРТС пока не позволяют оценить ширину зоны достаточно точно.



Фиг. 2. Схематическая карта части территории Южной Калифорнии, соответствующая фотомонтажу фиг. 1.

Показана Южно-Калифорнийская зона сжатия, связанные с ней разломы и географические названия, упомянутые в тексте.

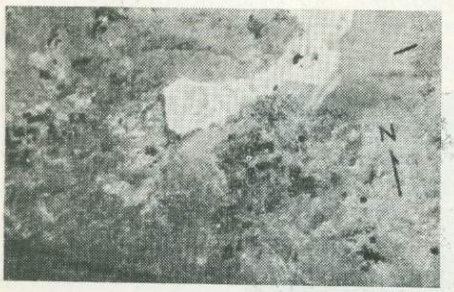
1 — граница зоны сжатия; *2* — современные эпицентры; *3* — надвиги.

Наиболее отчетливым свидетельством существования зоны и указателем ее ориентировки служит тектоническая линия, которая протягивается через пустыню Мохаве вдоль северного края зоны приблизительно до середины расстояния между разломами Сан-Андреас и Гарлок. На снимке это выражено особенно четко вдоль южного берега сухого озера Розамонд (фиг. 3), где аллювий пустыни образует низкие холмы. Холмы достаточно хорошо дренируются, поэтому на них произрастает древовидная юкка *(Yucca brevifolia)*. На снимке эти участки проявляются в виде темных пятен (фиг. 4, 5). К востоку тектоническая линия протягивается вдоль северного края нескольких низких куполов, хорошо фиксируемых среди пустынной равнины. На отдельных участках по тектонической линии проходит русло реки Мохаве.

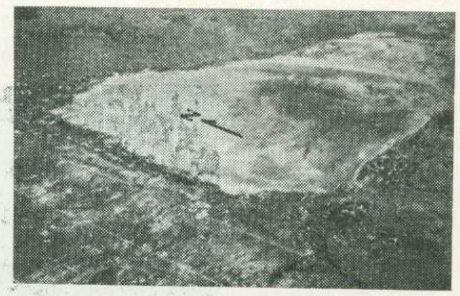
Аллювиальные холмы, расположенные южнее пересыхающего озера Розамонд, так же как и куполовидные формы рельефа, наводят на мысль, что тектоническая линия, пересекающая пустыню, испытала боковое давление с юго-востока. Ряд поперечных разломов, перекрытых аллювием, предположительно рассматривался в качестве надвигов. Землетрясение в Сан-Фернандо в 1971 г. доказало реальное существование этих разломов. Как надвиги закартированы разломы Санта-Суза-

на — Санта-Роза, Кукамонга, Сан-Каэтану и предположительно разлом Санта-Моника. Совокупность этих данных со всей очевидностью подтверждает, что описанная выше субширотная зона представляет собой зону активного сжатия земной коры, где происходила разрядка напряжений, возникавших в результате движения блоков полуострова Калифорния в северо-западном направлении.

Особый интерес представляет связь тектонических подвижек при землетрясении в Сан-Фернандо 9 февраля 1971 г. с зоной линеаментов,



Фиг. 3. Сухое озеро Розамонд и линеамент.
Снимок получен 26 ноября 1972 г. в зоне 5.



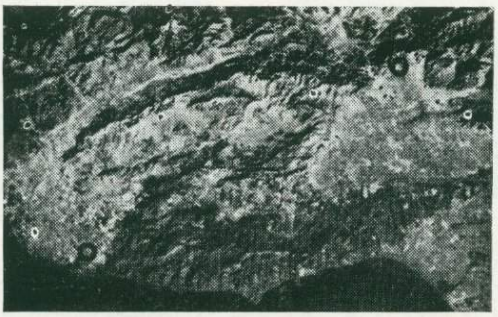
Фиг. 4. Перспективный снимок сухого озера Розамонд.
Видны заросли юкки на холмах, развитых вдоль линеамента.



Фиг. 5. Поперечный схематический разрез холмов, расположенных вдоль линеамента Розамонд, которые образовались, по-видимому, в результате вспучивания аллювия пустыни.

обнаруженных путем анализа снимков ERTC-1. Видимые на снимках разрывы, которые относили к разлому Олив-Вью [2], оказались надвигами с азимутом простирания СВ 70°. В зоне разрывов зафиксировано сжатие земной коры на несколько десятков сантиметров. В результате земная поверхность севернее разлома была приподнята приблизительно на 1 м. Это явление свидетельствует о том, что напряжения, возникающие в описываемой зоне, могут служить причиной горообразования в бассейне Лос-Анджелес и в его обрамлении. Можно предположить, что причина левосторонних движений, с которыми связано землетрясение, заключается в том, что выклинивающийся раздробленный блок земной коры, расположенный западнее разлома Сан-Андреас, двигался в обратном направлении относительно менее нарушенного блока Мохаве. В результате должны были возникнуть прибрежные структуры западного простирания. Данные по разлому Розамонд подтверждают точку зрения, согласно которой вдоль границы блока Мохаве происходила разрядка напряжений земной коры. С меньшей степенью уверенности можно предположить, что вдоль разлома Сан-Андреас в районе бассейна Лос-Анджелес имеет место резкий сдвиг.

Согласно последним данным о подвижках в районе Сан-Фернандо, происшедших 21 февраля 1973 г., наиболее сильные толчки были сконцентрированы вблизи западной оконечности гор Санта-Моника (фиг. 6). Разлом Олив-Вью, протягивающийся на юго-запад вдоль Сими-Хилс (азимут СВ 70°), соединяется с разломом Сикамор, который, как полагают, обусловил недавнее землетрясение. Это еще раз подтверждает, что зона сжатия активна. 28 ноября 1972 г. серия слабых толчков была зафиксирована в районе, перекрытом аллювием, близ Помона. Такое местоположение толчков мало соответствует традиционным представлениям о сетке разломов Южной Калифорнии, но отвечает западному продолжению разлома Кукамонга — сегмента системы зоны сжатия.



Фиг. 6. Линеамент (разлом) Олив-Вью, к которому приурочены два современных эпицентра землетрясений (показаны кружками).

В заключение можно сказать, что снимки ЕРТС-1, дополненные традиционными геологическими данными, позволили установить местоположение зоны сжатия земной коры, проходящей через Южную Калифорнию. С этой зоной связаны горообразование, ориентировка форм рельефа и современная сейсмическая активность. Линеаменты, входящие в зону, по своему простиранию занимают промежуточное положение между системой разлом Сан-Андреас — полуостров Калифорния и структурами Поперечных хребтов, которые связаны с океанической зоной разломов Марри. Если сжатие Южной Калифорнии происходило параллельно ориентировке структур полуострова, вполне правомочен вопрос: почему зона сжатия не перпендикулярна вектору давления? Возможно, структуры Поперечных хребтов соответствуют ослабленным тектоническим линиям, которые отвечают идеальному эллипсоиду напряжений. Но какой бы ни была причина такой ориентировки, существование Южно-Калифорнийской зоны сжатия побуждает пересмотреть вопрос о происхождении Поперечных хребтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geologic Atlas of California, California, Department of Natural Resources, Division of Mines, Scale: 1 : 250 000, Los Angeles, 1969; San Bernardino, 1967; Long Beach, 1962; and Santa Ana, 1965 sheets.
2. *Youd T. L.,* Landsliding in the Vicinity of Van Normal Lakes, The San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 733, U. S. Government Printing Office, Washington, C. C., 1971.

КАРТИРОВАНИЕ РАЗРЫВОВ И УЧЕТ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК НА СРЕДНЕМ ЗАПАДЕ США С ПОМОЩЬЮ СНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СПУТНИКОМ ЕРТС-1

Ч. Уир

(Геологическая служба штата Индиана, Блумингтон)

Ф. Уоббер, О. Расселл, Р. Амато

(Корпорация по коммерческому использованию спутников Земли, Вашингтон)

ВВЕДЕНИЕ

Проблема техники безопасности в угольных шахтах имеет первостепенное значение. Проведенные исследования показали, что обвалы кровли в ряде шахт тесно связаны с зонами ослабления, образовавшимися в результате проведения горных работ в местах развития естественных разрывов в породах, перекрывающих разрабатываемый угольный пласт. В большинстве случаев нельзя заранее предсказать наличие и величину разрывов, поэтому они картируются непосредственно в процессе проходки такого участка, когда уже возникает угроза обвала кровли. В связи с этим приходится усиливать крепь кровли и иногда изменять направление выработок или вносить другие значительные изменения в принятый план горных работ. Хотя перед закладкой большой шахты обычно проводят интенсивное колонковое бурение, его результаты не позволяют с достаточной точностью выявить наличие разрывов, поскольку мощность зон трещиноватости, как правило, не превышает нескольких сантиметров. Даже если скважина пересекает зону трещиноватости, ее положение в пространстве можно определить только при применении дорогостоящих методов отбора ориентированного керна. По мнению авторов, полезные данные по разрывам могут быть получены с помощью аэрофотосъемки и дистанционных методов исследования со спутника ЕРТС-1. До настоящего времени эти методы слабо использовались для картирования разрывов в угольных бассейнах. Более того, до сих пор не разработаны методы обнаружения разрывов в районах с мощным чехлом рыхлых отложений. Сейчас изучаются возможности использования авиационных и орбитальных средств для обнаружения едва заметных линеаментов, указывающих на погребенные разрывы в коренных породах.

КАРТИНА РАЗРЫВОВ НА СНИМКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКА ЕРТС-1

Программа НАСА, составленная для спутника ЕРТС-1, предоставляет возможность осуществить многократный обзор территорий для разработки методов картирования разрывов в районах, где коренные породы перекрыты мощным чехлом рыхлых отложений. Кроме того, она позволяет быстро собрать необходимую информацию о районах развитой угледобывающей промышленности. На снимке (1070-16056-5) участка, расположенного вблизи центра Восточного внутреннего угольного бассейна (от Маттуна, штат Иллинойс, до Винсенса, штат Индиана; снимок получен 1 октября 1972 г. с помощью спутника ЕРТС-1), хорошо видна ориентировка разрывов. Преобладающее направление разрывов — СВ 30° — наиболее характерно для центральной части снимка (фиг. 1). На снимке также различима система разрывов северо-запад-

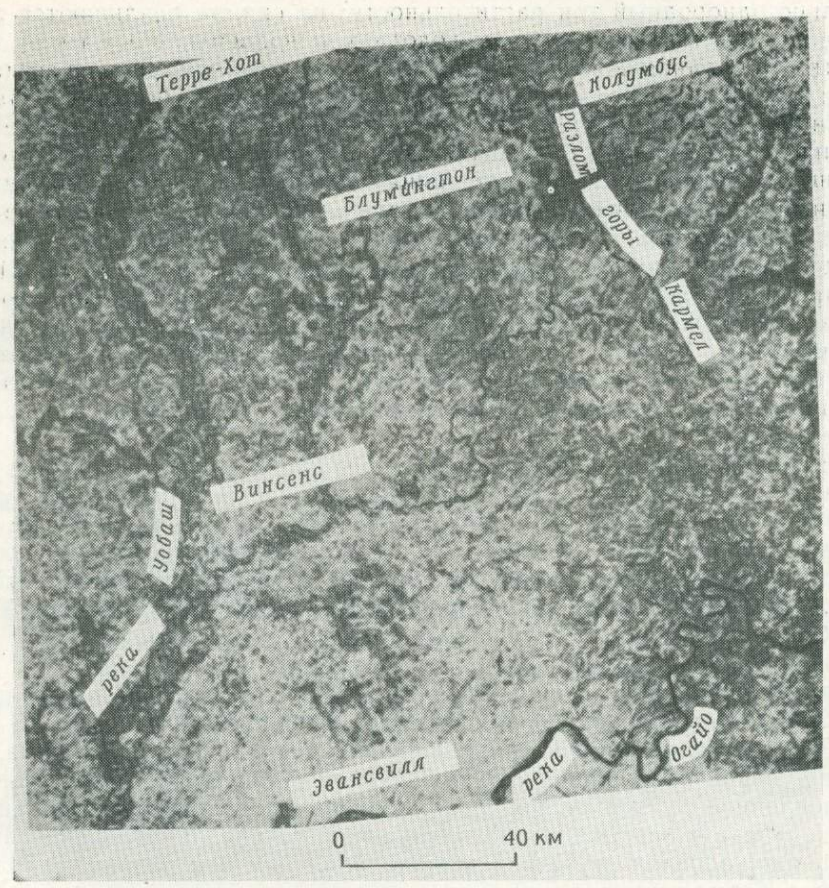


Фиг. 1. Ориентировка разрывов, выраженная в рисунке гидросети, на снимке ЕРТС-1 части территории штатов Индиана и Иллинойс (1070-16050-5, 1 октября 1972 г.).

ного простирания (СЗ 330°). Этот снимок был получен в зоне 5 (красной) МСС в период, когда сельскохозяйственные культуры были в основном убраны, поля вспаханы, а естественная растительность вдоль гидросети все еще сохранялась. Поля, с которых были убраны сельскохозяйственные культуры, выглядят на снимке более светлыми, чем участки, покрытые зеленой растительностью (темный тон), развитой вдоль водотоков. Контраст в тональности смежных участков свидетельствует о структурном влиянии, которое оказывают на гидросеть разрывы в подстилающих коренных породах, хотя местами они погребены под более чем 30-метровой толщей ледниковых отложений. На снимке 1088-16050-5 (от 19 октября 1972 г.) участка, расположенного севернее указанного выше района, вблизи Терре-Хота, Индиана, и Данвилла, Иллинойс, в рисунке гидросети прекрасно отражаются главные направления разрывов. Основная система разрывов в этом районе ориентирована на СЗ 280—285°, а второстепенная система — на СВ 70—80°.

Ценность многократных наблюдений с помощью спутника ЕРТС становится очевидной при сравнении снимков одного и того же района, полученных в разное время года. Так, картину разрывов, хорошо различимых на фиг. 1, трудно проследить и идентифицировать по снимкам той же площади, полученным 16 августа (1034-16050-5), 13 сентября (1052-16050-5) и 6 ноября 1962 г. (1106-16054-5).

На снимке ЕРТС-1 (в зоне 5) изображен низменный, покрытый ледниковыми отложениями район с повсеместно развитым плотным покро-



Фиг. 2. Снимок ЕРТС-1 (1105-15595-7, 5 ноября 1972 г.) юго-западной части штата Индиана.

Показаны разрывы, выраженные в рисунке гидросети и водоразделов на возвышенности, сложенной известняками и алевролитами миссисипского возраста.

вом сельскохозяйственных культур; исключение составляют участки развития глубоковрезанной гидросети. В районе встречаются два основных вида растительности: 1) однолетние сельскохозяйственные культуры и 2) естественно произрастающие вдоль гидросети деревья и кусты. Сельскохозяйственные культуры в начале осени, после созревания, либо оставляют на некоторое время на корню, либо убирают, при этом естественная растительность еще сохраняет зеленый цвет. В это время ярко выражены различия в отражательной способности между живой и увядшей растительностью. Снимки ЕРТС, полученные в течение короткого переходного периода, подчеркивают рисунок гидросети. Во многих местах эта сеть структурно обусловлена, о чем свидетельствует явная линейность ее рисунка и картина уступов рельефа.

Другой аспект сезонных изменений, влияющих на выявление разрывов, иллюстрируется на снимке территории северо-западной части штата Индиана (1105-15595-7), полученном 5 ноября 1972 г. Штат Индиана находится в зоне умеренного климата, которая характеризуется достаточным количеством осадков, и земли штата покрыты растительностью большую часть года. Снимок в зоне 7 (вблизи инфракрасной области), полученный в вегетационный период развития растений, отражает отно-

сительно однородный тон растительности; на снимке различаются лишь такие детали поверхности, как водотоки и водоемы. На снимке этого участка, сделанном в зоне 7 в начале зимы, после отмирания растительности, выявляется больше подробностей, и он имеет большее сходство со снимком в зоне 5. Снимок в зоне 7 показан на фиг. 2. Отсутствие растительности с высокой отражательной способностью в сочетании с небольшим углом зимнего солнцестояния позволяют получить на снимке сложный узор разрывов в более высоких районах, где развиты известняки. Линеаментам, показанным на этом снимке, отвечают прямолинейные отрезки гидросети и длинные узкие гряды. Большинство линеаментов приурочено к более высоким участкам, где коренные породы покрыты не ледниковыми отложениями, а корой выветривания известняков мощностью от 0,3 до 10 м. Преимущественная ориентировка линеаментов (СВ 40—50° и СЗ 330°) соответствует данным наземных измерений трещиноватости известняков, обнажающихся в выемках дорог и в карьерах.

В районе развития известняков к юго-западу от Блумингтона, простирающемся на юг до штата Кентукки, было закартировано много карстовых образований. На некоторых картах показано линейное развитие карстовых форм рельефа вдоль разрывов, которые точно соответствуют по направлению и расположению линиям, изображенным на фиг. 2. Из этих образований наиболее известна, вероятно, пещера Уиандот. Она находится к северу от реки Огайо (округ Крауфорд) и протягивается почти на 3,2 км в северо-восточном направлении (СВ 40°). Пещера Блу-Спрингс (северная часть округа Лоуренс) вытянута почти на 3,2 км в северо-западном направлении (СЗ 225°).

Разлом горы Кармел прослеживается восточнее Блумингтона, где он пересекает алевролиты Борден. Положение разлома горы Кармел, установленное по снимку, было также закартировано в поле. Однако на снимке обнаруживаются дополнительные разрывы. В настоящее время в полевых условиях изучается вопрос: относятся эти разрывы к разлому горы Кармел или же к региональной системе разрывов?

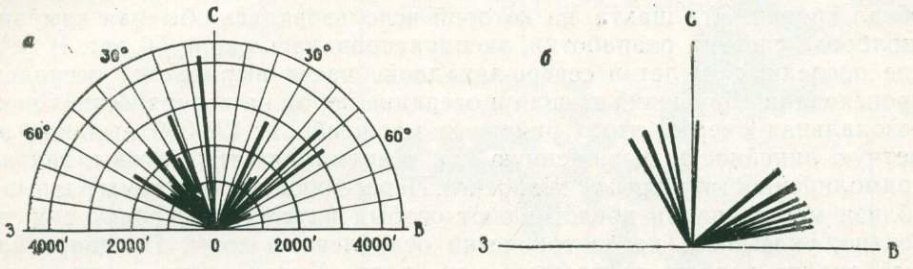
ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗОНЫ, ВЫДЕЛЯЕМЫЕ ПО СНИМКАМ СО СПУТНИКА ЕРТС

Физико-географические провинции юго-западной Индианы легко различаются на снимке, приведенном на фиг. 2. Норманская возвышенность, простирающаяся к югу между Колумбусом и Блумингтоном (участок снимка темного тона), является чрезвычайно расчлененным и в основном невозделываемым районом, где развиты алевролиты Борден. Менее расчлененный район, простирающийся к югу через Блумингтон (участок снимка светлого тона), представляет собой преимущественно пастбища и возделываемые поля на равнине Митчелл, где развиты известняки среднемиссисипского возраста. Темноокрашенная площадь на снимке к юго-западу от Блумингтона, вытянутая в южном направлении, соответствует расчлененной и в основном невозделываемой возвышенности Крофорд, которая сложена породами позднемиссисипского возраста, представленными чередованием сланцев, песчаников и известняков. Почти всю западную половину снимка занимает низменность Уобаш, сложенная породами пенсильванского возраста. За исключением крайней юго-восточной части, низменность Уобаш покрыта мощным покровом рыхлых отложений. Более чем 30-метровая толща ледниковых наносов (песка и гравия), перекрытая современным аллювием, выполняет главные долины. Ровные низменные районы покрыты озерными отложениями. Возвышенные районы покрыты ледниковыми наносами мощ-

ностью несколько метров с тонким слоем лёсса наверху. В районе низменности Уобаш находится большинство открытых разработок угля и угольных шахт.

КАРТИНА РАЗРЫВОВ, ПОЛУЧЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Информацию о разрывах и трещиноватости можно получить также путем спектрозональной съемки масштаба 1 : 120 000. Такое мелкомасштабное фотографирование было проведено в мае, июне и августе 1971 г. с целью изучения причин заболевания зерновых. С геологической точки зрения более полезной оказалась аэрофотосъемка, проведенная в мае, так как растительный покров в это время года еще незначителен, что позволяет по едва различимым изменениям характера почвы выявлять



Фиг. 3. Диаграммы ориентировки разрывов.

а — простирание и длина разрывов, закартированных по аэрофотоснимкам; *б* — простирание разрывов, закартированных в горных выработках.

следы разрывов коренных пород. Анализ разрывов по данным аэрофотосъемки, проведенной в июне и августе, значительно усложнен из-за развития растительного покрова. Спектрозональная съемка с большой высоты обеспечивает охват площади в масштабе, промежуточном между масштабом съемки с помощью ЕРТС и аэрофотосъемкой с низкой высоты (1 : 20 000), которая наиболее легко осуществима. На мелкомасштабном аэрофотоснимке устанавливается гораздо больше разрывов, чем на имеющихся в нашем распоряжении снимках ЕРТС. Хотя картины разрывов одной и той же площади на каждой серии аэрофотоснимков не всегда сходны, дополнительные данные, полученные при дешифрировании снимков ЕРТС, обеспечивают хорошую общую корреляцию направления и плотности разрывов. Там, где линеаменты выявлялись посредством высотной спектрозональной съемки площадей, на которых расположены открытые горные выработки (действующие и заброшенные), направления разрывов, измеренные в угольных карьерах, и направления разрывов, выявленные по снимкам (фиг. 3,*б*), совпадают.

Изучение относительной плотности зарегистрированных разрывов в различных частях юго-западной Индианы показывает, что в районах, подвергавшихся оледенению, обнаруживается значительно больше разрывов, чем в районах расположения угольных месторождений, где оледенения не было. Более того, район покрытый молодыми висконсинскими отложениями, расположенный на севере, отличается повышенной плотностью разрывов по сравнению с районом, расположенным южнее, покрытым более древними иллинойсскими отложениями. Эта зависимость была выявлена и на черно-белых аэрофотоснимках масштаба 1 : 20 000 [1].

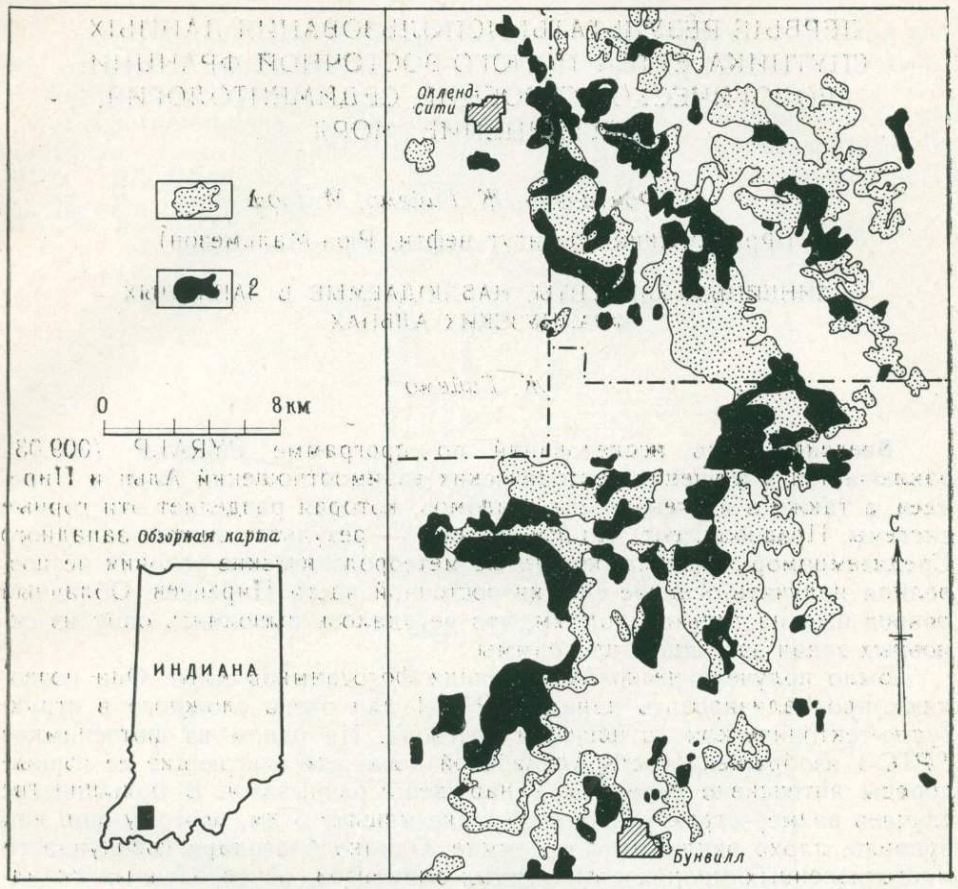
[1] Автор не объясняет существа этой зависимости. По-видимому, она обусловлена приуроченностью ледниковых отложений к возвышенным участкам района, сложенным более древними и более трещиноватыми породами. — *Прим. ред.*

В масштабе 1 : 20 000 проводилась также спектрозональная съемка. Снимки изучались с целью обнаружения коротких (возможно, вторичных) разрывов. Анализ материала показал, что для обнаружения разрывов по снимкам полезно применять комплексный метод, включающий фотосъемку с разных высот и в различных зонах спектра, так как линеаменты, опознаваемые на снимках масштаба 1 : 20 000, не всегда видны на снимках масштаба 1 : 120 000. Наоборот, линеаменты, выделяемые на мелкомасштабном снимке, часто имеют настолько неуловимые признаки, что на крупномасштабных фотографиях не различаются. Обычно ориентировка линеаментов и их относительная плотность на снимках этих двух масштабов примерно одинаковы.

Во время проведения настоящего исследования 8 ноября 1972 г. на шахте Кинг-Стейшн, расположенной к югу от Принстона, произошел обвал кровли. Эта шахта, на которой использовалась обычная камерно-столбовая система разработки, эксплуатировалась около 50 лет. В течение последних 10 лет в северо-западной части выработок регулярно происходили обрушения кровли и оседание пород на поверхности. Спектрозональная съемка этого района в масштабе 1 : 120 000 выявила заметную линейность, выраженную как в аномалиях тона почвы, так и в прямолинейности участков гидросети. Пересекающиеся системы разрывов вблизи места аварии представляют особый интерес, поскольку они, вероятно, указывают на тектонически ослабленные зоны. Предварительный анализ данных по разрывам на шахте Кинг-Стейшн показал, что они простираются в основном на СЗ 353° и СВ 50° (фиг. 3, *а*). Наибольшая плотность разрывов, как показано на снимке, примерно соответствует той площади, где отмечается наибольшее число обвалов кровли. Для уточнения этих выводов необходима дополнительная информация на основе наблюдений в самой шахте.

УЧЕТ И ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ РАЗРАБОТОК УГЛЯ С ПОМОЩЬЮ СНИМКОВ ЕРТС

Основная цель настоящего эксперимента состоит в обнаружении связи между линеаментами, наблюдаемыми на снимках, и разрывами в породах, перекрывающих угольные пласты. Однако совершенно очевидно, что этим способом можно успешно картировать также площади открытых разработок угля (фиг. 4). На получаемое количество информации оказывают влияние сезонные условия. Например, на снимках, полученных в зоне 7 в вегетационный период растений в штате Индиана, четко выделяются почти голые, перекопанные участки разработок, резко отличающиеся от близлежащих, покрытых растительностью целинных участков. Площади старых открытых разработок, невыровненные и засаженные деревьями, как правило, легче зарегистрировать, чем площади, которые были выровнены и превращены в пастбища и возделываемые поля. После учета по снимкам ЕРТС выработанных площадей легко определить и нанести на карту площади новых открытых разработок. Повторная съемка территории с помощью ЕРТС (с периодом в три месяца или год) обеспечила бы хорошую систему контроля над картированием новых открытых разработок. Изолированные открытые разработки размером более четырех гектаров легко обнаружить и нанести на карту, однако даже при хорошей контрастности снимка нельзя зарегистрировать изолированные площади разработок размером менее двух гектаров. Составленные карты учета горных разработок (фиг. 4) тщательно сверялись с аналогичными картами, полученными от отдельных угольных компаний.



Фиг. 4. Карта части территорий округов Пайк и Гибсон, юго-западная Индиана.
Показаны площади горных разработок, закартированных ранее, и площадь, которая закартирована по снимкам со спутника ЕРТС-1.
1 — площади горных разработок до 1968 г.; *2* — площади, разработанные после 1968 г., закартированы по снимкам ЕРТС-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы пришли к выводу, что многократная съемка территорий с помощью ЕРТС-1 полезна для картирования региональных разрывов и трещиноватости в районах, покрытых мощным покровом ледниковых отложений, и для обеспечения контроля за действующими угольными разработками. Для обнаружения разрывов особенно ценны снимки, полученные мультиспектральным сканатором (МСС) в зонах спектра 5 и 7 в различные сезоны года. Установлено хорошее соответствие разрывов, закартированных методом спектрозональной съемки с большой высоты, и разрывов, зарегистрированных в процессе наземных полевых работ. Данные по разрывам, полученные в штате Индиана с помощью спутника ЕРТС, имеют практическое значение для обеспечения мероприятий по технике безопасности в угольных шахтах всего Восточного внутреннего угольного бассейна. Наилучшие результаты при региональном учете открытых горных разработок получены по снимкам МСС в зоне 7. Сравнительный анализ снимков, сделанных в разное время года, дает возможность регистрировать изменения в конфигурации открытых разработок площадью не менее одного гектара.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКА ЕРТС-1 ПО ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ФРАНЦИИ: ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, СЕДИМЕНТОЛОГИЯ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОРЯ

А. Фонтанель, Ж. Гийемо, М. Гюи

(Французский институт нефти, Рюи-Мальмезон)

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В ЗАПАДНЫХ ФРАНЦУЗСКИХ АЛЬПАХ

Ж. Гийемо

Введение. Цель исследований по программе PYRALP (009.03) заключается в изучении тектонических взаимоотношений Альп и Пиренеев, а также в изучении сети разломов, которая разделяет эти горные системы. Предполагают, что эта система — результат смятия западного Средиземноморья. Неблагоприятные метеорологические условия не позволили получить осенние снимки восточной части Пиренеев. Облачный покров был настолько плотным, что не удалось выполнить одну из основных задач настоящей программы.

Было получено несколько хороших фотоснимков Альп. Они позволяют проанализировать данные ЕРТС-1 для очень сложного в структурно-тектоническом отношении региона. На одном из фотоснимков ЕРТС-1 изображена часть Альпийской цепи, где слагающие ее горные породы интенсивно перемяты и нарушены разрывами. В большинстве случаев размер структур в поперечнике меньше 5 км, поэтому они, как правило, плохо видны на фотоснимке. Однако благодаря совокупности многочисленных мелких структурных элементов, обусловленных складчатостью осадочного чехла, можно зафиксировать линейный характер основных структурных образований. Эти структуры, которые лучше всего различаются на фотомонтаже нескольких снимков, показаны на одном из снимков, приведенном в качестве примера (фиг. 3).

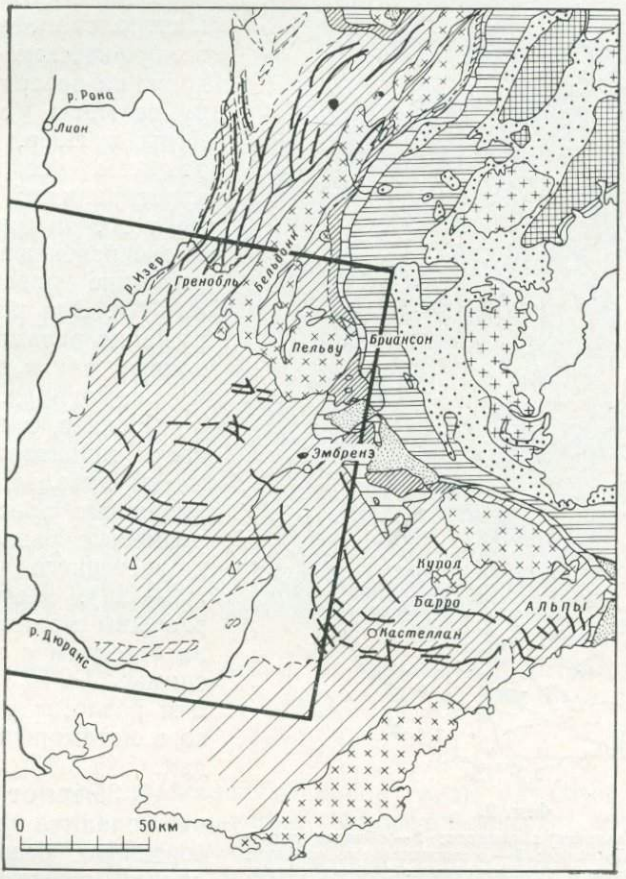
Геологическое строение исследуемого района. Исследуемый район рассмотрен как пример получения дополнительной информации о геологическом строении с помощью снимков, сделанных со спутника ЕРТС. Он относится к одному из районов, наиболее часто посещавшихся геологами в течение нашего столетия. Количество опубликованных работ по геологии Западных Альп превысило тысячу.

На фиг. 3 приводится часть района, зафиксированная на фотоснимке 1078-09562, полученном 9 октября 1972 г. На снимке видна долина нижнего течения Роны к югу от Лиона и к северу от дельты. В этом месте Рона течет с севера на юг и ее долина, частично выполненная аллювиальными отложениями, отделяет Центральный массив на западе от Альп на востоке.

Центральный массив представляет собой обширную возвышенность, сложенную метаморфизованными в процессе герцинского орогенеза породами и перекрытыми глубоко расчлененным чехлом мезозойских осадочных пород. Образование возвышенности происходило одновременно с формированием альпийских складок и сопровождалось вулканическими процессами (горная цепь Пюи) и образованием меридиональных прогибов (долина реки Лиманъ). В восточной части региона осадочные породы полого погружаются к юго-востоку, хотя и нарушены многочисленными разломами.

Альпы отличаются от Центрального массива наличием мощной толщи осадочных пород мезозойского и кайнозойского возраста, смятых в многочисленные складки.

Геологи выделяют в Альпах несколько провинций (фиг. 1). Самая западная часть Французских Альп, представленная на фотоснимке ЕРТС 1078-09562, находится во внешней провинции и подразделяется на две зоны: зону Дофине на севере и зону Прованс на юге.



Фиг. 1.

Один из внешних кристаллических массивов (Пельву, Бельдони) виден в северо-восточном углу фотоснимка.

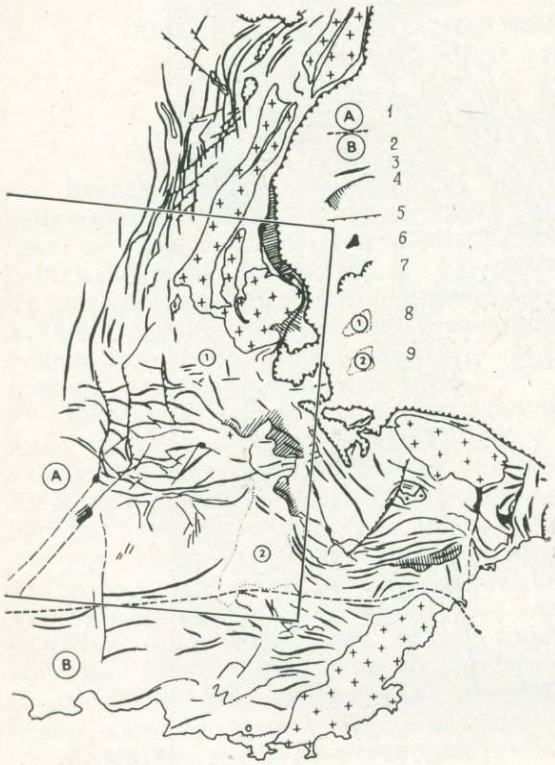
Для зоны Дофине характерны складки меридионального направления, в то время как в зоне Прованс развиты складки широтной ориентировки.

Структурная карта Западных Альп, опубликованная несколько лет назад [1], показана на фиг. 1. На карте видно, что структуру изучаемого района можно легко связать с общей структурой Французских и Итальянских Альп. На этой карте не показаны линейные разрывы, но некоторые из них показаны на схеме (фиг. 2), опубликованной теми же геологами. Границы фотоснимка ЕРТС 1078-09562 нанесены на фиг. 1 и 2.

Описание района, показанного на фотоснимках ЕРТС 1078-09562 (фиг. 3 и 4). Фотоснимки, сделанные со спутника ЕРТС-1 и выбранные

для настоящего исследования, внимательно изучались. Выявленные структурные элементы не являются новыми, они отмечены на уже опубликованных картах, так как рассматриваемый район хорошо исследован геологами. Однако несколько линейных структурных элементов проявляется на снимке с большей точностью, чем это можно наблюдать на геологических картах и во время полевых исследований.

К западу от Роны и к северу от реки Ардеш обнажены мезозойские осадочные породы, которые слагают продолжение восточного крыла Центрального массива. Метаморфические породы выходят на поверхность к северу от места слияния рек Роны и Изер. Доминируют разрывы севро-восточного простирания (50—60°). Кроме того, наблюдаются немногочисленные разрывы, имеющие простирание СВ 30—40°. Эти разрывные нарушения развиты как в осадочных, так и в метаморфических породах.



Фиг. 2.

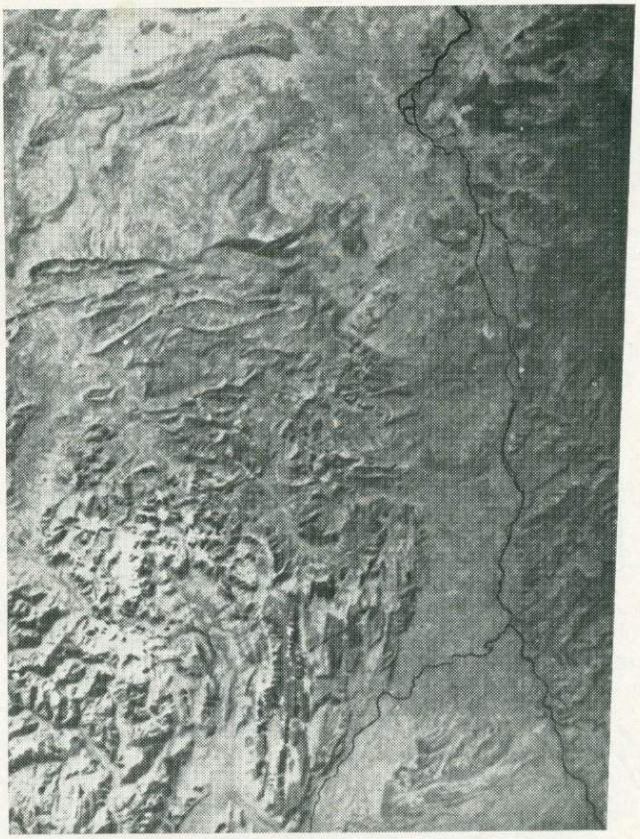
1 — область субальпийских складок; *2* — область складчатых структур Прованса; *3* — антиклинальные складки; *4* — надвиг; *5* — сбросы (ориентировочно); *6* — диапиры; *7* — граница внутренней зоны; *8* — верхнемеловой посттектонический бассейн Деволюи; *9* — третичный посттектонический бассейн Валеансоль.

Южнее, в юго-западной части территории, наблюдаются небольшие складки широтного простирания, нарушенные разломами северо-восточного направления (50—60°). Меридиональные разрывы можно наблюдать на соседнем с запада фотоснимке ЕРТС 1061—10015. Эти разломы развиты только в метаморфических породах.

В 35 км от реки Ардеш наблюдаются останцы четвертичных базальтовых излияний, известные как плато Куарон.

В районе к востоку от долины Роны рельеф становится более сложным. Однако на снимке (фиг. 3) хорошо различимы два основных направления складчатости (дофинское и провансальское), т. е. меридиональное направление в северной части и широтное в южной. Большинство структур асимметрично; антиклиналь часто запрокинута на смежную с ней синклиналь. На фотоснимке некоторые синклинали хорошо различимы благодаря обращенному рельефу в поле развития мезозойских отложений, представленных переслаиванием мощных пластов известняка и сланцев; картирование осей антиклинальных структур практически невозможно.

Несмотря на сложное тектоническое строение данного района, здесь также можно выделить многочисленные линейные структурные элементы (фиг. 4). Их ориентировка идентична ориентировке линейных форм, наблюдаемых на границе Центрального массива к западу от Роны, т. е. для них характерно простирание СВ 50—60° и в меньшей степени 30—



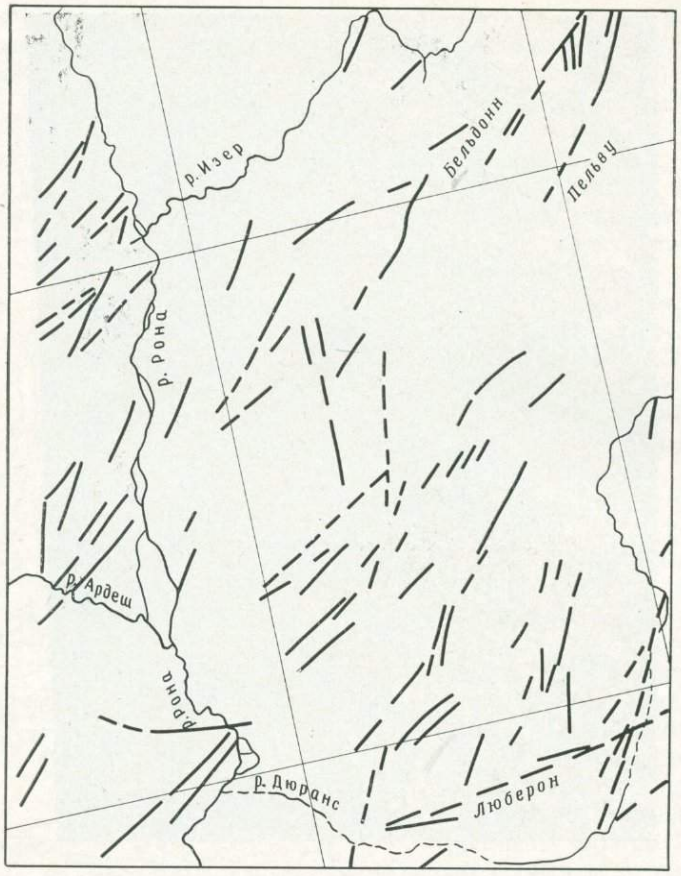
Фиг. 3. Фотоснимок, полученный со спутника ЕРТС; 1078-09562-6.
Масштаб 2 : 1 000 000. Полоса шириной 5 см была отрезана с правой стороны первоначального снимка.

40°. В основном они представляют собой следы разломов, а частично флексуры или линии, отражающие геоморфологическое строение.

В южной части фотоснимка хорошо видна линейная структура длиною более 100 км с ориентировкой СВ 80°. Это образование наблюдается также южнее, в Провансе, где оно отражает не линию разлома, а ось узкой незначительно нарушенной разломами антиклинали (антиклиналь Люберон) и заканчивается в виде прямого участка долины реки Ас, расположенного вне пределов обширной долины реки Дюранса, ориентированной в северо-восточном направлении (30°).

Вблизи от центра фотоснимка (фиг. 2) с трудом различаются разломы (сбросо-сдвиги), протягивающиеся в меридиональном направлении. Это, вероятно, связано с тем, что разломы развиты в мягких осадочных породах (черные верхнеюрские сланцы). По той же причине в восточной части фотоснимка неразличимы запрокинутые складки к западу от Динь.

Сравнение полученных данных с результатами полевых исследований. Весь исследуемый район покрыт геологическими картами масштаба 1 : 80 000. Некоторые из них исправлялись четыре раза; более чем для половины исследуемого района имеются опубликованные карты в масштабе 1 : 50 000. В результате полевых исследований этой территории были составлены карты различного масштаба вплоть до 1 : 10 000.



Фиг. 4. Схема расположения линейных форм рельефа, полученная по фотоснимку (фиг. 3).
Масштаб 1:1 000 000. Пояснения в тексте.

Настоящая работа не ставит своей целью подробное сравнение полевых данных и данных ЕРТС-1. Однако даже простое сопоставление интерпретации схематических тектонических карт и снимков со спутника ЕРТС-1 (фиг. 2) дает наглядное представление о преимуществах снимков ЕРТС для изучения сложного в тектоническом отношении региона.

Одним из основных результатов является установление однородности распределения и параллельности в ориентировке линейных структурных элементов как в метаморфическом массиве, так и в зоне развития смятых в складки осадочных пород. На детальных геологических картах сеть разломов более запутанна. Кроме разрывов, ориентированных ЮЗ—СВ, имеются многочисленные разломы, ориентированные ЮВ — СЗ, они почти неразличимы на фотоснимках ЕРТС-1.

Все это приводит к мысли, что большинство линейных структур юго-запад — северо-восточного простирания, различимых на фотоснимках ЕРТС, отражает разломы фундамента, тогда как разломы, ориентированные в направлении юго-восток — северо-запад, зафиксированные на геологических картах, развиты только в осадочном чехле и отделены от фундамента зоной «затухания» разрывов в триасовых отложениях.

В соответствии со структурными элементами, выделенными по дан-

ным ЕРТС, простирание юго-запад — северо-восток является основным в тектонической структуре Западных Альп, что обусловлено разломами фундамента. Это положение необходимо проверить путем более широкого изучения снимков ЕРТС и более тщательного сравнения с данными полевых исследований.

Заключение. В процессе изучения структурных связей между Альпами и Пиренеями (южная Франция) производился тщательный анализ фотоснимков ЕРТС западной части Французских Альп, которые затем интерпретировались с тектонической точки зрения. Выяснилось, что на снимках, полученных со спутника ЕРТС-1, отражаются некоторые крупные тектонические элементы, которые при наземных исследованиях часто замаскированы более мелкими, осложняющими их структурами. Примеров являются тектонические образования юго-запад — северо-восточного простирания (30—60°), которые интерпретируются как отражение глубоко развитых разломов фундамента, образованного смятыми в складки осадочными породами.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПРИБРЕЖНОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ЛИОНСКОМ ЗАЛИВЕ

М. Гюи

Введение. Лионский залив является наиболее предпочтительным объектом для исследования вопросов осадконакопления, так как этому сложному процессу посвящено большое количество работ, ранее проведенных в данном районе.

Цель программы «GOLION», положенной в основу исследования применимости данных ЕРТС-1, заключается: 1) в сравнительном изучении изменений картины осаждения морских осадков при различных метеорологических условиях; 2) в точном картировании голоценовых береговых линий и изучении хронологии осадочных образований.

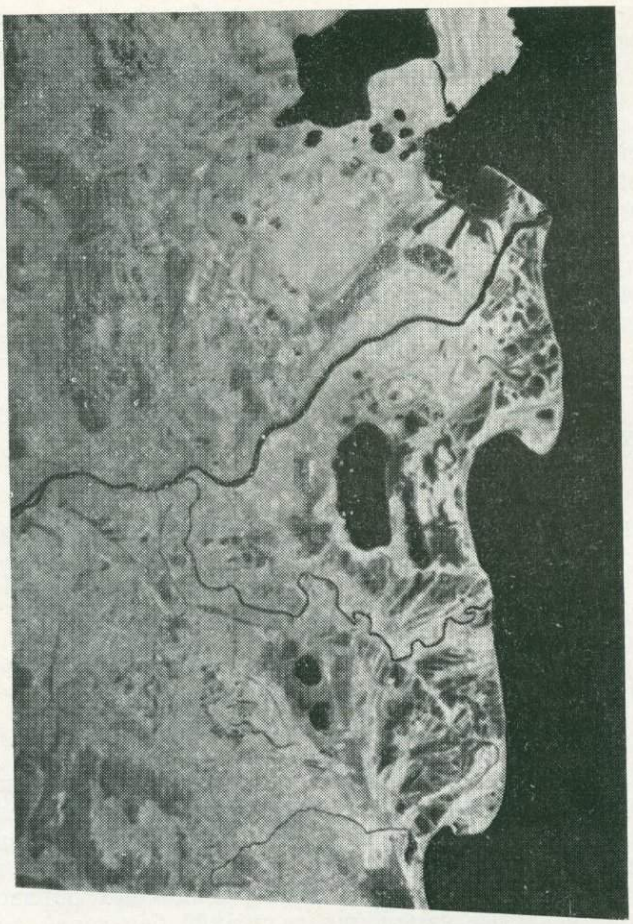
Небольшие и частые изменения очертаний береговой линии зависят от метеорологических условий, и их регистрация требует многократной съемки на значительной площади. Значительные изменения береговой линии обусловлены эпейрогеническими движениями и эвстатическими колебаниями уровня моря. Для изучения береговой линии предпочтительно использование снимков мелкого масштаба.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты первой стадии исследования. Было получено несколько хороших фотоснимков Лионского залива. Однако вследствие неблагоприятных метеорологических условий оказалось невозможным провести повторную съемку, и поэтому фотографирование береговой линии было ограничено районом дельты Роны в восточной части Лионского залива.

Тем не менее были достигнуты важные результаты: 1) снимки, полученные в зонах 6 и 7 МСС, ясно фиксируют существовавшие ранее береговые линии в районе дельты Роны и позволяют непосредственно их закартировать; 2) современные изменения морфологии береговой линии контролируются геологической структурой (данные МСС 5).

Картирование и определение возраста древних береговых линий. Фиг. 5 представляет увеличенную до масштаба 1 : 500 000 часть фотоснимка 1078-09564, полученного в зоне 6 МСС. Фиг. 6 показывает контуры главных береговых валов древних русл Роны.

Снимки наглядно иллюстрируют рост дельты реки в южном направлении путем многократного отложения наносов, в результате чего образовался характерный рисунок площади, занятой отложениями дельты.



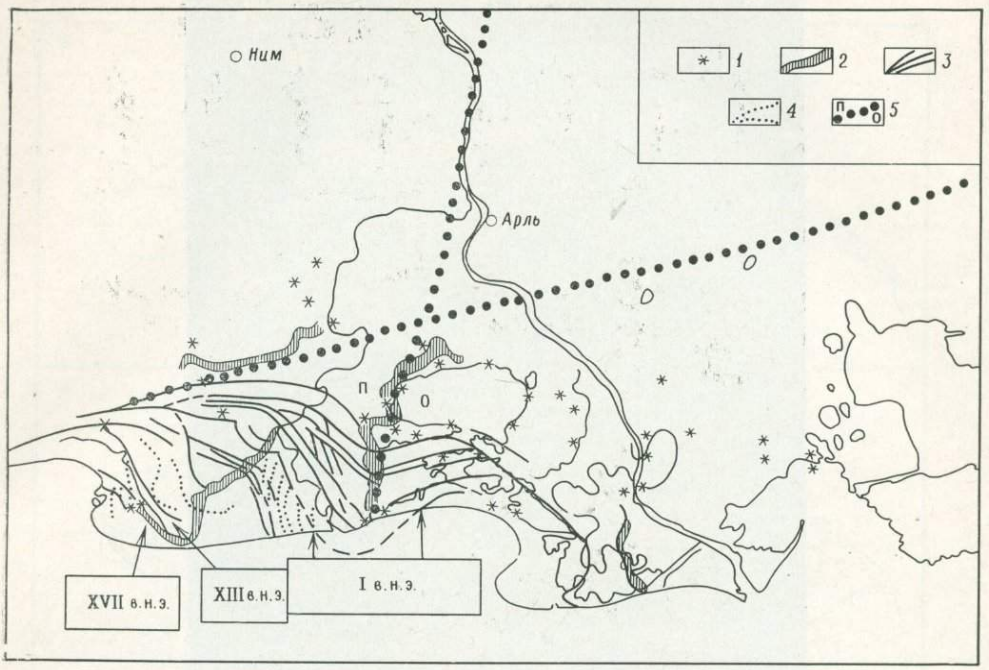
Фиг. 5. Увеличенное изображение северо-западной части фотоснимка 1078-09564, полученного в зоне 6 МСС, показывающего дельту Роны.

Аллювиальные береговые валы были известны и до получения данных ЕРТС-1 [2]. Однако прежде не удавалось соединить отдельные элементы гребней валов, чтобы реконструировать древние береговые линии (фиг. 9), и, таким образом, не удавалось получить детальную картину. Кроме того, несогласие между линиями валов говорит о том, что наращение дельты в голоцене не было непрерывным. Возможная причина такого несоответствия заключается в изменениях уровня моря или в локальных тектонических явлениях.

Путем использования археологических данных при картировании береговых валов можно с большой точностью датировать различные фазы их образования. Фиг. 6 показывает, что все остатки древнеримских сооружений расположены за пределами хорошо различимой линии береговых валов. В настоящее время проводится подробный анализ этой ситуации.

На первых фотоснимках ЕРТС-1 восточная часть дельты получилась менее четко, чем на аэрофотоснимках. Для окончательного картирования этого района необходимо проведение съемок с помощью спутника ЕРТС весной и летом при различных уровнях воды.

Структурно-геологический контроль некоторых аномалий. На фотоснимках ЕРТС-1 хорошо наблюдается контролирующее значение разло-



Фиг. 6.

1 — остатки римских сооружений. Береговые валы (2—4): *2* — бывших русл Роны; *3* — уже известные; *4* — новые; *5* — разломы, контролировавшие динамические процессы в голоцене; *П* — поднято, О — опущено.

мов в районе дельты Роны. Так, на снимках, полученных в зонах 5 и 6 МСС (фиг. 5), наблюдаются контуры бывших границ дельты Роны в восточной части Камарга. Четкость этих границ несколько ослаблена более поздними наносами в результате медленного погружения местности. Западная часть была сильно эродирована, и здесь отчетливо видны древние береговые линии.

На снимках, полученных в зоне 5 МСС, фиксирующей малейшие изменения растительного покрова, видна граница между двумя участками, которая представляет собой прямую линию и, возможно, является разломом, протягивающимся на северо-восток 30° (фиг. 7). Нефтепоисковые скважины, пробуренные несколько лет тому назад, зарегистрировали значительные изменения мощности третичных отложений по разную сторону от этой линии. Однако точное местоположение разлома и характер его активности пока не известны.

Самая северная береговая линия в западной части территории представлена серией кривых линий, которые асимптотически приближаются к морфологической линии, ориентированной примерно в широтном направлении (70°). Восточная часть этой линейной формы рельефа, фиксируемая по выходам мезозойских пород, известна в качестве крупного разлома.

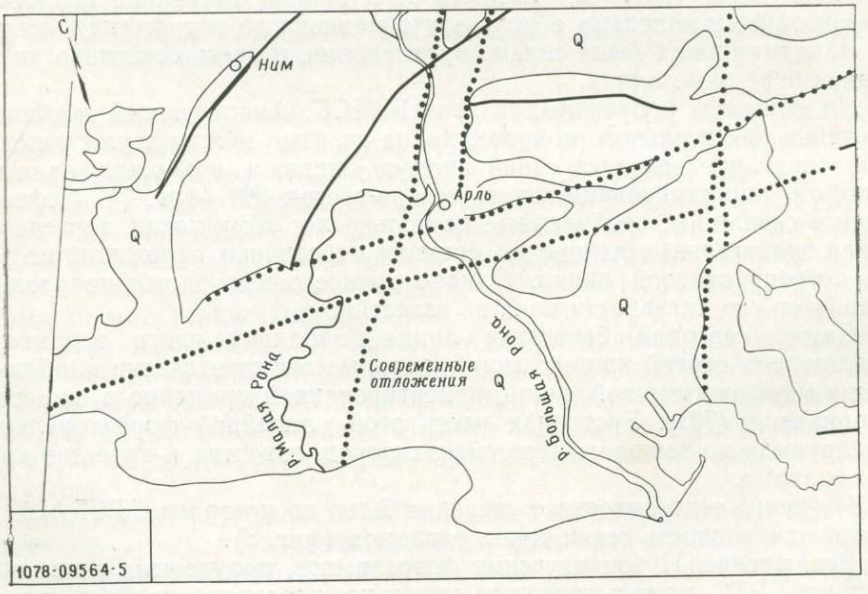
Изучение тектонического строения Альп по программе PYRALP показало однородность сетки таких разломов (фиг. 8).

Заключение. Путем изучения фотоснимков, полученных с помощью спутника ЕРТС, можно проводить детальное исследование динамических седиментационных процессов, происходивших в районе Лионского залива в голоцене (фиг. 9).

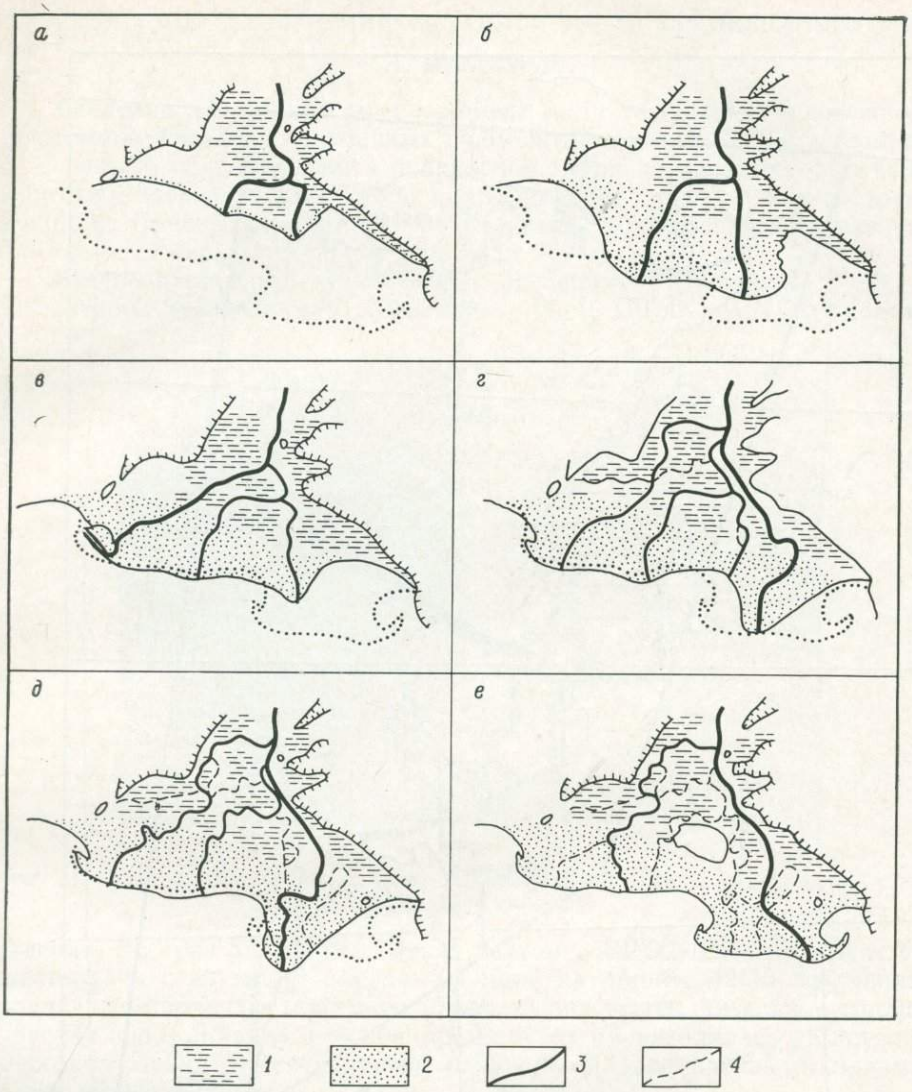


Фиг. 7. Увеличенное изображение северо-западной части фотоснимка 1078-09564, полученного в зоне 5 МСС.

Видны линейные формы рельефа — разломы, выделенные по изменениям в растительном покрове.



Фиг. 8. Линейные формы рельефа, параллельные сети разломов, исследованных по программе PYRALP.

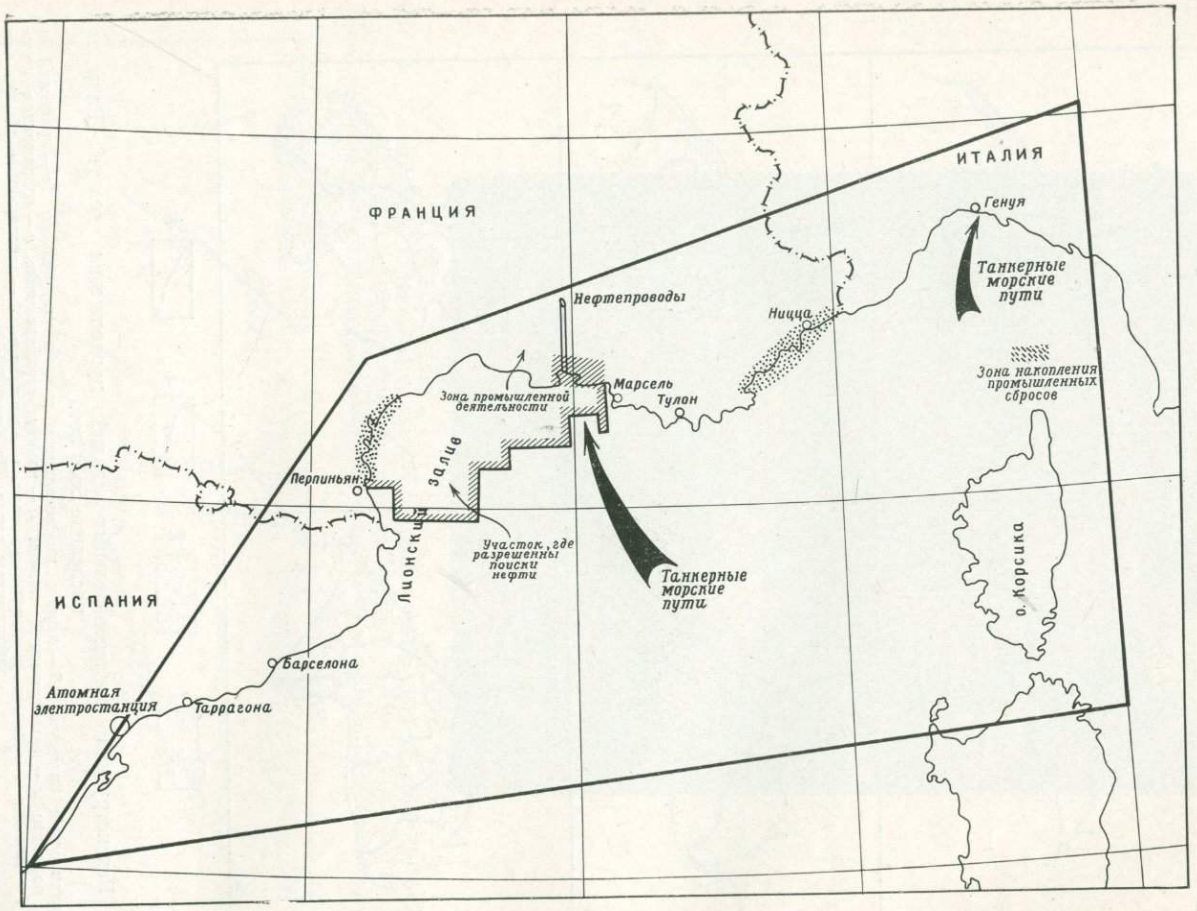


Фиг. 9. Реконструкция последовательных стадий продвижения дельты Роны за последние 5500 лет.

а — климатический оптимум; *б* — период максимального приращения дельты; *в* — греческий и римский периоды; *г* — позднеримский период; *д* — раннее средневековье; *е* — современное положение; *1* — болота; *2* — пляжи и прибрежно-озерные отложения; *3* — действующие русла; *4* — заброшенные русла. По Круи, 1955.

Можно соответственно оценить влияние эвстатических движений, климатических изменений, вызывающих увеличение стока, и оценить структурный контроль над динамическими процессами путем детального изучения взаимосвязи геоморфологических признаков, дополненных наземными исследованиями археологических остатков и седиментологических образований.

К сожалению, неблагоприятные метеорологические условия привели к тому, что площадь исследования была ограничена дельтой Роны. Однако предполагается провести в весенний период исследования западной части Лионского залива, что завершит данную работу.



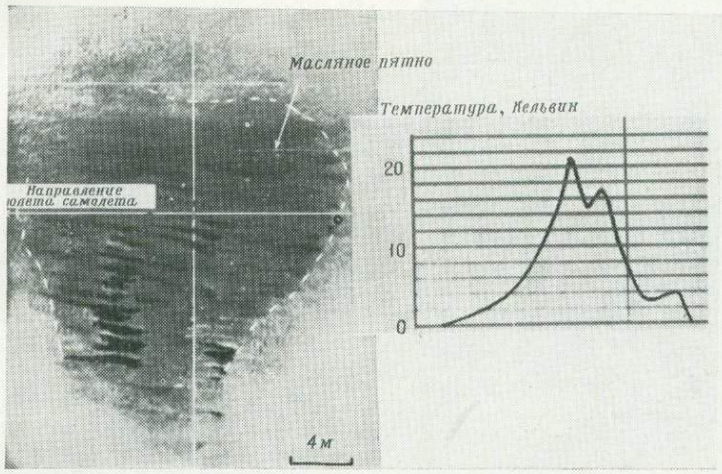
Фиг. 10. Проблемы загрязнения среды, с которыми сталкиваются в зоне исследований.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ

А. Фонтанель

Введение. Цель настоящей работы — исследование возможности применения снимков, полученных с помощью спутника ЕРТС в комплексе с аэрофотосъемкой, для обнаружения и распознавания различных веществ, загрязняющих море и прибрежные озера в юго-восточной Франции. Средиземное море — почти замкнутый бассейн, и загрязнение его является серьезной проблемой (фиг. 10).

Результаты. Комбинированный эксперимент проводился 19, 20, 21 сентября двумя организациями P.I. и Co.I (I.F.P. и CNEXO соответ-



Фиг. 11. Обнаружение масляного пятна на поверхности моря с помощью 32-гигагерцевого дифрактометра.

ственно) на трех различных витках спутника ЕРТС-1. Эксперимент осуществлялся следующим образом: в море на широте 42°30′ выливались различные продукты (сурепное масло, сырая нефть, дизельное топливо, пресная вода) и затем в разное время суток производилась регистрация местоположения этих продуктов различными аэробортовыми приемниками, включающими:

цветное и инфракрасное фотографирование (фотокамеры Wild, RC 10);

телевизионную камеру для ночного наблюдения;

инфракрасное сканирующее устройство в зоне 3—5 мкм;

инфракрасное сканирующее устройство в зоне 8—14 мкм;

микроволновый дифрактометр с частотой 32 ГГц.

Из-за бурного состояния моря удалось вылить только сурепное масло в объеме 6 м³. К сожалению, вследствие плотной облачности не были получены снимки масляного пятна со спутника ЕРТС-1. Что касается устройств, установленных на борту самолета, то пятно было зарегистрировано только телекамерой, сканирующим устройством в зоне 8—12 мкм и дифрактометром 32 ГГц. Пятно сурепного масла четко обнаруживалось этими тремя устройствами. Однако в данной работе описываются только результаты применения микроволнового дифрактометра. В левой части фиг. 11 приводится изображение пятна, полученное вертикально установленной 35-миллиметровой камерой (обычно используемой для определения координат во время полета самолета).

В правой части фиг. 11 приводится график, иллюстрирующий различия в температурной яркости пятна и окружающей воды, зарегистрированной во время прохождения самолета над пятном. Длина антенны 0,70 м; ширина луча около 1°. Ось антенны была направлена назад по курсу самолета и имела наклон относительно вертикали от 5 до 10°. Теплочувствительность равнялась 2 К. Самолет прошел над пятном 14 раз с 9 до 12 часов дня на высоте 250 м со скоростью 75 м/с. Применялась попеременно горизонтальная и вертикальная поляризация. Однако заметных различий между двумя типами поляризации не было замечено. Между различными залетами изменения температуры пятна и окружающей воды составляли от 10 до 34 К.



Фиг. 12. Фотоснимок ЕРТС-1 1075-09393-4.
Масштаб 1:1 000 000. Стрелкой показано пятно промышленных сбросов, содержащих окислы железа и серную кислоту.

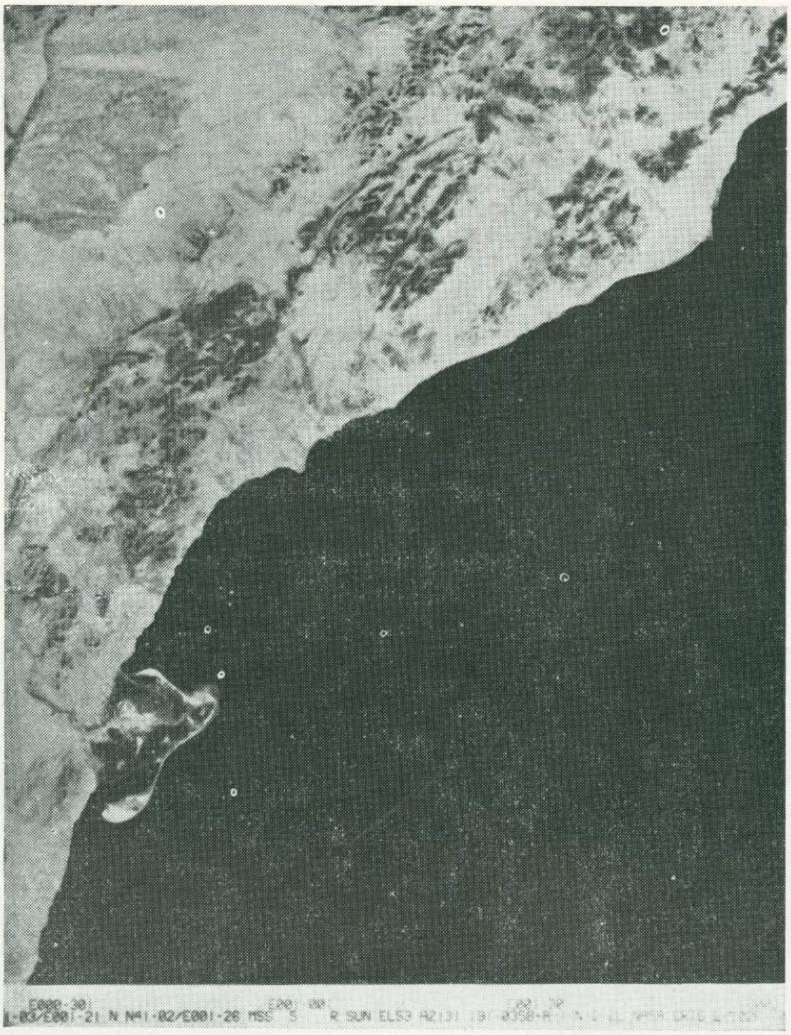
В результате исследований, проводимых организациями P.I. и Co.I, с помощью дистанционных приемников в видимом и инфракрасном диапазонах получен большой объем информации по прибрежным водоемам и промышленным зонам на юго-восточном побережье Франции. Однако здесь эти данные не приводятся, поскольку они не имеют прямого отношения к исследованиям с помощью спутника ЕРТС.

Район, показанный на фиг. 10, до сих пор еще не покрыт полностью съемкой со спутника ЕРТС, и в нем не проводился 18-дневный эксперимент. Получен лишь один фотоснимок района. Тем не менее на фотоснимке ЕРТС обнаружено несколько интересных особенностей. В этой работе мы ограничимся лишь двумя примерами.

Некоторые промышленные предприятия сбрасывают свои отходы в море недалеко от острова Корсика. Сбросы производят нерегулярно и в самых различных местах. Но жители Корсики обеспокоены тем, что подобные сбросы могут оказаться опасными для экологического баланса этого района, и недавно была организована экспедиция с целью взятия проб загрязненной воды и определения ее вреда для морской флоры и фауны. Сбросы сточных вод, названные красной грязью, содержат окислы железа, титана и серную кислоту. На фиг. 12 показано пятно красной грязи длиной 25 км и шириной 2—3 км. Этот пример показывает, что при благоприятных погодных условиях целесообразно применение искусственных спутников для обнаружения и определения местоположения сбросов подобного типа.

На фиг. 13 показана обширная «аномалия» в северной части дельты реки Эбро, протянувшаяся в 180 км от берега на 180 км вдоль побережья Испании.

Происхождение этой «аномалии» до сих пор не известно, но очевидно, что мелкомасштабное изображение, полученное со спутника ЕРТС, вполне подходит для обнаружения явлений загрязнения окружающей среды столь крупных размеров. На июнь 1973 г. намечено проведение экспериментов, чтобы выяснить происхождение этой «аномалии», которая располагается недалеко от ядерной электростанции.



Фиг. 13. Крупная аномалия неизвестного происхождения в море.

Заключение. Из приведенных примеров видно, что мелкомасштабные снимки со спутника ЕРТС вполне пригодны для обнаружения крупных явлений загрязнения окружающей среды.

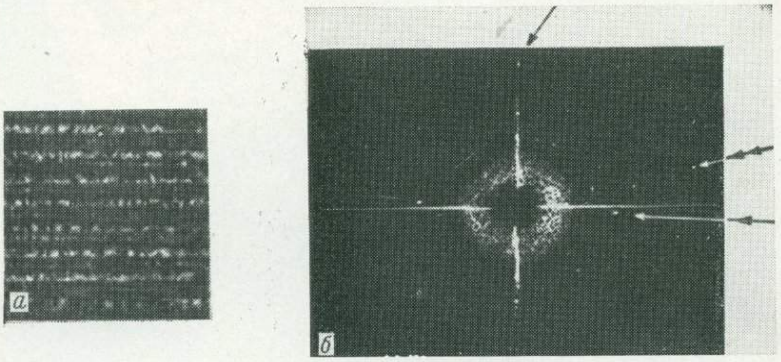
ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЕРТС

А. Фонтанель

Введение. Цель данного раздела исследований — улучшение качества фотоснимков, полученных посредством ЕРТС, для облегчения процесса их геологической, геофизической или какой-либо другой интерпретации, а также для автоматизации некоторых стадий этого процесса. Использовались методы оптической и цифровой фильтрации.

Двумерные спектры фотоснимков МСС. Оптическая трансформанта Фурье всех фотоснимков МСС представляет собой две серии светящихся точек, расположенных под углом 92 и 77° к линиям сканирования. Интервал между этими точками соответствует расстоянию в 160 и 85 м

на местности. Фиг. 14 показывает увеличенное изображение (примерно в 12 раз) с исходного изображения в масштабе 1 : 1 000 000 фотоснимка МСС поверхности моря и его двумерный спектр. Этот эффект проявляется на любом спектре снимка МСС, но особенно хорошо он наблю-



Фиг. 14.

а — увеличенное изображение участка фотоснимка МСС; *б* — двумерный спектр фотоснимка *а*. Стрелки (на правой стороне) показывают положение побочных максимумов (точек).



Фиг. 15А. Часть исходного фотоснимка, полученная посредством когерентной оптической системы.

Снимок 1078-9562-6, масштаб 1:1 000 000.



Фиг. 15Б. Результат оптической направленной фильтрации изображения 15А, проведенной с целью выявления тектонических образований, имеющих ориентировку СВ—ЮЗ.

дается на участках с низким контрастом деталей. Он может затруднять различные исследования спектров МСС, в частности встретились большие трудности при попытке обнаружить по спектрам фотоснимков древнеримские сооружения в северной Италии.

Когерентная оптическая фильтрация. Фотоснимки на фиг. 15А и 15Б представляют юго-западный угол снимка, полученного со спутника ЕРТС, взятый в качестве примера использования когерентной оптической фильтрации для выявления тектонических образований в районе со сложным геологическим строением (ЕРТС-1 — 1078-09562). Основные простирания выявились после направленной фильтрации [3, 4]. Выделенные структуры соответствуют главным образом тектоническим разрывам, описанным в первой части настоящей работы (Ж. Гийемо).



Фиг. 16А. Исходный цифровой аэрофотоснимок (эталонный участок).

Цифровая обработка изображений. Авторы настоящей работы не получили от НАСА магнитные ленты, поэтому цифровая обработка была проведена на аэрофотоснимках эталонных участков. Фиг. 16А показывает исходный цифровой аэрофотоснимок, а фиг. 16Б — тот же снимок после усиления контраста.

При интерпретации аэрофотоснимков применялся также метод цифровой направленной фильтрации.

Общее заключение. В настоящей работе представлены результаты исследований по четырем программам использования данных спутника ERTC. Необходимо отметить, что все четыре программы исследований осуществлялись в тесном контакте между отделами организации P.Is, хотя с первого взгляда может показаться, что решаемые задачи абсолютно различны.

Например, разломы, зафиксированные в районе Комарг, обусловившие различные седиментационные явления (программа GOLION), изучались гораздо шире благодаря структурно-геологическим исследова-



Фиг. 16Б. Результат усиления контраста снимка, помещенного на фиг. 16А.

ниям, проводимым севернее по программе PYRALP. Нет нужды подчеркивать связь, существующую между седиментологией и проблемами загрязнения прибрежных районов. Что касается программы TRONU, затрагивающей проблему оптической и цифровой обработки информации, то она была применена для улучшения качества данных, полученных в процессе исследований по всем четырем программам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Debelmas J., Lemoine M.,* L'Information Scientifique, Edit. Baillière et fils, Paris, pp. 1—33, 1964.
2. *Fontanel A., Grau G., Laurent J., Montadert J.,* Etude des photographies aériennes par diffraction de la lumière cohérente, Actes Symp. Intern. Photo-interpretation, Edit. Technip. Paris, III, pp. 13—22, 1967.
3. *Kruit C.,* Sediments of the Rhone Delta, Mouton, The Hague, 1955.
4. *Pincus M. J., Dobrin M. B.,* Geological Application of Optical Data Processing, Journ. Geophys. Res., **71** (20), pp. 4861—4869, 1966.

ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД РАЙОНА АТЛАНТИК-СИТИ (ШТАТ ВАЙОМИНГ) С ПОМОЩЬЮ КАРТ СООТНОШЕНИЙ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА

Р. Винсент

(Мичиганский институт изучения окружающей среды, Анн-Арбор, Мичиган)

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача данного исследования сводилась к разработке метода картирования с помощью снимков ЕРТС крупных выходов железных руд, проверке его на месторождениях железных руд в районе хребта Уинд-Ривер (Вайоминг) и к оценке возможности применения метода для геохимических поисков как в исследуемом районе, так и в любых других хорошо обнаженных регионах. Метод заключается во введении эмпирических поправок на атмосферные влияния путем определения соотношений яркости изображения одних и тех же объектов на снимках, сделанных в разных зонах спектра. Он предусматривает также получение графического изображения соотношений аналоговым способом и составление эталонных карт автоматического распознавания для максимально возможного количества классов пород с использованием в качестве эталона, там где это возможно, лабораторных данных.

В опубликованной ранее статье [3] было дано описание последовательности обработки данных для внесения поправок на атмосферные влияния и характер освещенности: величины отражения наиболее темных объектов (обычно это тени или водные поверхности) вычитаются из величин отражения всех других точек снимка по данным каждого из двух каналов МСС; полученные для каждой точки разности яркости на снимках одного канала делятся затем на величины разностей яркости изображения тех же точек на снимках другого канала. Выявленные таким путем соотношения яркости изображения умножают на величину яркости изображения, определенную в лабораторных условиях для этой же точки. Таким образом получают соотношение яркости изображений в двух выбранных спектральных каналах для каждой точки изображения исследуемой площади. Предполагается, что в результате указанной процедуры большинство помех, связанных с атмосферными явлениями и характером освещенности, исключается из соотношения величин яркости. Приведем пример. Типичные красноцветные породы (высокая интенсивность отражения в зоне спектра 5 и низкая в зоне 7) имеют соотношение R_{75} меньше 1,0; растительный покров, для которого характерна обратная спектральная картина, будет иметь соотношение R_{75} значительно больше 1,0. Дальнейшая обработка предусматривает ввод данных о соотношениях величин отражения в цифровые и аналоговые компьютеры для получения соответственно цифровых карт и аналоговых изображений. Планируется создание эталонных карт для распознавания различных классов пород, основанных на использовании не одного, а 2—4 наборов соотношений интенсивности отражения как основы для автоматического принятия решений.

Работы проводились в течение четырех месяцев со времени получения первых данных ЕРТС. Первоначально интерпретация основывалась

на сравнении аэрофотоснимков, геологических карт и величин соотношений, рассчитанных по лабораторным данным. Обработка данных ЕРТС выполнена для части площади, покрытой снимком Е-1013-17294, по материалам, собранным 5 августа 1972 г.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИЗУЧЕННОГО УЧАСТКА

Исходный эталонный участок, выбранный для исследования, расположен в районе Атлантик-Сити у южной оконечности хребта Уинд-Ривер (штат Вайоминг). В этом районе (по карте, составленной Ю. Бейли [1]), формация Голдмен-Медоуз сложена кристаллическими сланцами, кварцитами и метаморфизованными железистыми породами. Пачка железистых пород, содержащая в среднем 35% железа, состоит главным образом из магнетита и кварца с незначительным количеством хлорита, граната и амфибола. Именно в этом районе находится действующий железный рудник «Стил Корпорейшн» (США).

Непосредственно к югу и востоку от выходов свиты Голдмен-Медоуз обнажается формация Раундтоп-Маунтин-Гринстон, сложенная зеленокаменными породами (образовавшимися из базальтов) и зелеными сланцами. Юго-восточнее обнажается свита Майнерс-Дилайт, сложенная преимущественно граувакками, турбидитами, сланцами, конгломератами и зеленокаменными породами с шаровой отдельностью (образовавшимися из андезитов). К западу от железного рудника расположен батолит Луис-Лейк, сложенный преимущественно биотит-роговообманковыми диоритами и гранодиоритами и окаймленный мигматитами и серыми гнейсами. Дайки габбро-диабаза шириной около 100 м и длиной до 10 км образуют в батолите сложную сеть. Возраст всех перечисленных выше свит докембрийский.

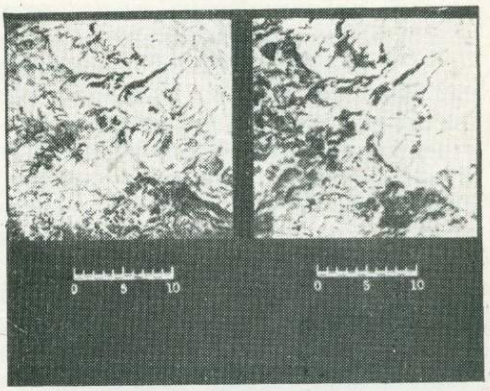
К северу от выходов свиты Голдмен-Медоуз залегает серия осадочных пород широкого возрастного диапазона — от докембрия до мезозоя, в основании которой лежат докембрийские песчаники. Эти отложения с несогласием перекрывают упомянутые выше метаморфические и изверженные породы и наклонены на северо-восток.

АЭРОФОТОСНИМКИ И ОДНОКАНАЛЬНЫЕ СНИМКИ ЕРТС ЭТАЛОННОГО УЧАСТКА

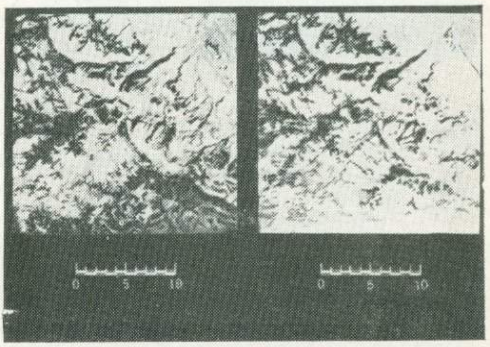
На фиг. 1 показан аэрофотоснимок, сделанный с большой высоты самолетом U-2 в октябре 1971 г. [2], и снимок в зоне 5 МСС ЕРТС эталонного участка. И аэрофотоснимок и снимок ЕРТС охватывают красную часть видимого спектра и имеют одинаковый масштаб (снимок ЕРТС по небрежности слегка смещен на север по отношению к аэрофотоснимку). Железный рудник (участок шириной 1 км, напоминает по форме вырванный коренной зуб) расположен в нижней правой части снимка ЕРТС. Он выделяется, вероятно, за счет тоновой насыщенности пленки, дающей хороший результат даже при умеренной яркости объектов. К западу от железного рудника в батолите Луис-Лейк пересекающиеся дайки габбро-диабазов (шириной порядка 1 элемента разрешающей характеристики снимков ЕРТС) можно различить и на аэрофотоснимке и на снимке ЕРТС. Следует отметить три момента: 1) железный рудник не представляется уникальным или хотя бы более отчетливым объектом по сравнению с другими участками кадра; 2) осадочные толщи в верхнем правом углу снимка кажутся похожими одна на другую и 3) растительный покров (темный) снимка ЕРТС в зоне 5 легче отличить от участка, не покрытого растительностью, чем на аэрофотоснимке

(не исключено, что это сезонный эффект). Темные тени (в долине северо-восточного простирания) не отличимы от участков, покрытых растительностью, и на снимке ЕРТС и на аэрофотоснимке.

На фиг. 2 изображена та же территория. Аэрофотоснимок был сделан в диапазоне волн 0,51—0,9 мкм, а снимок ЕРТС (в зоне 7 МСС) — в диапазоне 0,8—1,1 мкм. Несмотря на то что изображение железного рудника темнее окружающих объектов, ни на аэрофотоснимке, ни на снимке в зоне 7 ЕРТС в инфракрасной области оно не выделяется на окружающей территории в отличие от его изображения в видимой красной зоне спектра, где оно ярче средних значений отражения. Дайки габбро-диабазов батолита Луис-Лейк фактически неразличимы на снимке ЕРТС в зоне 7; осадочные толщи в верхнем правом углу снимка кажутся похожими одна на другую и на аэрофотоснимках и на снимках ЕРТС, а растительный покров (яркий) в верхнем правом углу снимка ЕРТС в зоне 7 больше отличается от участка, не покрытого растительностью, чем на аэроснимке с искаженным цветом. Различие, возможно, обусловлено тем, что данные были собраны в разное время.



Фиг. 1. Аэрофотоснимок и снимок ЕРТС в видимой красной зоне спектра; южная часть хребта Уинд-Ривер (штат Вайоминг).
Масштаб выражен в км.



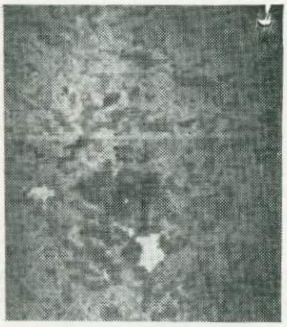
Фиг. 2. Аэрофотоснимок и снимок ЕРТС в инфракрасной зоне спектра; южная часть хребта Уинд-Ривер (штата Вайоминг).
Масштаб выражен в км.

КАРТЫ СООТНОШЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЭТАЛОННОГО УЧАСТКА

Для эталонного участка получено 2 типа карт соотношений: посредством ЭЦВМ и аналоговым способом. Цифровая карта используется при количественном анализе для проверки точности метода соотношений. На фиг. 3 показана карта соотношений интенсивности отражения R_{75} (зона 7 ЕРТС, «деленная» на зону 5) в цифровом виде. Фиг. 3 первоначально была цветной. Расшифровка цветов: зеленый — растительный покров; лиловый — «смесь» обнаженных горных пород и растительного покрова; синий — обнаженные горные породы; красный — магнетит, возможно, с примесью зеленокаменных пород, а также другие богатые железом отложения. Темно-красный цвет виден только в пределах железного рудника и по краям рудничного карьера, где наблюдаются скопления шлама или шлейфов железистых пород.

Интенсивность отражения атмосферы за вычетом величины отражения от наиболее темного объекта составляет около 12% средней величины сигнала в зоне 5 и менее 4% в зоне 7; район Атлантик-Сити хол-

мистый, расположен на высоте около 2,5 км над уровнем моря. В двух других точках, расположенных восточнее, приблизительно на расстоянии $^1/_2$ и $^3/_4$ кадра ЕРТС, на плоских открытых равнинах, имеющих высоту над уровнем моря на 0,3 км меньше, чем в упомянутом выше районе, интенсивность отражения атмосферы на снимках в зонах 5 и 7 соответственно составляет 22 и 4% по отношению к среднему уровню сигнала и за вычетом величины отражения от темного объекта. Без внесения поправок погрешности в соотношениях отражений были бы больше для темных объектов в зоне 5 в пределах данного снимка и значительно варьировали бы в разных частях кадра ЕРТС. Поскольку снимки ЕРТС для рассматриваемого монтажа были сделаны в ясный, сухой день на территории с высокими средними отметками рельефа, можно сделать вывод, что при обработке данных и обобщении результатов поправки на атмосферные влияния более необходимы для менее благоприятных условий над участками, где рельеф ниже.



Фиг. 3. Цифровая карта соотношений интенсивности отражения — R_{75}, полученная по данным ЕРТС с помощью ЭЦВМ; южная часть хребта Уинд-Ривер (штат Вайоминг).

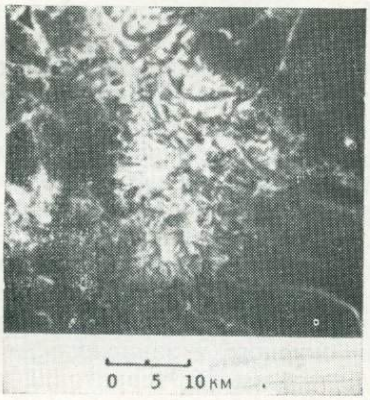
Были определены соотношения интенсивности отражения R_{75}, рассчитанные по лабораторным данным, имеющимся в отделе спектральной информации о земных ресурсах НАСА при Джонсоновском космическом центре (Хьюстон, штат Техас).

Оказалось, что не все категории данных представлены на эталонном участке. Нами вычислены также величины отражений, отвечающие данным цифровой карты на фиг. 3. Для расчета коэффициентов отражения в лабораторных условиях предполагалось использовать квадратные фильтры. В этом случае расчетная величина R_{75} для растительного покрова меньше, чем определенная по данным ЕРТС, из-за быстрого увеличения отражения от растительного покрова для волны длиной 0,67 мкм. Другие расчетные значения должны быть близкими к полученным по данным ЕРТС, которые являются наилучшими из имеющихся в настоящее время замеров. Все хорошо обнаженные породы (граниты, известняки, зеленокаменные породы, серые пески, а также магнетит, гематит) в районе Атлантик-Сити имеют соотношение R_{75}, полученное по снимкам ЕРТС, в пределах значений, рассчитанных для эталонных образцов в лаборатории. Однако только спектры образцов пород с эталонного участка, полученные в лаборатории, дадут окончательный ответ на вопрос об абсолютной точности метода.

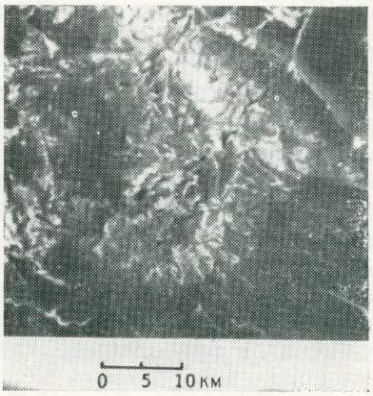
Необходимо остановиться на примечании к фиг. 3. Во-первых, в лабораторных условиях для каждого рассматриваемого класса пород получают экстремальные значения коэффициентов отражения R_{75} (самые высокие и самые низкие), в то время как внутри каждого класса возможны их вариации. Во-вторых, окончательные выводы по классификации пород должны быть сделаны не по единичному определению, а по двум-четырем замерам коэффициентов отражения. В дальнейшем планируются работы по использованию лабораторных данных о крайних значениях коэффициентов отражения для исследуемых классов пород, с тем чтобы найти методику отбора коэффициентов, необходимых для составления карт автоматического распознавания.

Другой разновидностью карты соотношений величин отражения служит изображение аналоговых соотношений. При этом получают непре-

рывный ряд значений соотношений интенсивности отражения так, как если бы они были получены по единому каналу информации. Изображение аналоговых соотношений R_{75} для всего района Атлантик-Сити и большей части его окрестностей показано на фиг. 4. На общем фоне отчетливо выделяется железный рудник (темный). Осадочные породы в верхней правой части изображения (чуть дальше от угла, чем на фиг. 1 и 2) неразличимы, в то время как дайки габбро-диабазов батолита Луис-Лейк видны хорошо. И наконец, различия между участками, покрытыми растительностью (более яркие) и не покрытыми (более тем-



Фиг. 4. Снимок ЕРТС, соответствующий соотношению R_{75} и полученный аналоговым способом; южная часть хребта Уинд-Ривер (штат Вайоминг).



Фиг. 5. Снимок ЕРТС, соответствующий соотношению R_{74} и полученный аналоговым способом; южная часть хребта Уинд-Ривер (штат Вайоминг).

ные), на этом изображении видны лучше, чем на аэрофотоснимках или однополосных снимках ЕРТС.

Изображение соотношений интенсивности отражения R_{74}, полученное аналоговым способом для того же района (фиг. 5), показывает, что железный рудник (темный, но светлее воды) отличается от всех других точек кадра. Юрские отложения (достаточно светлые) и маломощные темные слои явно осадочного происхождения четко отличаются от соседних толщ осадочных пород в верхней правой части фотоизображения соотношений R_{74}. Ни на одной другой фотографии или снимке (фиг. 1—4) эти отложения не видны настолько хорошо. Растительный покров легко отличить от участков, не покрытых растительностью, как, например, на снимке ЕРТС в зоне 5 на фиг. 1.

Снимки соотношений интенсивности отражения, полученные аналоговым способом, позволяют геологам или другим специалистам обратить внимание на объекты, отличающиеся химическими свойствами от окружающей обстановки. Карты соотношений величин отражения содержат сведения, которые при визуальной интерпретации аэрофотоснимков или однозональных снимков ЕРТС остаются неразличимыми или различаются с трудом. Более того, соотношения величин отражений представляют собой величины безразмерные, с которыми можно сравнивать лабораторные данные в точках, представляющих интерес. Приведенные материалы свидетельствуют о наличии геохимической информации в данных ЕРТС. Необходимо произвести дальнейшие расчеты и получить новый фактический материал, чтобы заинтересованные организации смогли использовать его для создания надежных классификаций.

ВЫВОДЫ

Приведенные выше материалы дают возможность сделать следующие общие выводы.

1. Карты соотношений величин отражения, составленные по данным снимков ЕРТС, более наглядны, чем аэрофотоснимки или однозональные снимки ЕРТС; особую ценность они представляют для районов с густым растительным покровом.

2. Некоторые элементы геологических структур, такие, как дайки батолита Луис-Лейк, размеры которых меньше разрешающей способности систем ЕРТС, одинаково хорошо различаются на однозональных снимках ЕРТС, на снимках соотношений зон ЕРТС и на аэрофотоснимках, сделанных с большой высоты.

3. Снимки ЕРТС и снимки соотношений содержат геохимическую информацию; в этом их преимущество по сравнению с аэрофотоснимками, имеющими ограниченный диапазон спектра. Окислы железа легче распознаются на снимках соотношений, чем на однозональных снимках ЕРТС или на аэрофотоснимках, сделанных с большой высоты. Поскольку многие металлические руды встречаются в ассоциации с окислами железа, снимки ЕРТС можно использовать при разведке полезных ископаемых. Изменения соотношений между различными типами горных пород и железосодержащими минералами можно использовать также при общем рекогносцировочном геологическом картировании, основываясь на различиях в проявлениях соединений окисного и закисного железа. Геологические исследования обширных и удаленных территорий с помощью спутников должны обходиться значительно дешевле, чем с самолетов.

4. Используя соотношения величин отражения на снимках ЕРТС, снятых в разных зонах спектра, возможно составление карт автоматического распознавания, которые позволят отделить выходы горных пород и почв от всех прочих объектов кадра (в пределах пространственной разрешающей характеристики снимков ЕРТС) и выявить две-четыре характерные группы, каждая из которых будет представлена одним или несколькими типами пород.

5. Наблюдавшееся до сих пор соответствие абсолютных значений соотношений интенсивности отражения, полученных съемкой ЕРТС и в лаборатории, стимулирует использование последних в качестве эталонов геологических объектов; в случае успеха окажется возможным проводить автоматическую рекогносцировку геологически не изученных районов земного шара (при благоприятных атмосферных условиях).

6. Первые количественные данные показывают, что для получения согласованных результатов (при любом методе обработки данных) по эталонным участкам, расположенным на больших расстояниях друг от друга, либо результатов, полученных с большим перерывом во времени, требуется внесение поправок на влияние атмосферы. Эмпирические поправки на влияние атмосферы при использовании метода соотношений представляются эффективными для эталонных участков, расположенных высоко над уровнем моря, но требуют проверки в случае низменных участков.

7. Метод, применявшийся в процессе данного исследования, пригоден для использования не только в геологии, но и в других научных областях, например при картировании почв, расчете биомасс и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bayley R. W.*, A Preliminary Report on the Precambrian Iron Deposits near Atlantic City, Wyoming, USGS Bull. 1142-C, pp. C1 — C23, 1963.
2. *Dorr J. A.*, Private Communication, Dept. of Geology and Mineralogy, Univ. of Michigan, 1973.

3. *Vincent R. K.*, An ERTS Multispectral Scanner Experiment Mapping Iron Compounds, Proc. of the Eighth Intern. Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 1973; ERTS-1, Report № E72-10181.

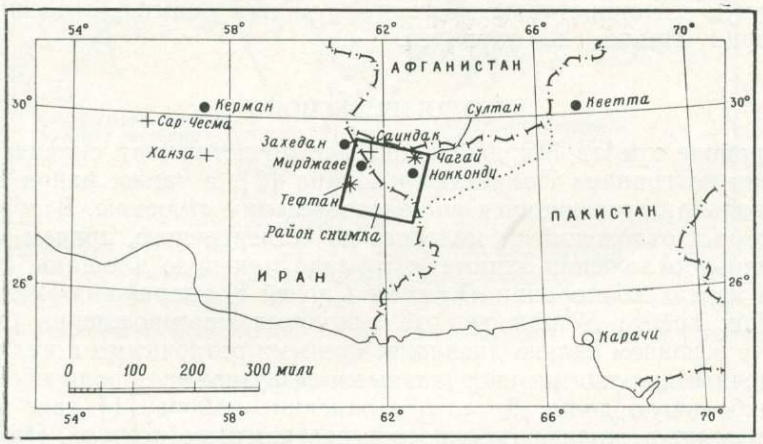
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНИМКОВ, СДЕЛАННЫХ СО СПУТНИКОВ ЕРТС-1, ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ РУД В ПАКИСТАНЕ (БЕЛУДЖИСТАН)

Р. Шмидт

(Геологическая служба США, Вашингтон)

ВВЕДЕНИЕ

Данное исследование основано на использовании снимков ЕРТС-1 как уникального и удобного средства выявления крупных рудных тел низкосортных сульфидов меди в районе Саиндак пустыни Белуджистан (фиг. 1), а также для прогнозирования аналогичных месторождений в исследуемом регионе и на соседних территориях.



Фиг. 1. Обзорная карта района Саиндак.

Геологическое картирование района Саиндак проводилось в 1962 г. Предполагалось, что полезные ископаемые этого района имеют определенную экономическую ценность. Основные результаты работы опубликованы Ахмедом и др. [1]. После открытия в 1962 г. месторождения сульфидов меди были отмечены некоторые характерные их особенности, позволяющие использовать оптические дистанционные методы исследования, а также цветную аэрофотосъемку, которую считали наиболее приемлемой.

Открытие крупного месторождения медно-порфировых руд в Сар-Чесме, близ Кермана, Иран (фиг. 1), и позднее месторождений к северо-западу и северо-востоку от Сар-Чесме повысило интерес к району Саиндака, как к потенциальному источнику промышленных запасов меди. Разведка месторождений в районе Саиндака недавно была возобновлена Геологической службой Пакистана.

Вся западная часть Пакистана покрыта фотогеологической рекогносцировочной съемкой масштаба 1 : 253 440 [2], но детально закартировано, вероятно, менее 1% площади провинции Чагай. Предварительная разведка полезных ископаемых проводилась выборочно, главным

образом на месторождениях с высокосортными рудами, и если при этом обнаруживали месторождения бедных медно-порфировых руд, то из-за низкой для того времени сортности их не отмечали. Детальное топографическое картирование в этом районе также не проводилось.

Исследования по программе ЕРТС производились главным образом с помощью одного прозрачного позитива (ID 1125-05545) размером приблизительно 9,5 дюйма. При сравнении этого позитива со снимком ID 1143-05545 было, в частности, установлено, что некоторые белые пятна на снимке не связаны со снегом. Совмещенные оригиналы с искаженным цветом получали путем печати многоспектральных сканированных зон 4, 5 и 7 на желтой, красной и синей прозрачных пленках. Из пленок с различной плотностью цвета отбирался один комплект, позволяющий производить максимальную дифференциацию геологических структур и усиливать различия между изображением эолового песка и других геологических объектов белого цвета. Наиболее интересные участки сравнивали с данными предварительной геологической карты, сделанной на аэрофотооснове. Как правило, все закартированные геологические структуры легко распознавались на снимках ЕРТС. Совместное изучение фотогеологических карт и данных о перепаде высот рельефа обеспечивает правильную интерпретацию. Соседний участок снимка, относящийся к территории Ирана, не изучался.

ГЕОЛОГИЯ РЕГИОНА

В районе хребта Мирджаве интерес представляют складчатые сооружения на границе Пакистана и Ирана [2], а также район Нокконди, несколько отличающийся по геологическому строению. В обоих районах возраст отложений от мелового до четвертичного, причем меловые и третичные отложения занимают гораздо меньшую площадь, чем указано на картах корпорации «Хантинг Сарвей Корпорейшн» [2].

Район хребта Мирджаве, где находятся месторождения Саиндак, сложен в основном сильно дислоцированными осадочными и вулканогенно-осадочными толщами; интрузивные и эффузивные породы составляют здесь небольшую долю. Детальное описание района [1] дает хорошее представление о геологии всего этого пограничного региона. Отложения мелового возраста характеризуют изменение обстановки осадконакопления от морской до континентальной. Раннетретичные отложения указывают на мелководные морские фации, а позднетретичные и четвертичные отражают континентальные условия.

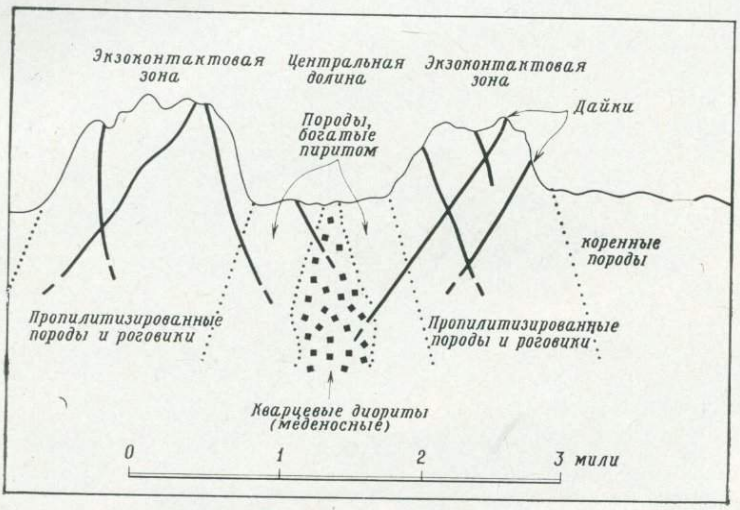
Проявления регионального метаморфизма обусловлено, вероятно, гранитными интрузиями, расположенными в 40 км к западу от района Саиндака, Иран. Они фиксируются на поверхности в нескольких километрах к западу и во многих местах к северо-западу от Саиндака вдоль хребта Мирджаве.

В районе Нокконди, точнее, на западном участке северной части холмов Чагай, породы также смяты в складки и нарушены разрывами, но отчетливой линейности в структурах не наблюдается. Интрузивные породы имеют более широкое распространение: здесь отмечаются вулканические некки и конусы, предполагается наличие куполов. В этом же районе находится бездействующий или потухший вулкан Султан.

ОЦЕНКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Несколько небольших медьсодержащих штоков кварцевых диоритов с порфировой структурой в Саиндаке прорывают всю толщу смятых в складки нижнетретичных пород. Штоки, возможно, представляют собой

купола, связанные с единым необнаженным гранитным телом длиною 8 км и шириной до 0,8 км. Группа штоков (или одно крупное тело) окружена зонами контактового метаморфизма и гидротермального изменения пород; в упрощенном виде это показано на приведенном поперечном профиле (фиг. 2). Штоки последовательно окружены зоной пород с повышенным содержанием сульфидов (до 15% пирита) и зоной пропилитизации, в которой пирокластические породы превращены в темные, богатые эпидотом роговики. Так как интрузивные породы прорывают несколько осадочных комплексов, то роговики образуются за счет разных пород: грубозернистых песчаников, алевритов, алевролитов с различным содержанием пирокластического материала. Известняки в



Фиг. 2. Гипотетический поперечный разрез месторождения медно-порфировых руд типа Саиндак.
Вертикальный масштаб сильно увеличен.

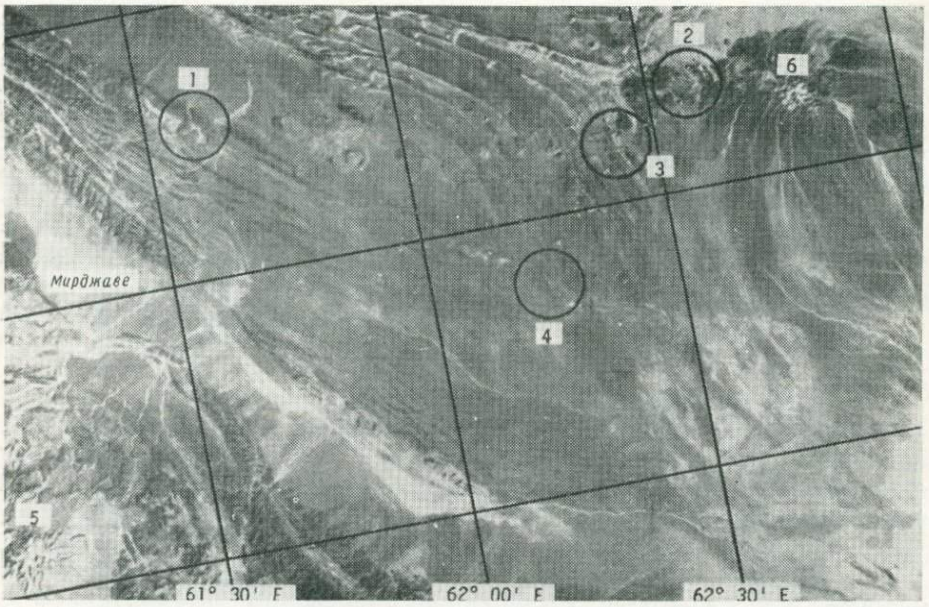
зоне изменения превращены в мрамор и тактит и иногда обогащены гематитом или сульфидами. Зоны измененных пород пересекаются многочисленными дайками, которые легко различаются на аэрофотоснимках. В этих зонах встречаются свинцово-медные жилы.

Центральное ядро штока, богатое сульфидами, и прилежащие к нему обогащенные пиритом породы (представленные несколькими первоначально осадочными породами) подверглись эрозии, что привело к образованию долины (светлый тон на снимках). Почвы пустынь, связанные с медно-порфировыми месторождениями, во многих районах земного шара дают четкие аномалии красного и оранжевого цветов; это характерно и для Саиндака, где окраска почв обусловлена наличием в них натроярозита. Интенсивность окраски почв центральной части долины в районе Саиндака значительно ослаблена из-за наличия аллювиального и эолового песчаного материала. В плане эта долина окружена симметричной каймой холмов, рельеф которых расчленен интенсивнее, чем в окружающей местности. Бедные медно-порфировые руды обычно ассоциируются с породами богатой сульфидами центральной части штока, однако уточнить это можно только при детальных полевых исследованиях.

Линейно-вытянутая центральная долина и прилегающие склоны холмов района Саиндака (фиг. 3) отсекаются на севере разломом, который, возможно, является краевым швом. Многочисленные дайки, отчетливо

видимые на аэрофотоснимках, вероятно, помогают выявлять ореолы изменения пород, но они слишком малы, чтобы их различить в очень мелком масштабе снимков, сделанных со спутника. Внутренняя часть долины имеет светлые тона; на совмещенных цветных оригиналах, сделанных автором, никаких аномалий цвета не устанавливается.

Центральная часть долины и краевая цепь холмов смещены влево по крупному разлому широтного простирания. Этот разлом был закартирован в 1961—1962 гг., но смещение зоны, богатой сульфидами, впер-



Фиг. 3. Задокументированная северная часть снимка ЕРТС-1, ID 1125-05545, зона 7 МСС.

1—4 — разведочные площади: *1* — медно-порфировых руд Саиндак; *2* — медных руд Эмирчах; *3* — Машкичах; *4* — гора Далил (кружки на местности имеют диаметр 12,8 км). Вулканы: *5* — гора Тефтан; *6* — гора Султан.

вые было обнаружено Ханом в 1972 г. И разлом, и смещение центральной части долины легко распознаются на снимке ЕРТС.

Постепенное увеличение высоты рельефа на запад от Саиндака обусловлено усилением регионального метаморфизма пород в этом направлении, связанного, вероятно, с интенсивным гранитным магматизмом на территории Ирана. О метаморфизованных породах имелись лишь весьма общие сведения и ранее измененные породы не картировались; в то же время на снимке ЕРТС они оконтуриваются очень легко. Метаморфизм пород в краевой части горного района, расположенного к северо-западу от Саиндака, не способствует образованию зон обогащения типа месторождения Саиндак, поскольку там возникают условия повышенного сопротивления процессам выветривания.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНИМКОВ ЕРТС-1 ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ РУД

Геологические карты, составленные при рекогносцировочных работах, описания, личный опыт, а также новая информация, содержащаяся на снимках ЕРТС, позволили дать оценку перспективным районам. На

основании совместного использования старых и новых данных были выявлены две новые разведочные площади, тогда как только по материалам ЕРТС не удалось открыть ни одной разведочной площади. Исследования показали также, что крупные участки исследованной территории вряд ли являются рудоносными, и наземные геологосъемочные поисковые работы на них не следует считать первоочередными.

ОЦЕНКА СТАРЫХ РАЗВЕДОЧНЫХ ПЛОЩАДЕЙ

Разведочная площадь Эмирчах расположена в координатах 29°08′—29°11′ с. ш. и 62°32′—62°35′ в. д. (фиг. 3). Слабая рассеянная медная минерализация наблюдается в гранодиоритовом (?) штоке [4], а на холмах, несколько дальше к западу, обнажаются небольшие бедные медеиосные жилы. На снимке видно, что центральная часть массива интрузивных пород соответствует понижению в рельефе; несмотря на то, что они частично скрыты дюнными песками, автор полагает, что имеются выходы коренных пород, устанавливаемые по более светлой окраске. Окружающие их расчлененные темного тона участки рельефа (за исключением более молодых вулканических пород на востоке), в частности на юго-западе и северо-западе, интерпретируются как зоны роговиковых пород, охватывающие, вероятно, весь пояс холмов; тогда как раньше роговики были известны лишь в одном месте, на северо-западе рассматриваемой площади. Там же был встречен гематитовый скарн, с пятнами малахита [2].

Несмотря на то что изучение снимка ЕРТС дало не очень много новых сведений, оно помогло автору подтвердить его данные об интрузии Эмирчах, которая в целом соответствует модели месторождения Саиндак и должна рассматриваться как первоочередная площадь для постановки разведочных работ.

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗВЕДОЧНЫЕ ПЛОЩАДИ

Местонахождение площади Машкичах определяется координатами 29°06′ с. ш. и 62°24′—28′ в. д. (фиг. 3). Площадь расположена в 9,5 км к северу от Машкичах, где находится небольшая интрузия, показанная на фотогеологической карте [2]. К сожалению, этот район частично маскируется дюнными песками. На снимке видно, что интрузия образует в рельефе депрессию северо-восточного простирания с четкими признаками зональности за счет роговиковых пород на северо-западе и юго-востоке. Вся структура приблизительно такого же размера, как и в районе Саиндак. Все это позволяет автору считать этот район достаточно высокоперспективным и заслуживающим детального полевого изучения.

Площадь горы Далил в районе одноименной железнодорожной станции имеет координаты 28°53′ с. ш., 62°14′ в. д. (фиг. 3). Она выявлена благодаря локализованной серии даек, позволяющей предположить наличие интрузивного центра, морфологически сходного с изученным в районе Саиндака.

Единственные закартированные в этом районе интрузивные штоки показаны на карте как диориты типа пластовых интрузий Танки, а снимок ЕРТС показывает, что обнаженные участки, расположенные западнее, не имеют ничего общего с силлами Танки и, по всей вероятности, являются штоками кварцевых диоритов. Несколько более расчлененный рельеф в районе самого северного интрузива приурочен, возможно, к участку окаймляющей интрузив зоны роговиков. Вся структура занимает приблизительно такую же площадь, как и структура месторожде-

ния Саиндак. Этот участок из-за близости его к железной дороге и к шоссе следует изучить раньше других.

Заслуживает также внимание и хребет Мирджаве. Однако этот район нельзя считать первоочередным, поскольку изучение снимков и фотогеологической карты района хребта вдоль границы неметаморфизованных пород не вскрыло других перспективных участков, кроме Саиндака и района железнодорожной станции Далил.

С помощью описанного метода нельзя дать оценку района распространения метаморфизованных пород к западу и северо-западу от Саиндака и, следовательно, данная работа не внесла изменений в очередность разведки медно-порфировых месторождений в этом районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahmed W., Khan S. N., Schmidt R. G.*, Geology and copper mineralization of the Saindak quadrangle, Chagai District, West Pakistan, U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 716-A, p. 21, 1972.
2. Hunting Survey Corporation, Ltd., Reconnaissance geology of part of West Pakistan; a Colombo Plan Cooperative Project, Toronto, p. 550, 1960.
3. *Khan S. N.*, Interim report on copper deposit of Saindak, Chagai District (Baluchistan), Pakistan, Geol. Survey of Pakistan, Saindak copper report № 1, 1972.
4. *Schmidt R. G.*, Exploration possibilities in the western Chagai District, West Pakistan, Econ. Geol., **63**, № 1, pp. 51—60, 1968.

СВЯЗЬ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ОПРЕДЕЛЕННЫХ ПО СНИМКАМ ЕРТС-1, С ИЗВЕСТНЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РУДНЫМИ МЕСТОРОЖДЕНИЯМИ

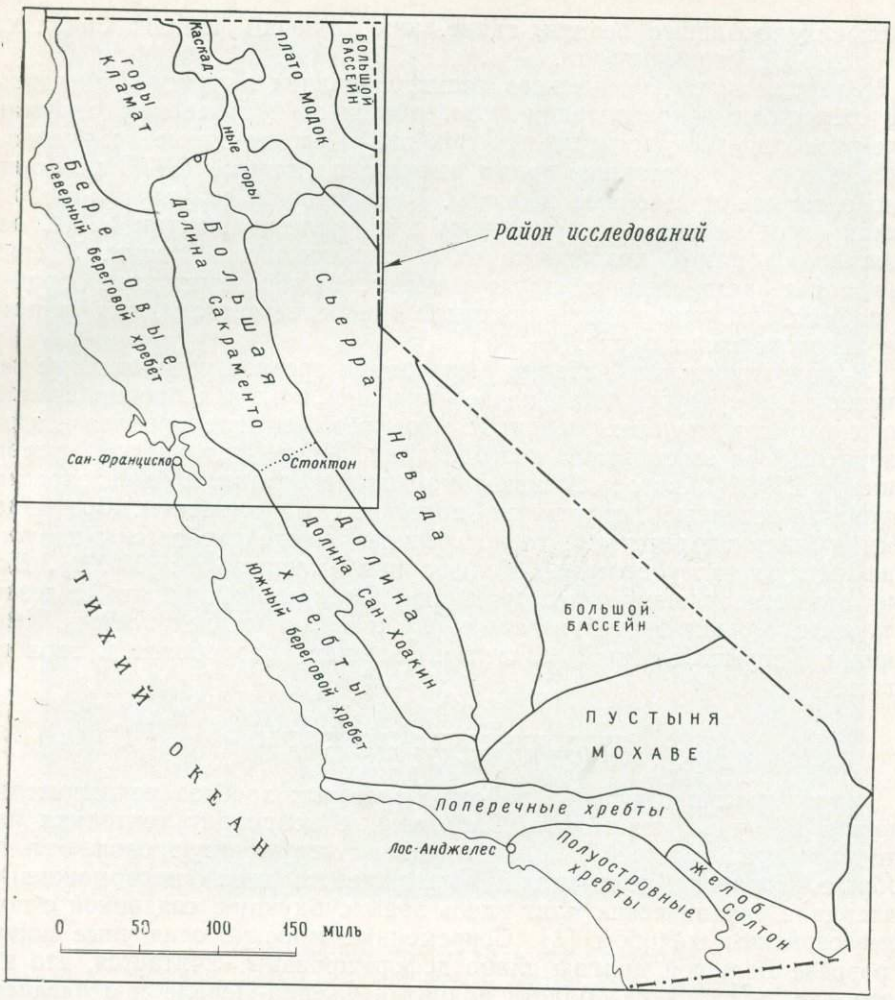
Е. Рич

(Геологический факультет Станфордского университета, Станфорд, Калифорния)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе подводятся предварительные итоги исследования региональной геологической структуры Северного Берегового хребта и долины реки Сакраменто (Калифорния) и высказывается предположение о взаимной связи геологических структур с известными месторождениями ртути, горячими источниками (геотермально активной области) и некоторыми месторождениями нефти и газа северной Калифорнии. Изучаемая площадь включает в себя всю северную Калифорнию от залива Сан-Франциско на юге до границы штатов Калифорния и Орегон на севере и от побережья Тихого океана на западе до западных предгорий Сьерра-Невады на востоке (фиг. 1).

Первоначальная цель исследования заключалась в определении возможности получения литологических и структурно-геологических данных с помощью спутников. При подготовке к исследованию от НАСА были получены совместимые со снимками ЕРТС снимки с самолетов U-2, отснятые Геологической службой США в связи с проведением изучения окружающей среды в районе залива Сан-Франциско. Фотосъемка была выполнена в течение 1970—1972 гг. через разные интервалы времени в разных метеорологических условиях. Кроме того, в исследованиях по данному проекту использовались фотокопии стереопар снимков, полученных для других исследований ЕРТС, образующие вдоль 39-й параллели полосу протяженностью в 320 км от побережья



Фиг. 1. Геоморфологические провинции Калифорнии.

Тихого океана до гребня Сьерра-Невада. Для различных серий фотоснимков были выбраны критерии визуальной интерпретации, отдельно по каждой мультиспектральной зоне, с учетом определенных, специфических для фотографии ограничений. Были выявлены и использованы для геологического исследования полученные в разнообразных сезонных метеорологических условиях фотохарактеристики различных типов пород. Оценка информации, полученной посредством аэрофотосъемки, показала, что для настоящей работы следует все литологические типы пород исследуемой территории разделить на три группы: 1) изверженные породы ультраосновного состава, включая периодотиты, серпентинизированные перидотиты и серпентиниты; 2) вулканические породы, включая андезито-базальты, слагающие Францисканский комплекс мезозоя и риодациты от плиоценовых до современных потоков вулканических полей Сонома — Клир-Лейк; базальты от плиоценовых до современных, слагающие плато Модок (северо-восточная Калифорния); 3) осадочные породы, включающие поздне-мезозойские морские отложения Большой долины, третичные морские и континентальные осадочные породы, развитые вдоль борта долины Сакраменто и современные

неконсолидированные осадки, такие, как аллювий долины Сакраменто и других основных долин.

Надежность литологического дешифрирования зависит в значительной степени от использования фотогеологических критериев, отражающих разнообразие растительного покрова и его сезонные изменения в течение года. В настоящее время имеющиеся данные ЕРТС не полностью охватывают сезонные периоды. Региональная структурно-геологическая интерпретация по пригодным для анализа снимкам ЕРТС осуществлялась нами независимо от литологических данных. В связи с этим для распознавания структур требуется дополнительная обработка данных, которая станет возможной при более четком дешифрировании литологических групп.

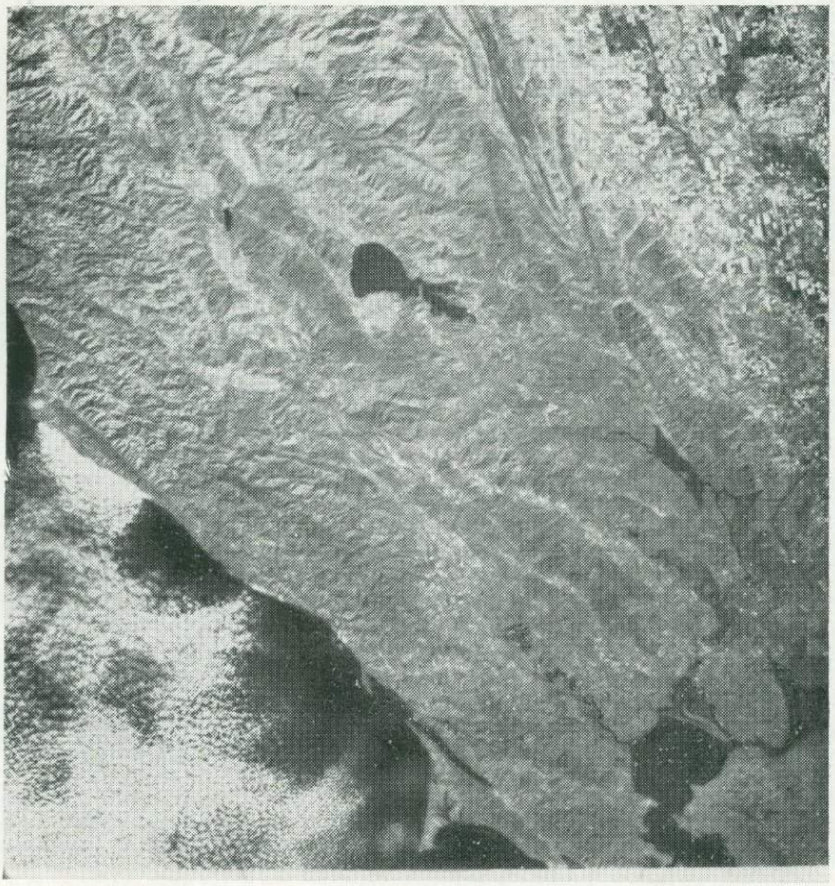
В подготовительной стадии выполнения проекта региональные геологические структуры детально не изучались, так как предполагалось, что оценка структурных особенностей может быть предпринята позднее независимо от этого этапа исследований. После получения первых снимков ЕРТС-1, которые тщательно анализировались, были зарегистрированы основные структурно-геологические элементы. Все кадры снимка были увеличены, и геологические данные перенесены на топографическую карту северной Калифорнии (масштаб 1 : 500 000). Данные о местоположении месторождений твердых и жидких полезных ископаемых были заимствованы с карты полезных ископаемых Калифорнии, опубликованной Отделом горных разработок и геологии штата.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Геологическая структура района Береговых хребтов исключительно сложна и трудно понимаема. Современные концепции тектоники плит или раздвигания морского дна объясняют структурную сложность подобных регионов (деформации меланжевого типа) нагромождением материала океанических плит вдоль зоны субдукции, связанной с позднемезозойским желобом [3]. Современные морские осадочные породы в разрезе Большой долины слабо деформированы. Считается, что этот материал сносился из области поднятия Сьерра-Невада и отлагался в позднемезозойском «авлакогене», который, по-видимому, существовал между желобом Береговых хребтов и поднятием Сьерра-Невада [2].

Предварительное исследование снимка, полученного с помощью спутника ЕРТС, выявило три основные системы линейных структур в районе Береговых хребтов, которые могут быть системами разломов или зонами сдвигов, поскольку вдоль некоторых линейных образований прослеживаются выраженные в рельефе отроги хребта и стратиграфические несогласия. Некоторые из линейных особенностей рельефа отражают следы напластования или необычно выровненные в линию образования рельефа; некоторые другие особенности пока еще не имеют ясного истолкования.

Одна из таких систем параллельна разлому Сан-Андреас и ограничена Тихоокеанским прибрежным поясом (Прибрежная система); другая центральная система, которая на севере под острым углом соединяется с Прибрежной системой, не пересекая ее, ограничена центральной частью Береговых хребтов. Она проявляется на снимке хуже, но тем не менее контролирует, по-видимому, структуру и характер рельефа территории. Эти две системы показаны на фиг. 2 (ЕРТС-1, кадр 1094-18231 MCC-6). Третья, Долинная система до этого распознавалась неотчетливо. Она ориентирована на север или на северо-северо-восток под тупым углом к Центральной системе. Одна или две линей-

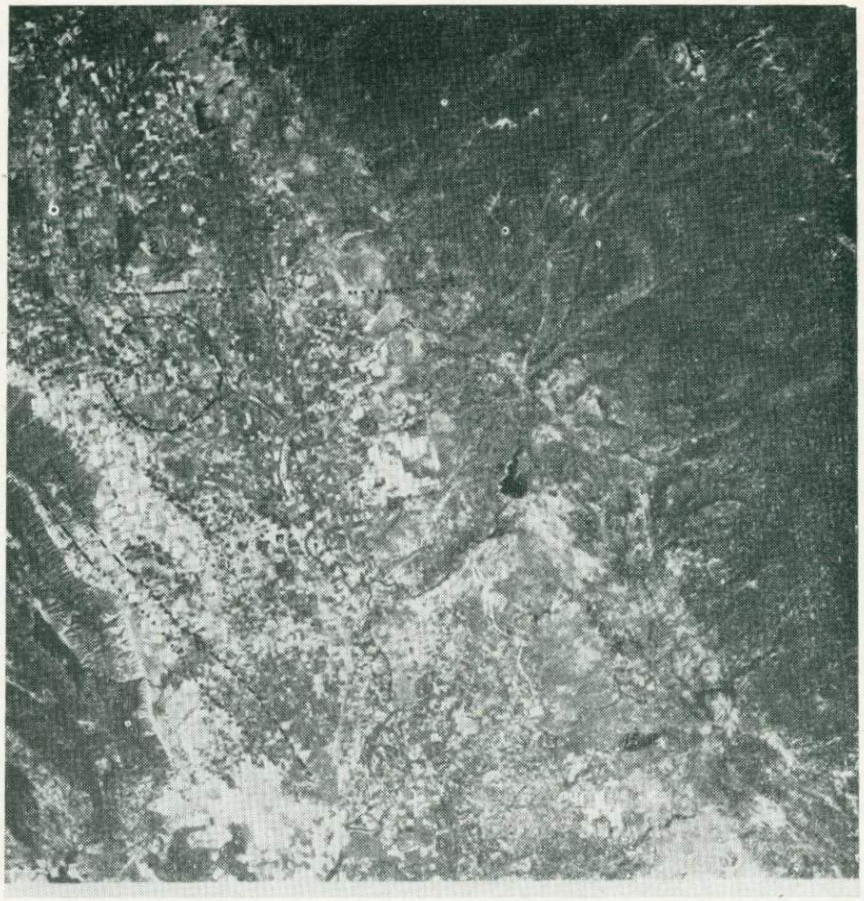


Фиг. 2. Береговые хребты Северной Калифорнии.
Хорошо выражены линейные системы (ЕРТС-1, кадр 1094-18231-6).

ные формы рельефа в пределах этой системы спорадически прослеживаются от центральной части Береговых хребтов, через выполненную аллювием часть долины Сакраменто до предгорий хребта Сьерра-Невада (фиг. 3, ЕРТС-1, кадр 1075-1870 МСС-5).

Стратиграфическое несогласие в позднемезозойских отложениях разреза Большой долины, которое прослеживается вдоль западной границы долины Сакраменто (фиг. 3), частично связано с Долинной системой. Элементы линейных форм рельефа, субпараллельные Долинной системе, выделяются в области Береговых хребтов и в выполненной аллювием части долины Сакраменто. В пределах долины Сакраменто эти линейные элементы отражают продолжение Долинной системы в коренных породах, подстилающих ложе долины. В северной части территории Долинная система почти параллельна обрыву разлома Мендосино в его морской и континентальной частях.

Снимки ЕРТС с изображением гор Кламат и плато Модок, расположенных в северной Калифорнии и южной части штата Орегон, к настоящему времени обработаны еще не полностью. Тем не менее простирание некоторых линейных форм рельефа в северной части Береговых хребтов Калифорнии, показанных на фиг. 2, может отражать эти две крупные геологические структуры.



Фиг. 3. Долина Сакраменто и предгорья Сьерра-Невады.

Видно простирание Центральной системы в поле развития долинного аллювия и отчетливые линейные образования Долинной системы, проходящие через лакколит Мэрисвилл-Бьютс. Округлая депрессия в рельефе, возможно, кальдера (?). Более детально ситуация показана на фиг. 2 (ЕРТС-1), кадр 1075-18170-5.

Местоположения известных месторождений ртути, нефти и газа в северной Калифорнии показаны на фиг. 2. Некоторые месторождения ртути, проявления современного вулканизма, так же как и некоторые районы геотермальной активности в районе озера Клир-Лейк в Береговых хребтах, располагаются вдоль Долинной системы или на пересечении Центральной и Долинной систем; однако другие месторождения ртути, по-видимому, более явно связаны с Центральной системой или не проявляют непосредственной связи с линейными системами. Такой предварительный обзор тем не менее подтверждает точку зрения, что выявление линейных систем исключительно ценно при поисках месторождений.

Все месторождения нефти и газа в северной Калифорнии погребены под аллювиальными отложениями долины Сакраменто. Местоположение некоторых из этих месторождений тесно связано с линейными элементами Долинной системы, в то время как другие месторождения расположены в области развития линейных элементов Центральной системы. В настоящее время проводится тщательный анализ опубликованных данных для определения поверхностных проявлений каждого

месторождения, связанного с погребенной структурой. Если взаимосвязи, выявленные данной работой, окажутся действительно надежными, то анализ снимков, полученных посредством спутника ЕРТС, будет полезен для поисков месторождений полезных ископаемых и на других территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. California Division of Mines and Geology, Economic Minerals Maps of California, Spec. Bull. 45, 1955.
2. *Dickinson W. R., Rich E. I.*, Petrologic Intervals and Petrofacies in the Great Valley sequence, Sacramento Valley, California, Geol. Soc. Am. Bull., **83**, pp. 3007—3024, 1972.
3. *Ernst W. G.*, Tectonic contact between the Franciscan mélange and the Great Valley sequence, crustal expression of a late Mesozoic Benioff zone, Journ. Geophys. Research, **75**, pp. 886—902, 1970.

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ТЕКТОНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТРЕТИЧНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И СОВРЕМЕННЫХ РАЗЛОМОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ПРОВИНЦИИ БАССЕЙНОВ И ХРЕБТОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ЕРТС-1

И. Бехтолд, М. Лиджет, Дж. Чайлдс

(Компания «Аргус Эксплорейшн», Ньюпорт-Бич, Калифорния)

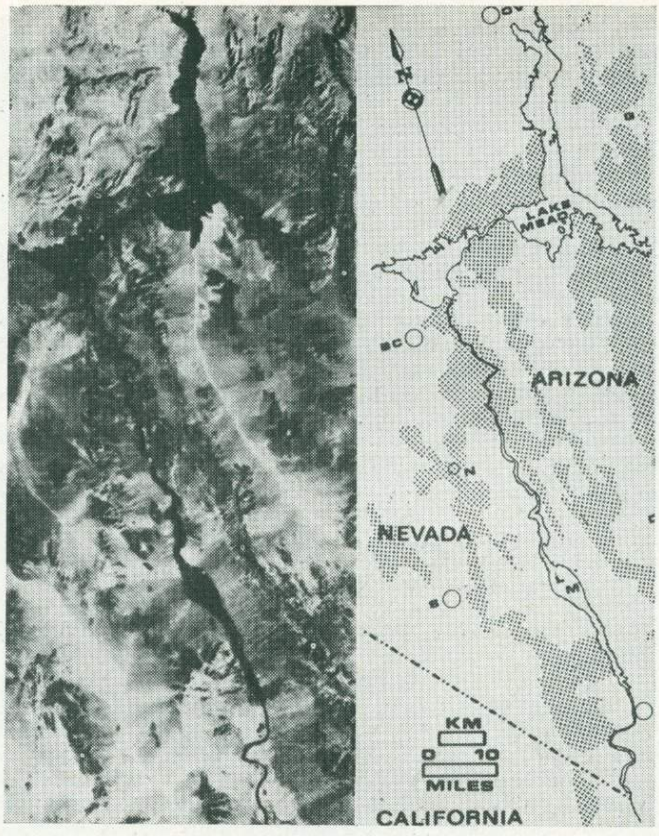
ВВЕДЕНИЕ

Настоящий доклад охватывает часть исследований НАСА, которые проводились для оценки пригодности снимков спутника ЕРТС-1 для изучения региональной тектоники. Рассматриваемый в докладе район исследований представляет собой полосу шириной примерно 40 км, протягивающуюся на 200 км вдоль реки Колорадо от 34°15′ до 36°34′ с. ш. и расположенную в Провинции бассейнов и хребтов в пределах южной Невады, юго-восточной Калифорнии и северо-западной Аризоны (фиг. 1).

Были использованы увеличенные аддитивно-цветные снимки, полученные с помощью мультиспектрального сканатора (МСС) со спутника ЕРТС-1. Снимки ЕРТС-1, охватывающие значительные участки земной поверхности, позволяют исследовать региональные геологические явления в масштабах, недоступных обычной аэрофотосъемке. Уже доказана целесообразность и экономическая эффективность использования данных ЕРТС в сочетании со среднемасштабными снимками, полученными дистанционными методами, и крупномасштабными аэрофотоснимками, а также наземной геологической съемкой. Исходные материалы, использованные нами при исследовании, включают:

Снимки спутника НАСА ЕРТС-1 МСС	12 сентября 1972 г., кадр 1069-17432 5 ноября 1972 г., кадр 1105-17443 6 ноября 1972 г., кадр 1106-17495
Снимки космического корабля НАСА «Аполлон-9», пленка «Эктахром»	Кадры АС 9-20-3135, 3136
Снимки спутника НАСА SLAR AN/APQ 97[1]	5 ноября 1965 г., запуск 103
Черно-белые фотографии Генерального штаба США, снятые с самолета U-2	10 июля 1969 г., вылет 018 17 июля 1968 г., вылет 059 6 сентября 1969 г., вылет 374
Цветные инфракрасные фотографии НАСА, снятые с самолета U-2	11 октября 1971 г., вылет 189

[1] Спутник № 97 серии APQ, запущен ведомством сухопутной армии и военно-морских сил США, имеет на борту радиолокационную станцию бокового обзора (SLAR). — *Прим. перев.*

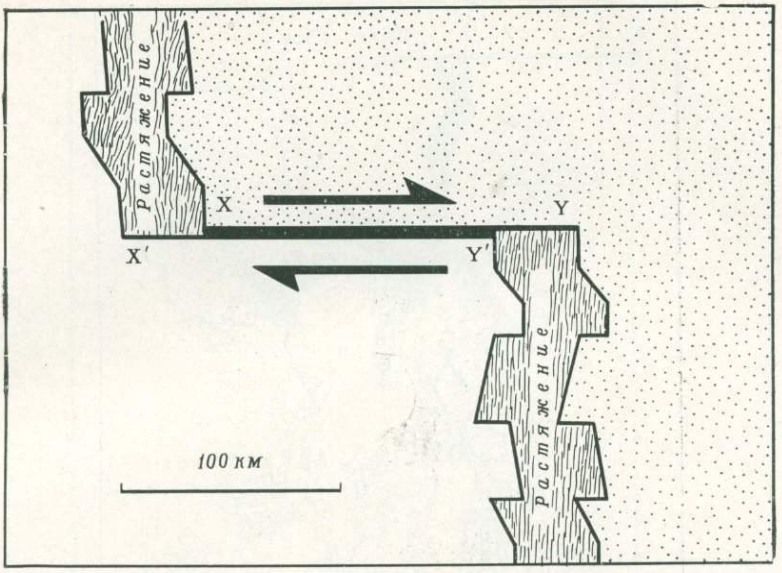


Фиг. 1. Часть снимка 1106-17495-7 ERTC-1 MCC и обзорная карта исследуемого района.

Принятое сокращение географических названий: *B* — Балхед, Аризона; *BC* — Болдер, Невада, *DV* — Детритовая долина, Аризона; *G* — Голд-Бьют, Невада; *LM* — озеро Можейв; *N* — Нельсон, Невада; OV — Овертон, Невада, *S* — Серчлайт, Невада.

Региональная тектоника. На снимке ERTC-1 (фиг. 1) вдоль реки Колорадо наблюдается пояс аномалий рельефа меридионального простирания, выражающийся в текстуре и цвете снимка. Структурно-геологический анализ этого изображения, изучение соответствующей литературы, а также данные наземной съемки позволили выдвинуть гипотезу, в которой объединены различные точки зрения на геологию региона.

Мы полагаем, что образование структур меридионального простирания является результатом растяжения в широтном направлении земной коры (по меньшей мере на 30 км), вызванного магматической деятельностью в миоценовое время. Максимум вулканической деятельности, имеющий абсолютный возраст 10—15 млн. лет [2], был синхронен основным вертикально-горизонтальным смещениям в зоне разлома Лас-Вегас [7]. Мы считаем, что зона разлома Лас-Вегас протягивается в широтном направлении непосредственно севернее озера Мид и образует северную границу этой зоны растяжения. Упрощенная тектоническая схема показана на фиг. 2. Здесь зона сбросо-сдвигов (X—У) свидетельствует о трансформном характере разлома, ограничивающего два района растяжения земной коры (заштрихованные участки). Южная область растяжения соответствует площади, описываемой в данной работе. Полагают, что родственная ей провинция находится в окрест-

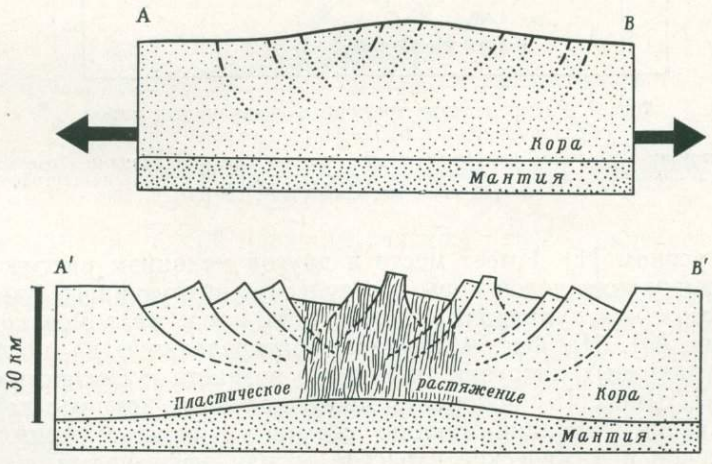


Фиг. 2. Упрощенная тектоническая схема трансформного разлома (X—Y), разделяющего две зоны растяжения коры (волокнистая штриховка).

Заштрихованные и незаштрихованные площади представляют собой две «плиты» коры, сдвинутые относительно друг друга. Зона сдвига Лас-Вегас представляет собой трансформный разлом, который образует северную границу области растяжения вдоль реки Колорадо.

ностях атомного полигона штата Невада, в 120 км северо-западнее озера Мид.

Схематический поперечный разрез области растяжения земной коры изображен на фиг. 3. Предполагается, что указанные на фиг. 3 разломы, нормальные по отношению к растяжению, с глубиной затухают и совсем исчезают в зоне пластических деформаций [12]. Растяжение, связанное с выполаживающимися нормальными разломами в мощной вулканогенной толще третичного возраста близ Нельсона, Невада, опи-



Фиг. 3. Вертикальные разрезы региона до и после растяжения коры.

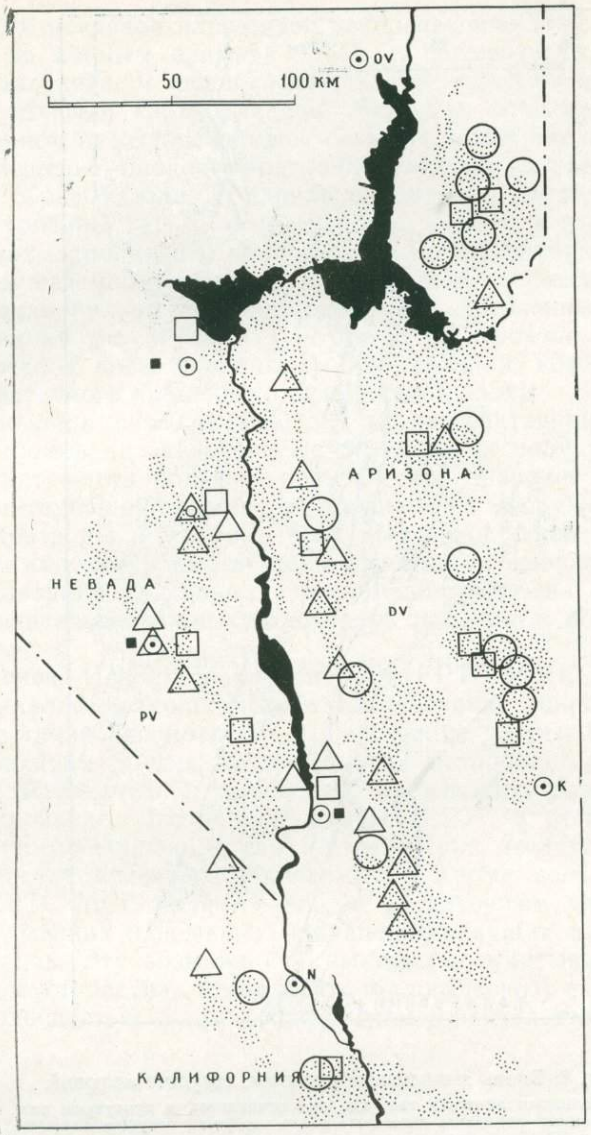
Направление растяжения перпендикулярно линии сбросов; пластическое растяжение в нижней части коры и образование новой коры за счет внедрения эффузивных и интрузивных тел показано штриховкой.



Фиг. 4. Распределение третичных интрузивных пород, образовавшихся в процессе растяжения коры.

Гранитные интрузии обозначены контурами, а серии даек — жирными линиями. Точечной штриховкой обобщенно показаны площади обнажения коренных пород. Сокращение географических названий такое же, как на фиг. 1 и 6.

сано Андерсоном [1]. Имеет место и другой механизм растяжения коры и формирования новой коры в результате интрузивного магматизма и связанного с ним вулканизма, в частности, вдоль разломов в областях растяжения [3]. На фиг. 4 показано распределение на исследуемой площади гранитных интрузий третичного возраста и связанных с ними систем даек. Дингс [6] описывает многочисленные крупные дайки риолитов в районе Уоллапай-Майнинг севернее Кингмена, Аризона. Петрографическое и химическое сходство между эффузивами, дайками и более крупными интрузиями было показано Фолбортом (личное сообщение, 1972 г.) для района Ньюберри-Маунтин, штат Невада. Временные и генетические соотношения между вулканическими и интрузивны-

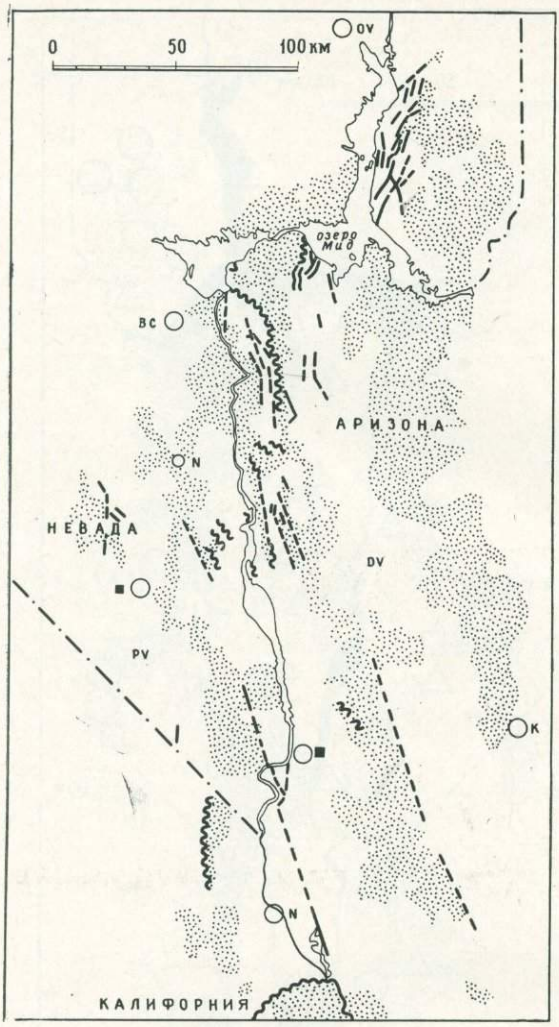


Фиг. 5. Распределение известных проявлений минерализации.

Треугольники — золото, квадраты — серебро и цинк, кружки — медь и молибден. Точечная штриховка обобщенно показывает площади обнажения коренных пород. Сокращение географических названий такое же, как на фиг. 1 и 6.

ми породами на данной площади описаны ранее в ряде статей [2, 3, 5, 8, 11, 14].

Минерализация. С гранитными интрузиями, залегающими неглубоко, и сериями даек, которые показаны на фиг. 4, тесно связана широко развитая золотая, серебряная и в меньшей степени медно-молибденовая минерализация. На фиг. 5 показано распределение в районе известных рудников. Обзор литературы, посвященной описанию месторождений [5, 10, 11], и геологическая съемка выявили заметное сходство структурной обстановки, оруденения, жильной минерализации и комплекса горных пород в различных рудных полях. Месторождения золота и серебра вдоль реки Колорадо приурочены к протягивающейся в меридиональном направлении металлогенической провинции, генетически



Фиг. 6. Вновь выявленные разломы, секущие аллювий.

Разломы показаны сплошными линиями там, где они отчетливы, и пунктиром там, где неопределенны. Волнистыми линиями показаны известные ранее разломы, секущие аллювий, которые также выявляются на снимках ЕРТС. Разломы, секущие коренные породы, не показаны. Точечная штриховка — площади обнажения коренных пород. Сокращение географических названий такое же, как на фиг. 1, со следующими дополнениями: *EV* — долина Эльдорадо, *K* — Кингмен, Аризона. *N* — Нидлс, Калифорния, *PV* — долина Пьют, *SV* — долина Сакраменто.

связанной с деформацией растяжения третичного возраста. Этот региональный структурный контроль минерализации ранее не отмечался. Стоимость добытой руды в этой провинции (в ценах 1973 г.) достигает 100 млн. долларов. Хотя добыча руды в настоящее время здесь незначительна, новые данные по геологии этой территории, полученные с помощью спутника ЕРТС-1, необходимо учитывать при планировании дальнейших геологоразведочных работ.

Современные разрывные дислокации. Дополняя сведения по региональной тектонике, данные ЕРТС явились основой для эффективного картирования сравнительно небольших разрывных нарушений, прорезающих аллювий. Большинство разломов, развитых в аллювии, имеет, вероятно, современный возраст.

На фиг. 6 показано площадное распределение этих разломов, установленных по данным снимков ЕРТС и среднемасштабных снимков, которые в дальнейшем были подтверждены геологической разведкой и детальным полевым картированием. Разломы, описанные ранее [9] и подтвержденные нами при анализе снимков, отличаются от вновь выявленных. Смещение блоков происходит главным образом по падению плоскостей сбрасывателя, и в ряде случаев по разломам образуются небольшие грабены [4]. Многие разломы развиты в горах и в межгорных впадинах, заполненных аллювиальными отложениями, и их трудно выявить при наземном картировании. Разломы, ориентированные в основном меридионально, подобно разломам, выявленным в других местах Провинции бассейнов и хребтов [13], вероятно, отражают процесс растяжения коры в широтном направлении, который происходил от позднетретичного времени до современной эпохи.

Использование снимков ЕРТС-1 для эффективной съемки современных разломов на значительных по площади полупустынных территориях может иметь большое практическое значение при планировании и проектировании инженерно-технических сооружений, таких, как дамбы, автострады и атомные электростанции. Аналогичное применение эти снимки могут иметь при проведении региональных геологических исследований, связанных с риском для человека, а также при поиске исключительно важных источников подземных вод в полупустынных районах.

Заключение. Использование снимков ЕРТС-1 МСС позволяет проводить уникальные геологические исследования широкого диапазона, которые частично рассмотрены выше. Анализ данных ЕРТС в сочетании с использованием других дистанционных методов исследования позволяет более эффективно и экономично производить наземное геологическое картирование. Применение данных ЕРТС в региональном плане является многообещающим для тектонических исследований при поисках и разведке полезных ископаемых. Кроме того, разрешение на снимках ЕРТС МСС является вполне достаточным для выявления относительно мелких разрывных нарушений, секущих аллювий, на больших площадях. Эту возможность необходимо учитывать при планировании землеустройства, проведении геологических исследований, связанных с опасностью, и при гражданском строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anderson R. E.*, Thin Skin Distension in Tertiary Rocks of Southeastern Nevada, Geol. Soc. Am. Bull., **82**, pp. 43—58, 1971.
2. *Anderson R. E., Longwell C. R., Armstrong R. L., Marvin R. F.*, Significance of K-Ar Ages of Tertiary Rocks from the Lake Mead region, Nevada — Arizona, Geol. Soc. Am. Bull., **83**, № 2, pp. 273—288, 1972.
3. *Bechtold I. C., Liggett M. A., Childs J. F.*, Structurally Controlled Dike Swarms Along the Colorado River, Northwestern Arizona and Southern Nevada (ABS), NASA-CR-128290, E72-10192, 1972.
4. *Bechtold I. C., Liggett M. A., Childs J. F.*, Remote Sensing Reconnaissance of Faulting in Alluvium, Lake Mead to Lake Havasu, California, Nevada and Arizona, NASA Report of Investigation, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1973.
5. *Callaghan E.*, Geology of the Searchlight District, Clark County, Nevada, U. S. Geol. Survey Bull. 906-D, pp. 165—185, 1939.
6. *Dings G.*, The Wallapai Mining District, Cerbat Mountains, Mojave County, Arizona, U. S. Geol. Survey Bull. 978-E, p. 39, 1951.
7. *Fleck R. J.*, Age and possible Origin of the Las Vegas Shear Zone, Clark and Nye Counties, Nevada, Geol. Soc., Am. Abs. with Programs (Rocky Mountain Sec.), **2**, № 5, p. 333, 1970.

8. *Lausen G.*, Geology and Ore Deposits of the Oatman and Katherine Districts, Arizona, Arizona Bur. Mines Bull. 131, Geol. Ser. 6 (Univ. Bull., 2, № 2), p. 126, 1931.
9. *Longwell C. R.*, Reconnaissance Geology Between Lake Mead and Davis Dam. Arizona — Nevada, U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 374-E, p. 51, 1963.
10. *Longwell C .R., Pampeyan E. H., Bowyer B., Roberts R. J.*, Geology and Mineral Deposits of Clark County, Nevada, Nevada Bur. Mines Bull. 62, p. 218, 1965.
11. *Ransome F. L.;* Geology of the Oatman District, Arizona, A Preliminary Report, U. S. Geol. Survey Bull. 743, p. 58, 1923.
12. *Stewart J. H.*, Basin and Range Structure, A System of Horsts and Grabens Produced by Deep-Seated Extension, Geol. Soc. Am. Bull., 82, pp. 1019—1044, 1971.
13. *Thompson G. A., Moister L. T., Herring A. T., Smith T. E., Burke D. B., Kovach R. L., Burford R. O., Salehi A., Wood M. D.*, Geophysical Study of Basin-Range Structure, Dixie Valley Region, Nevada, U. S. Air Force Cambridge Research Labs., Spec. Rept. 66—848, 1967.
14. *Volborth A.*, Personal Communication, Nevada Bureau of Mines, Reno, Nevada, 1972.

ОЦЕНКА РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СНИМКОВ ЕРТС-А ПРИ ПОИСКАХ НЕФТИ И ДРУГИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Д. Сондерс, Г. Томас

(«Техас Инструмент Инкорпорейтед», Даллас, Техас)

ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей программы ЕРТС является использование снимков, полученных с помощью спутника, для решения проблем, связанных с исследованием природных ресурсов и охраной окружающей среды. Как показывают результаты реализации программы ЕРТС, можно получить оценку экономической выгоды от использования снимков, отснятых с помощью спутников, для фотогеологических производственных исследований. Чтобы обеспечить успешное проведение поисково-разведочных работ в будущем, требуется совершенно новый подход, объединяющий усилия государства, промышленности и науки, включая и обмен информацией между ними.

Одно из перспективных направлений рентабельного использования снимков ЕРТС связано с поисками твердых полезных ископаемых и нефти. В настоящей статье рассмотрен вопрос о том, насколько применимы для решения задач такого рода снимки со спутника в масштабе 1 : 1 000 000.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ПЛОЩАДИ И МЕТОДЫ

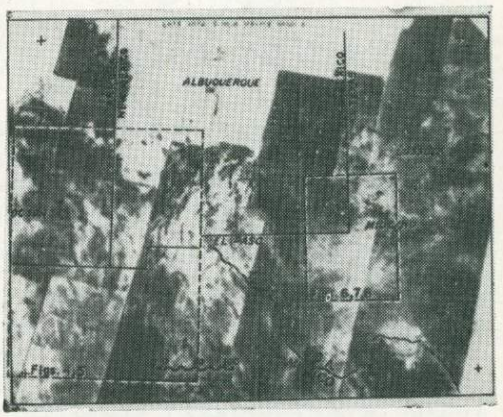
В качестве объектов исследования были выбраны территории пяти районов Северной Америки (фиг. 1 А и Б). Для обеспечения корректности оценки снимков эти районы были подобраны таким образом, чтобы изменения геологических и физико-географических условий обеспечивали сопоставимую оценку снимков.

Каждый район был геологически и геоморфологически изучен по фотоотпечаткам снимков ЕРТС-А независимо двумя специалистами в области аэрофотогеологии. Основным типом информации, полученной со снимка, была картина пространственного распределения разрывных нарушений, выявляемых главным образом по гидросети. Во многих случаях разрывы проявляются в виде линеаментов, которые трассируются на протяжении нескольких сотен миль по тональным контрастам на снимке.

Результаты дешифрирования снимков, полученные независимо друг от друга обоими специалистами, сравнивались для того, чтобы установить, насколько они совпадают и установить их пригодность для картирования. Данные, не вызывающие сомнения, сопоставлялись с ранее известными для каждого района данными о разломах, разрывах и линеаментах. Для оценки всевозможных корреляционных связей материалы картирования по снимкам ЕРТС сопоставлялись с данными о расположении известных месторождений полезных ископаемых.



Фиг. 1А. Обзорная карта расположения изученных площадей



Фиг. 1Б. Фотомонтаж снимков ЕРТС-А по площади № 3.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

В ряде последних работ (см. список литературы) уже отмечалась возможная связь поясов рудных месторождений в различных частях Северной Америки с известными крупными линеаментами. Исследователи, занимающиеся месторождениями нефти, также указывают на важность линеаментов при выявлении разрывных и пликативных структур осадочной толщи в областях древних шельфов и бассейнов осадконакопления. Обе точки зрения основаны на том явлении, что тенденция пространственного распределения месторождений рудных полезных ископаемых и нефти связана с возможными линеаментами.

При исследовании разломов и линеаментов в региональном плане уже давно пришли к заключению [2, 16], что эти разломы раннедокембрийского возраста и что они предшествовали всей последующей истории орогенеза и осадконакопления.

На фиг. 2 показана часть планетарной картины линеаментов докембрийского возраста, установленной авторами данной работы на территории Северной Америки. Линеаменты выделены по структурным и литологическим линейным зонам, а также по ориентации основных линейных геоморфологических образований. На фигуре показаны только линеаменты северо-восточного и северо-западного простирания, которые предположительно считаются первоначальными образованиями.

Линеаменты остальных направлений образовались, видимо, позднее в течение докембрия.

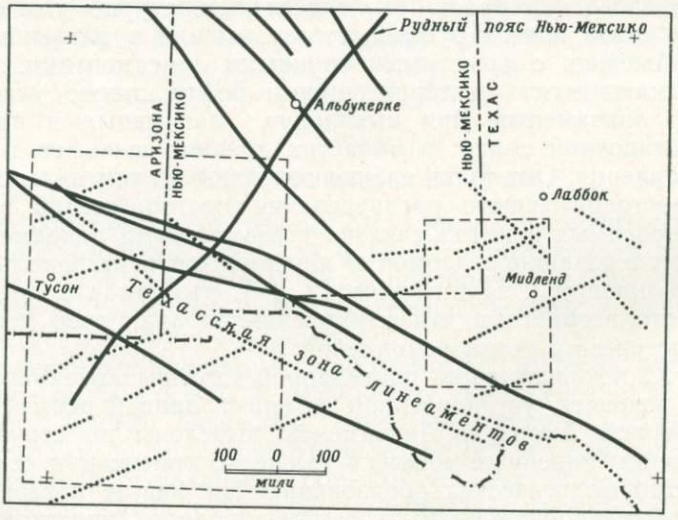


Фиг. 2. Оосновные линеаменты северо-восточного и северо-западного простирания на территории Северной Америки.

До осуществления программы ЕРТС упомянутые выше линеаменты, как и линеаменты, показанные на фиг. 2, определялись косвенно по простиранию основных линейных геолого-геоморфологических структур. Снимки, полученные посредством спутника ЕРТС, впервые позволяют визуально подтвердить или отвергнуть предположение о принадлежности структур к линеаментам. Кроме того, снимки ЕРТС служат средством получения дополнительной информации о второстепенных разломах — линеаментах, которая может оказаться полезной при детальных поисках и разведке месторождений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ

Хотя для данных исследований было выбрано пять районов, расположенных в Северной Америке, трудности извлечения полезной информации со снимка, полученного с помощью спутника ЕРТС, в четырех районах из пяти (в Аризоне, Нью-Мексико, Западном Техасе и в Мексике) ограничили результаты данной работы. На фиг. 1Б в виде фотомонтажа мелкомасштабных снимков, покрывающих площадь № 3, показаны использованные для исследования материалы. Результаты, полученные по



Фиг. 3. Известные линеаменты и новые линеаменты, установленные по снимкам ЕРТС на площади № 3 (точечные линии).

этой площади, оказались лучше, чем можно было предположить, особенно в тех частях монтажа, где снимки имеют боолее плотный фототон. Региональные линеаменты северо-восточного простирания в этом районе выделяются по снимкам ЕРТС так же хорошо, как и в Техасской зоне линеаментов северо-западного простирания. Указанные линеаменты, обнаруженные исключительно по снимкам ЕРТС (на основе мелкомасштабного фотомонтажа), показаны на фиг. 3 точечными линиями, а известные ранее по опубликованным работам — сплошными линиями. Линеаменты, протягивающиеся на северо-восток, ранее не выделялись в данном районе ни в таком количестве, ни с такой определенностью. Даже на основе использования мелкомасштабного фотомонтажа снимков ЕРТС можно получить новые данные о геологическом строении территории.

Особенно интересны с точки зрения коммерческого использования геологической информации, полученной посредством спутника ЕРТС, два участка, расположенные в пределах исследуемой площади № 3. На фиг. 3 границы этих участков показаны пунктирными линиями.

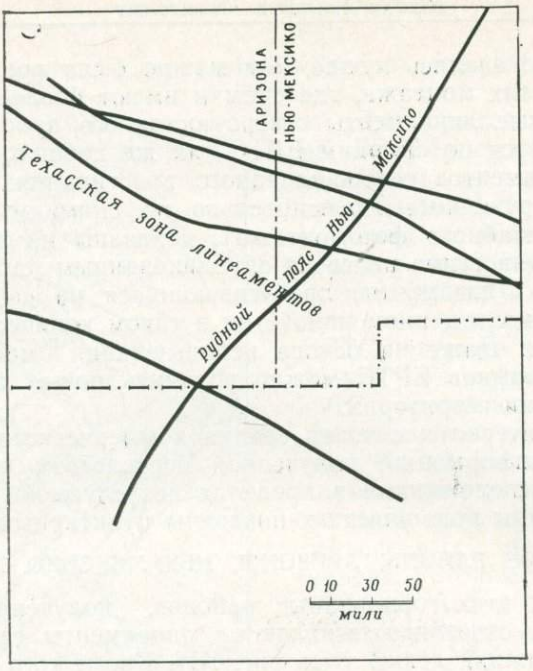
ГОРНОРУДНЫЕ РАЙОНЫ АРИЗОНЫ, НЬЮ-МЕКСИКО И МЕКСИКИ

На снимках этих горнорудных районов, полученных с помощью спутника ЕРТС, отчетливо выявляются линеаменты северо-восточного простирания (нижний левый угол фиг. 1Б). Кроме того, менее отчетливо здесь также наблюдаются линеаменты северо-западного и субширотного простирания. При этом «известных» линеаментов в данном районе мало, по существу только две основные системы — Нью-Мексиканский пояс минерализации [5] и различные участки Техасской зоны линеаментов [6, 12, 17], показанные на фиг. 4. Даже только выделение основных линеаментов на фотоснимках, полученных посредством спутника ЕРТС (фиг. 5), уже является источником новой информации по геологии данного района. Эта информации сама по себе ценна для осуществления коммерческой программы исследования территорий. Но ее ценность еще более возрастает при картировании основных рудных полей, местоположение которых может быть определено по картине расположения линеаментов на площадях, исследуемых со спутника ЕРТС. Это, несомненно, повышает перспективность поисково-разведочных работ. Во-первых, рудные поля почти повсеместно совпадают с преобладающими в этом районе линеаментами северо-восточного простирания. Во-вторых, рудные поля расположены вдоль указанных линеаментов там, где они пересекаются с еле заметными линеаментами широтной и восток-юго-восточной ориентировки. Уже только на основе этих соотношений между вновь выделенными линеаментами и основными рудными полями можно прогнозировать другие, перспективные в будущем. участки в данном регионе (фиг. 5).

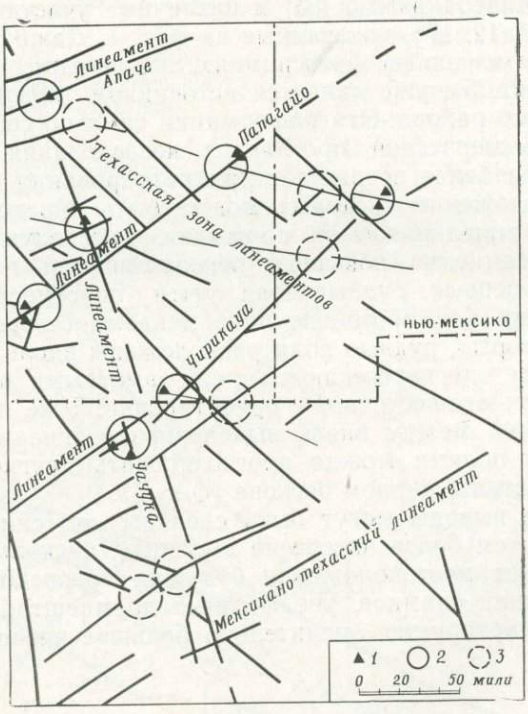
Если такие выводы могут быть сделаны по снимкам масштаба 1 : 1 000 000, то тем более интересно выяснить, насколько точнее может быть определение местоположения будущих разведочных площадей при использовании снимков, увеличенных до масштаба 1 : 250 000, так как при этом картируется значительно большее число разломов линеаментов.

ПЛАТФОРМА ЦЕНТРАЛЬНОГО БАССЕЙНА, ЗАПАДНЫЙ ТЕХАС

На тектонической карте США [14] в западном Техасе показана платформа Центрального бассейна, разбитая на бортах серией погребенных разломов, которые подчеркивают структурны контуры поверх-



Фиг. 4. Известные линеаменты на территории штатов Аризона, Нью-Мексико и на территории Мексики.

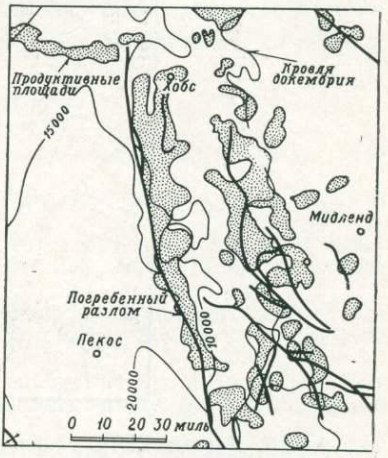


Фиг. 5. Линеаменты, выявленные по снимкам ЕРТС, и основные горнорудные площади на территории штатов Аризона, Нью-Мексико и на территории Мексики.

1 — наиболее важные рудники; *2* — известные ранее месторождения; *3* — предполагаемые месторождения.

ности докембрия (фиг. 6). Продуктивные площади (месторождения нефти и газа) также приурочены к бортовым частям платформы. Осевая линия этой большой платформы и связанные с ней бортовые структуры имеют простирание примерно северо-запад 20°. Непосредственно севернее Хоббса в штате Нью-Мексико структурно-тектонический облик платформы[1] становится иным: ее борта не нарушены разломами, а продуктивные площади имеют другое простирание (фиг. 6).

Линеаменты, следы разломов и прочие геоморфологические образования, закартированные на этой площади по снимкам, полученным посредством спутника ЕРТС-А, дополняют в значительной степени геологические сведения по данному району (фиг. 7). Комбинируя полученные данные по линеаментам-разломам с геоморфологическими материалами об искривлении русл, можно сделать заключение о положении оси антиклинали, так как изменения направления русл предположительно свидетельствуют об антиклинальном характере структуры. Однако ось складки по всей площади не прослеживается, поскольку следы линеаментов-разломов в северной части площади (фиг. 7) изменяют свое простирание и ориентированы на северо-восток.



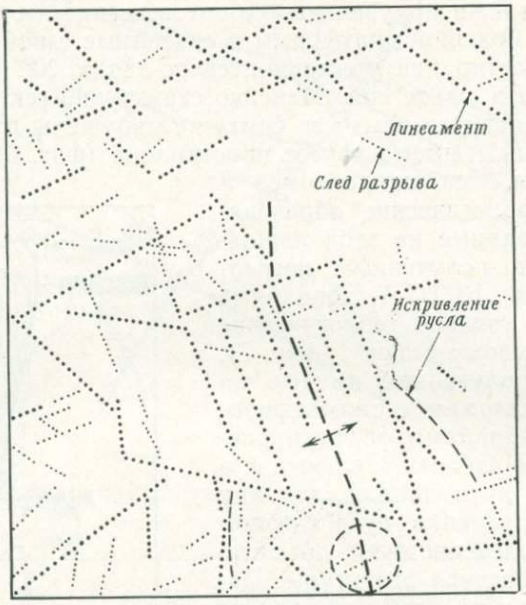
Фиг. 6. Известные структуры на платформе Центрального бассейна, западный Техас.

Совмещение фиг. 6 и 7 (результат показан на фиг. 8) дает возможность прямого сравнения известных данных с новыми данными, полученными по снимкам ЕРТС. В некоторых местах новые линеаменты почти совпадают с ранее известными разломами или продуктивными площадями на бортах платформы. Показанная на фиг. 7 ось актиклинали совпадает с осевой линией платформы, как это показано на фиг. 6. Можно провести еще и другие детальные сопоставления. Особенно интересен в этом отношении один из участков, расположенный в окрестности Хоббса, штат Нью-Мексико, где наблюдается утрата платформенных черт территории, изменение ориентировки продуктивных площадей хорошо совпадает с резким изменением ориентировки линеаментов и следов разломов. Более детальное исследование региона приводит к заключению, что существует причинная связь между линеаментами и продуктивными площадями.

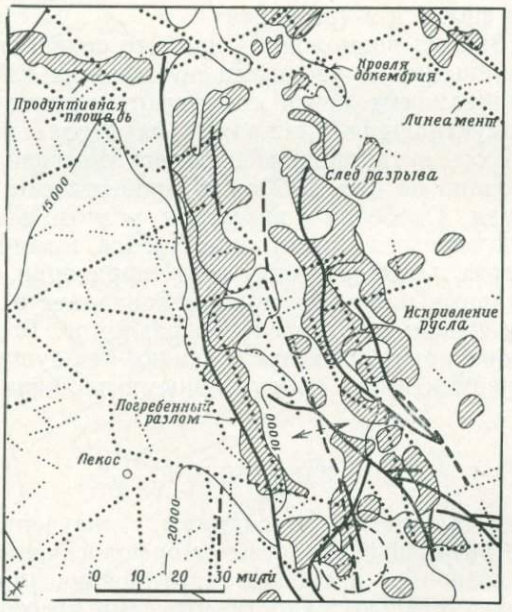
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможность выявления по снимкам, полученным посредством спутника ЕРТС, различных геолого-геоморфологических объектов в западном Техасе позволяет проводить картирование погребенных структур с приемлемой степенью точности, что само по себе говорит об экономической выгоде использования снимков ЕРТС. Ценность их еще более возрастает благодаря возможности выбора для поисково-разведочных работ перспективных рудных полей по снимкам, как это было

[1] Платформы Центрального бассейна. — *Прим. ред.*



Фиг. 7. Данные ЕРТС по платформе Центрального бассейна, западный Техас.



Фиг. 8. Совмещенная карта данных ЕРТС и известных структурных образований на территории западного Техаса.

показано на примере горнорудных районов Аризоны, Нью-Мексико и Мексики.

По нашим данным можно сделать заключение об огромной практической ценности снимков ЕРТС-А для программ по исследованию природных ресурсов. Благодаря применению снимков ЕРТС в настоящее время становится возможным региональное изучение целых стран и труднодоступных территорий. В то же время накопленные данные можно использовать не только для изучения региональных структур фундамента, но еще и для уточнения местоположения площадей, на которых будут проводиться дальнейшие поисково-разведочные работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brock B. B.*, World patterns and lineaments, Trans. Geol. Soc. S. Africa, **60**, pp. 127—160, 1957.
2. *Cloos H.*, The ancient European basement blocks, Trans. Am. Geophys. Union, **29**, № 1, pp. 99—103, 1948.
3. *Hansen A. R.*, Reef trends of Mississippian Ratcliff zone, northeast Montana and northwest North Dakota, Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **50**, № 10, pp. 2260—2268, 1966.
4. *Hills E. S.*, The tectonic style of Australia: Geotectonisches Symposium zu ehren van Hans Stille, Kommissions-Verlag von Ferdinand Enke, Stuttgart, pp. 336—346, 1956.
5. *Jerome S. E., Cook D. R.*, Relation of some metal mining districts in the western United States to regional tectonic environments and igneous activity, Nevada Bur. Mines, Bull. 69, 1967.
6. *Kelley V. C.*, Regional tectonics of the Colorado Plateau and relationship to the origin and distribution of uranium, Univ. of New Mexico Publ. № 5, 1955.
7. *Kutina J.*, The Hudson Bay paleolineament and anomalous concentration of metals along it, Econ. Geol., **66**, pp. 314—325, 1971.
8. *Landwehr W. R.*, Belts of major mineralization in western United States, Econ. Geol., **62**, pp. 494—501, 1967.
9. *Mayo E. B.*, Lineament tectonics and some ore districts of the southwest, AIME Trans., **211**, pp. 1169—1175, 1958.
10. *O'Driscoll E. S. T.*, Deformational concepts in relation to some ultramafic rocks in western Australia, Spec. Publ. № 3, Geol. Soc. Australia, pp. 351—366, 1971.
11. *Sales J. K.*, Crustal mechanics of Cordilleran foreland deformation, a regional and scale model approach, Am. Assoc. Petrol. Geologists, Bull., **52**, № 10, pp. 2016—2044, 1968.
12. *Schmitt H. A.*, The porphyry copper deposits in their regional setting, Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America, *Titley S. R., Hicks C. L.*, eds., Univ. Arizona Press, Tucson, Arizona, 1966.
13. *Stokes W. L.*, Relation of fault trends and mineralization, eastern Great Basin, Utah, Econ. Geol., **63**, pp. 751—759, 1968.
14. Tectonic Map of the United States, U. S. Geol. Survey and Am. Assoc. Petrol. Geologists, 1 : 2 500 000 scale, 1962.
15. *Thomas G. E.*, Continental plate tectonics, Southwest Wyoming, Wyo. Geol. Assoc. 23rd Field Conf. Geuidebook, pp. 103—123, 1971.
16. *Vening Meinesz F. A.*, Shear patterns of the Earth's crust, Trans. Am. Geophys. Union, № 1, pp. 1—61, 1947.
17. *Wertz J. B.*, The Texas Lineament and its economic significance in southeast Arizona, Econ. Geol., **65**, pp. 166—181, 1970.

СОЗДАНИЕ, ПРОВЕРКА И ОЦЕНКА ОПЫТНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВУЛКАНАМИ

П. Уорд, Дж. Итон, Э. Эндо, Д. Харлоу, Д. Маркес, Р. Аллен

(Национальный центр исследования землетрясений, Геологическая служба США, Менло-Парк, Калифорния)

ВВЕДЕНИЕ

Опытная система наблюдений за вулканами состоит из 23 многоуровенных регистраторов землетрясений и 6 двуосных наклономеров, которые установлены на 15 вулканах на Аляске, Гавайских островах, в Каскадных горах, Исландии и Центральной Америке. Регистрационные импульсы от приборов поступают через систему сбора данных ЕРТС в Менло-Парк для анализа. Такой быстрый и простой сбор данных о вулканах, расположенных на большом расстоянии друг от друга, очень важен для надзора за потенциально опасными вулканами. На всем Земном шаре существует более 500 вулканов, действовавших в историческое время, но одновременно извергаются лишь несколько. Некоторые вулканы в течение многих лет выделяют газ без взрывных извержений, другие же, кажущиеся спокойными, внезапно становятся очень активными. Визуальные признаки надвигающегося извержения пока обнаруживаются слишком поздно, чтобы обеспечить необходимые наблюдения, но существует возможность более ранней диагностики наступающей активности центральной части вулкана, кажущегося потухшим, так как часто активность проявляется в виде усиления сейсмических колебаний и изменения наклона грунта. До настоящего времени по чисто технические, а также по финансовым возможностям наблюдения ведутся только на нескольких вулканах и количество имеющихся данных сравнительно невелико.

Вопросы, связанные с разрушающим действием извержений, представляют большой научный и практический интерес и требуют постановки соответствующих наблюдений. Но к моменту начала исследований вулканы, которые были намечены для изучения, могут оказаться не активными. Таким образом, в вулканологии необходимо создать систему контроля за большим количеством вулканов с помощью сравнительно простых приборов и при минимальных затратах человеческих усилий и других ресурсов, чтобы выявить наиболее опасные вулканы. Как только они окажутся выявленными, можно начать исследование по прогнозированию разрушительных извержений.

Система сбора данных ЕРТС дает блестящую возможность получить результаты измерений с помощью приборов, расположенных на больших расстояниях друг от друга, и быстро передать их для анализа на центральную станцию при минимальных затратах. В этом случае исключается необходимость посылать наблюдателей в разные страны для восхождения на труднодоступные вулканы, особенно в плохую погоду, для обычного сбора данных. Такая система наблюдения дает также возможность одновременно быстро оценить результаты измерений в пределах сравнительно большого количества однотипных вулканов с помощью одной группы вулканологов; таким образом, новые данные по любому извергающемуся вулкану могут быть использованы для интерпретации материалов, полученных с пунктов наблюдения за другими вулканами.

Два сравнительно просто определяемых явления, относительно которых известно, что они непосредственно предшествуют извержению вулканов, — это наличие большого числа мелких землетрясений и незначительные изменения в наклоне грунта, которые определенным образом связаны с активизацией вулкана [4, 8, 7, 10]. Токарев [10] использовал даже скорость увеличения количества мелких землетрясений для прогнозирования извержений андезитовых вулканов Камчатки и Японии. Недавнему извержению вулкана Хельгафелл в Исландии предшествовал ряд мелких землетрясений, происходивших накануне (Пол Эйнарссон, устное сообщение, 1973).

Эти данные послужили основанием для усовершенствования многоуровенных регистраторов землетрясения и двуосных наклономеров с целью совместного их использования в системе передачи данных на спутник; в настоящее время производится проверка надежности использования этих приборов в самых различных условиях.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕГИСТРАТОРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

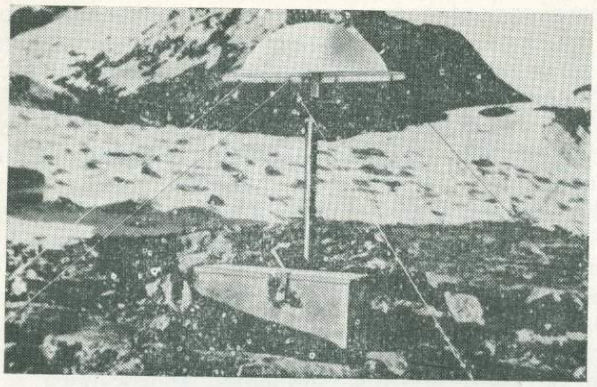
Обычные методы регистрации землетрясений приводят к получению данных со скоростью приблизительно 4 млн. бит за 12 часов. Однако система сбора данных ЕРТС может передать приблизительно 64 бита за 12 часов. Другие системы передачи данных со спутников не могут значительно увеличить эту скорость; все же система ЕРТС оказывается достаточно экономичной для широкого использования, хотя и требует значительного уплотнения данных.

Учитывая, что наиболее важным из поддающихся контролю факторов вулканических землетрясений является значительное увеличение скорости распространения местных толчков, в 1971 г. был сконструирован и опробован многоуровенный регистратор землетрясений (фиг. 1). Полученный опыт был использован в 1972 г. при создании нового регистратора применительно к программе ЕРТС-1. Всего было изготовлено 23 таких регистратора; их надежность проверялась в различных климатических условиях (фиг. 2). Основными критериями реконструируемого прибора служат: 1) десять пиков полноволнового выпрямленного



Фиг. 1. Многоуровенный регистратор землетрясений со спутниковым трансмиттером (*слева*), батареи, рассчитанные на год работы (*справа*), сейсмограф (на переднем плане).

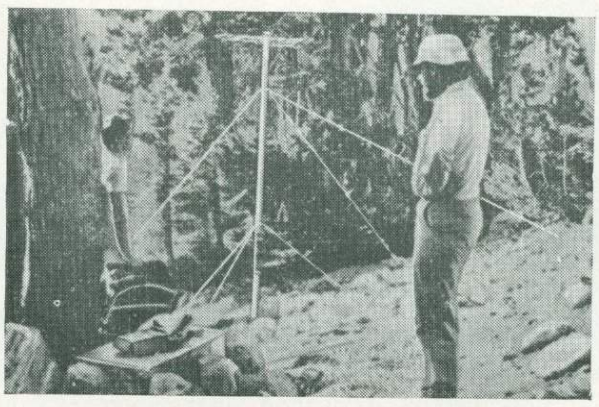
Регистратор землетрясений весит 10 кг и имеет размеры 2,4×3, 4×2,9 см.



Фиг. 2. Типичная полевая установка регистратора землетрясений.
Купол на антенне служит для защиты активных элементов антенны от снега (Аляска, склон горы Илиамна).

сейсмического сигнала, которые должны быть выше заданного порогового уровня за период 1,2 с, и 2) отсутствие сигналов, превышающих порог в течение предыдущих 15 с. Каждый прибор состоит из 4 датчиков, разделенных на пороговом уровне коэффициентом 4. Такая многоуровенная конструкция является улучшенной по сравнению с одноуровенными регистраторами землетрясений, которые применялись ранее Деккером [2], так как они дают возможность проверки надежности данных и обладают большим динамическим диапазоном. Каждый канал регистратора землетрясений регистрирует непрерывный высокий шум Земли. Эти шумовые сигналы фиксируются самостоятельными регистраторами. Все сигналы регистрируются портативным самописцем, а также передаются на спутник. У самописца имеется только одна подвижная деталь — соленоид; данные записываются на компактную двоичную матрицу. Таким образом, 75 бит информации печатается каждые 6 часов в течение 2 лет на катушке пленки шириной 6,35 мм и диаметром 7,2 см.

Конструкция нового регистратора землетрясений оказывается вполне приемлемой и надежной. Остается решить лишь один принципиальный вопрос — являются ли указанные показатели уплотнения данных действительно удовлетворительными. С этой целью в процессе проводимых исследований стандартные сейсмографы устанавливали наряду с новыми регистраторами землетрясения с тем, чтобы можно было непосредственно сравнивать уплотненные данные с обычными сейсмическими записями (фиг. 3).



Фиг. 3. Стандартная сейсмическая станция на горе Лассен-Пик.
Электронные приборы и батареи в ящике — на переднем плане слева. Сигнал передается для регистрации в Менло-Парк с помощью антенны VHF, показанной на фигуре. Для передачи используется частотная модуляция.

Другие методы уплотнения сейсмических данных с использованием числовых компьютеров и точных аналоговых устройств разрабатывались в Национальном центре исследований землетрясений [9]. Такие методы все еще слишком сложны для использования в широко распространенных системах и недостаточно разработаны и надежны, чтобы их применять на станциях надзора за вулканами, хотя в будущем на них возлагаются большие надежды.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАКЛОНОМЕРОВ

В процессе работы на Гавайских островах Итон [3], основываясь на опыте исследований в Японии [5, 6], значительно усовершенствовал наклономеры с водяной трубкой и продемонстрировал их большую ценность для изучения вулканов. С тех пор он и другие ученые искали более простых путей измерения наклонов грунта. Такое исследование привело к созданию скважинного наклономера маятникового типа, созданного Алленом [1] и другими в Национальном центре изучения землетрясений. В 1972 году северо-американской компанией «Рокуэлл» для управляемого снаряда «Минитмен» был сконструирован совершенно новый тип скважинного наклономера, в котором удачно смонтирована электронная система измерения уровней. Новый прибор — очень экономичный двуосный наклономер диаметром 5 см и длиной 0,9 м (фиг. 4). При испытаниях наряду с другими типами наклономеров, применяемых Геологической службой США, новый наклономер оказался устойчивым и достаточно чувствительным для точной регистрации земных приливов. Более того, он значительно дешевле и проще для установки, чем другие опробованные наклономеры.



Фиг. 4. Двуосевой скважинный наклономер, используемый для исследований.

Согласно программе ЕРТС один из таких приборов был установлен в спекшемся туфе на горе Лассен в Калифорнии, другой — в песках на Гавайских островах и еще два будут установлены в Гватемале. Два других наклономера были установлены на Гавайских островах в соответствии с аналогичной программой. Выработаны методы установки наклономеров в породах (фиг. 5) и почвах различного типа исключительно с помощью инструментов, которые легко демонстрируются. Однако еще требуется проверить много способов установки на участках различного типа для создания простых и наземных методов размещения новых приборов в районах с максимальным изменением наклонов грунта на андезитовых вулканах.

СОЗДАНИЕ ОПЫТНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВУЛКАНАМИ

Участки размещения регистраторов землетрясений, стандартных сейсмографов и наклономеров, установленных или запланированных в опытной системе наблюдения за вулканами, приведены в табл. 1. Ас-



Фиг. 5. Бурение шпура диаметром 4 дюйма (10, 16 см) в туфе на горе Лассен-Пик. Буровая рама скреплена с грунтом болтами.

сигнования на программу создания системы наблюдения были получены меньше чем за месяц до запуска спутника. По мере того как НАСА продолжала откладывать осуществление этой программы, стало ясно, что усовершенствовать счетчики землетрясений и установить их на Аляске и в Каскадных горах до наступления зимы не удастся. Таким образом, к конструированию регистраторов приступили в январе 1972 г., и с помощью займа за счет программы EROS и дополнительного контракта в мае 1972 г. удалось изготовить 23 прибора. Первые регистраторы были установлены в конце августа 1972 г., а к концу сентября вся система была собрана и испытана. Там, где оказалось возможным, участки размещения аппаратуры были выбраны заранее и, несмотря на ранние снегопады, установка приборов, например, в Каскадных горах, была завершена к концу октября. На Аляске в сентябре, до наступления холодов, удалось установить приборы только в районе Святого Августина. Из-за слишком низких температур вместо установки прибора в районе запланированных вулканов Ридаут и Спур был установлен дополнительный прибор близ вулкана Илиамна.

В декабре 1972 г. регистраторы землетрясений, оборудованные дифференцированными решающими потенциометрами (DCP′), были установлены на Гавайских островах и на участке близ Рейкьявика (Исландия), с тем чтобы проверить, достаточен ли диапазон системы передачи данных ERTC для связи с этими важными вулканическими областями. В ноябре и декабре были выбраны участки в Центральной Америке и получены соответствующие разрешения. Установка приборов в Гватемале началась в феврале и будет закончена в апреле. В среднем примерно 10 сигналов в день поступает со станций в Каскадных горах и 6 — с Аляски. Все передатчики настроены таким образом, чтобы сигналы поступали каждые 3 минуты. На Гавайских островах и в Исландии передатчики настроены на интервал в 90 с, так что в среднем с одной станции принимается 6—10 сообщений. Такие скорости являются вполне удовлетворительными.

Окончательным звеном в системе явится установка телетайпа для быстрого анализа данных, поступающих в Менло-Парк из Центра космических полетов в Годдарде. Предполагается, что телетайпная связь будет налажена в апреле 1973 г.

Таблица 1

Опытная сеть станций наблюдения за вулканами

Страна или штат	Вулкан	Датчик землетрясений +DCP	Сейсмические системы с визуальной регистрацией	Наклономеры +DCP	Дата установки, 1972—1973 гг.
Аляска	Св. Августин	1	1 (установленная ранее)		Сентябрь
	Илиамна	1	Сеть станций Геол. службы США		Сентябрь
Вашингтон	Бейкер	1	1		Октябрь
	Рейнир	1	1		Октябрь
	Св. Елены	1	1		Октябрь
Калифорния	Лассен	1	1	1	Октябрь
Гавайские острова	Килауэа	2	Сеть станций Геол. службы США	3	Январь
Исландия	Вблизи от Рейкьявика	1 1	1 (установленная ранее)		Декабрь
Гватемала	Пакайа	1	1	1	Февраль
	Агуа	1	—	—	Февраль
	Фуэго	1	1	1	Февраль
	Вне вулкана Сантьягунто	2		—	Март
Сальвадор	Изалько	1	1		Март
Никарагуа	Сан-Кристобаль	1	1		Март
	Телика	1	—		Март
	Серро-Негро	1	1		Март
	Вне вулкана	1	1		Март
		20	12 новых		Планируется

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В феврале 1973 г. было получено и проанализировано свыше 13 000 сигналов со спутника. Эти данные четко показывают, что регистраторы землетрясений и наклономеры вполне надежны в работе, а если учесть сложность системы и скорость, с которой они были изготовлены и установлены, то работа с этими приборами почти не создает никаких проблем. Полностью вышли из строя лишь приборы, установленные на горе Бейкер, где в результате бури в январе были

либо повреждены все антенны, либо их засыпало глубоким снегом. Следовательно, сконструированное и построенное оборудование оказалось вполне надежным и устойчивым, по крайней мере при кратковременном использовании. Установлено также, что система сбора данных ЕРТС может удовлетворительно работать в диапазоне действия станции, вдвое превышающем существующий. Естественно, что проведенный эксперимент натолкнул авторов на множество идей, касающихся настройки и усовершенствования используемой системы. Несмотря на то что до настоящего времени было собрано слишком мало данных для проведения убедительного анализа, все же ясно, что регистраторы землетрясений выделяют земные толчки из остальных сейсмических шумов и что почти у каждого исследованного вулкана, включая горы Бейкер и Рейнир в Каскадных горах, происходит множество мелких землетрясений. Предстоит установить фоновый уровень сейсмичности и наклон грунта в районе вулканов для быстрого выявления аномальной активности.

Долговременная программа проведения исследований вулканической активности предусматривает создание глобальной автоматизированной системы наблюдений за вулканами, в которой будут использованы сравнительно простые и недорогие регистраторы землетрясений и наклономеры, которые смогут определить, в каких вулканах происходят наибольшие внутренние изменения, требующие детальных исследований для оценки реальности угрозы извержения. Таким образом, основная задача сводится к наблюдению за работой этих приборов до, во время и после различных стадий вулканической активности на множестве разных вулканов, чтобы убедиться, что счетчики землетрясений, наклономеры и системы передачи данных работают согласно программе и выдают точную, конкретную и быструю информацию об эруптивной способности вулканов.

Теперь, когда основные трудности при конструировании и использовании приборов в основном успешно преодолены, вероятно, удастся провести необходимые наблюдения в течение последующих нескольких лет для выполнения поставленной задачи. Имеются все основания считать, что наблюдения за вулканическими извержениями будут вполне удовлетворительными. Поскольку диапазон сбора данных уже определился, следует распространить систему надзора на территорию Коста-Рики, где имеется несколько очень активных вулканов; это даст возможность значительно пополнить имеющуюся информацию. Иными словами, осуществляемая в настоящее время программа позволяет надежно опробовать регистраторы землетрясений и наметить функции системы на будущие годы.

При этом следует установить возможно больше наклономеров для надлежащего их опробования, поскольку в первоначальную программу было включено лишь несколько наклономеров, так как на стадии планирования работ не была показана целесообразность использования недорогих скважинных наклономеров. В настоящее время, когда пригодность и практическая выгода применения скважинных наклономеров вполне обоснована, необходимо проверить их надежность и устойчивость в различных условиях и разработать методы применения на вулканах различного типа.

В заключение следует сказать, что создание в соответствии с программой ЕРТС-1 разработанной и опробованной Геологической службой США опытной системы надзора за вулканами почти завершено. Система работает хорошо. По мере накопления данных и их оценки будет становиться все более очевидным главное техническое преимущество системы надзора за потенциально опасными вулканами, заключаю-

щееся главным образом в возможности сбора данных с помощью спутника ЕРТС-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allen R. V.,* A borehole tiltmeter for measurements at tidal sensitivity, Bull. Seism. Soc. Am., **62**, pp. 815—821, 1972.
2. *Decker R. W.,* A seismic event counter for active volcanoes, Bull. Seism. Soc. Am., **58**, pp. 1353—1358, 1968.
3. *Eaton J. P.,* A portable water-tube tiltmeter, Bull. Seism. Soc. Am., **49**, pp. 301—316, 1959.
4. *Eaton J. P., Murata K. J.,* How volcanoes grow, Science, **132** (3432), pp. 925—938, 1960.
5. *Hagiwara T.,* Observations of changes in the inclination of the earth's surface at Mt. Tsukuba, Bull. Earthq. Res. Inst., **25**, pp. 27—32, 1947.
6. *Hagiwara T., Kasahara K., Yamada J., Saito S.,* Observation of the deformation of the earth's surface at Aburatsubo, Miura Peninsula, Bull. Earthq. Res. Inst., **29**, pp. 455—468, 1951.
7. *Minakami T.,* Fundamental research for predicting volcanic eruptions (Part 1) earthquakes and crustal deformations originating from volcanic activities, Bull. Earthq. Res. Inst., **38**, pp. 497—544, 1960.
8. *Minakami T., Hiraga S., Miyazaki T., Utibori S.,* Fundamental research for predicting volcanic eruptions (Part 2), seismometrical surveys of volcanoes in Japan and volcano Sotara in Colombia, Bull. Earthq. Res. Inst., **47**, pp. 893—949, 1969.
9. *Stewart S. W., Lee W. H. K., Eaton J. P.,* Location and realtime detection of microearthquakes along the San Andreas Fault System in Central California, Bull. Roy. Soc. New Zealand, **9**, pp. 205—209, 1971.
10. *Tokarev P. I.,* Forecasting volcanic eruptions from seismic data, Bull. Volcanol., **35** (1), pp. 243—250, 1971.

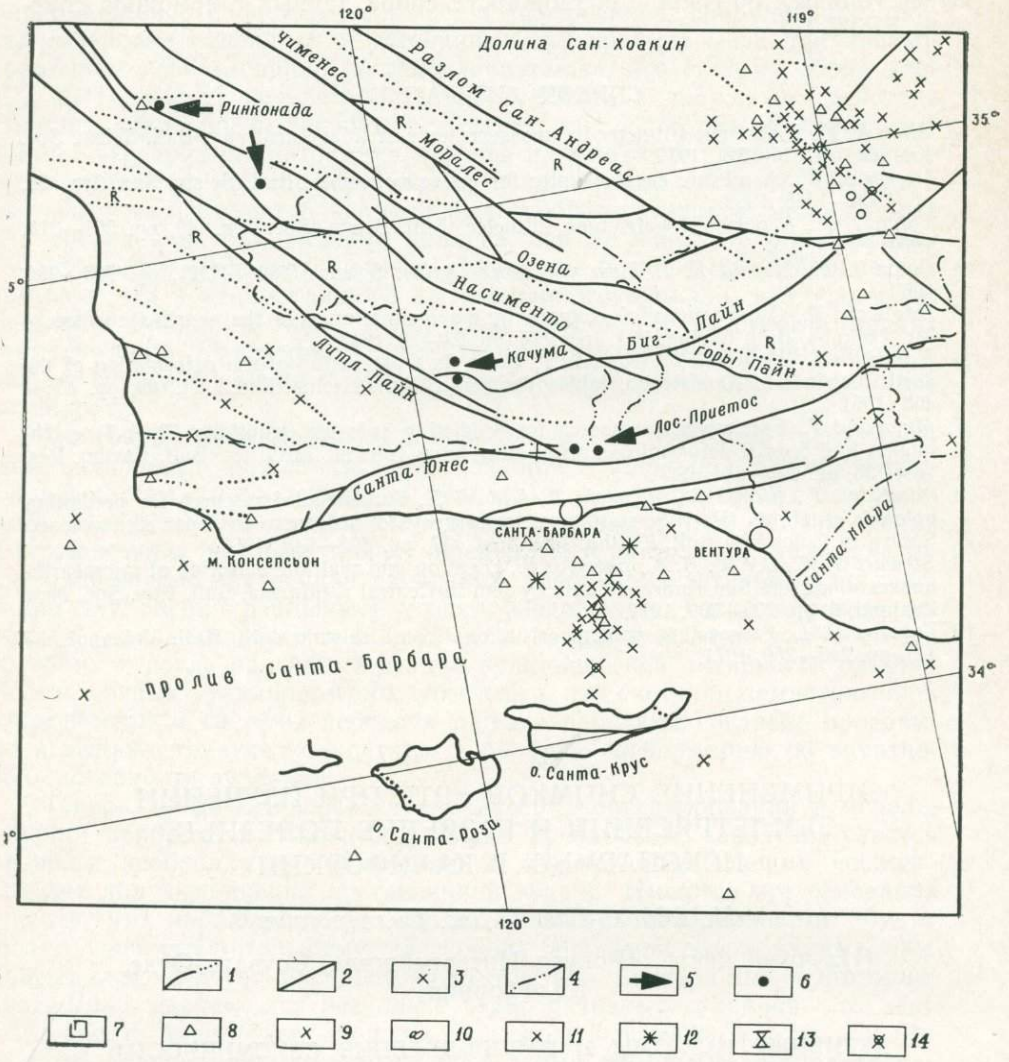
ПРИМЕНЕНИЕ СНИМКОВ ЕРТС ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И РАЗВЕДКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В КАЛИФОРНИИ

М. Абдель-Гавад, Дж. Силверстейн

(Научный центр, «Рокуэл Интернейшнл», Соузанд-Оукс, Калифорния)

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ

Одной из самых насущных и острых геологических проблем в Калифорнии является изучение землетрясений, наносящих большой ущерб густонаселенным районам, промышленным центрам и коммуникациям. Давно установлено, что причиной землетрясений служит активность системы разломов Сан-Андреас. Однако при нанесении эпицентров землетрясений на снимки ЕРТС-1 становится ясным, что для определения районов возможных землетрясений одних только сведений о распределении сейсмичности еще недостаточно. Так, землетрясение Сан-Фернандо и Окснард произошли недавно в районах, которые, если судить по истории сейсмичности, следовало бы считать сравнительно безопасными. С другой стороны, крупные участки разлома Сан-Андреас, которые (по геологическим данным) на современном этапе проявляют активность, оказываются сейсмически спокойными. Существующие данные об исторически обозримых землетрясениях охватывают слишком короткий интервал времени, в котором распределение сейсмичности не остается постоянным. Поэтому возникает необходимость поиска нового эффективного средства выявления разломов со следами



Фиг. 1. Расположение разломов, сейсмичности и месторождения ртути в западной части Поперечных хребтов, Калифорния.

1 — разлом со следами современных движений; *2* — известные разломы; *3* — разломы, выделенные по данным ЕРТС; *4* — линии водотоков; *5* — ртутные горнорудные районы; *6* — ртутные рудники. Эпицентры землетрясений (*7—14*): *7* — магнитуда не известна; *8* — магнитуда 0—4,0; *9* — магнитуда 4,1—4,9; *10* — магнитуда 5,0—5,4; *11* — магнитуда 5,5—5,9; *12* — магнитуда 6,0—6,9; *13* — магнитуда 7,0—7,9; *14* — магнитуда 8,0—8,4. Буквой *R* обозначены районы, для которых по снимкам ЕРТС получены данные об активности разломов в голоцене и в настоящее время.

современной геологической активности, что служило бы более надежной основой для оценки районов с точки зрения потенциальной опасности возникновения землетрясения.

Для проверки возможности применения снимков ЕРТС при изучении распределения сейсмичности использовались данные запоминающего устройства компьютера, с помощью которого на прозрачную основу (в границах снимка ЕРТС) наносились эпицентры всех известных в прошлом землетрясений, после чего они сравнивались с имеющимися на снимке линиями простирания или местами пересечения разломов, а также с другими признаками современных тектонических нарушений.

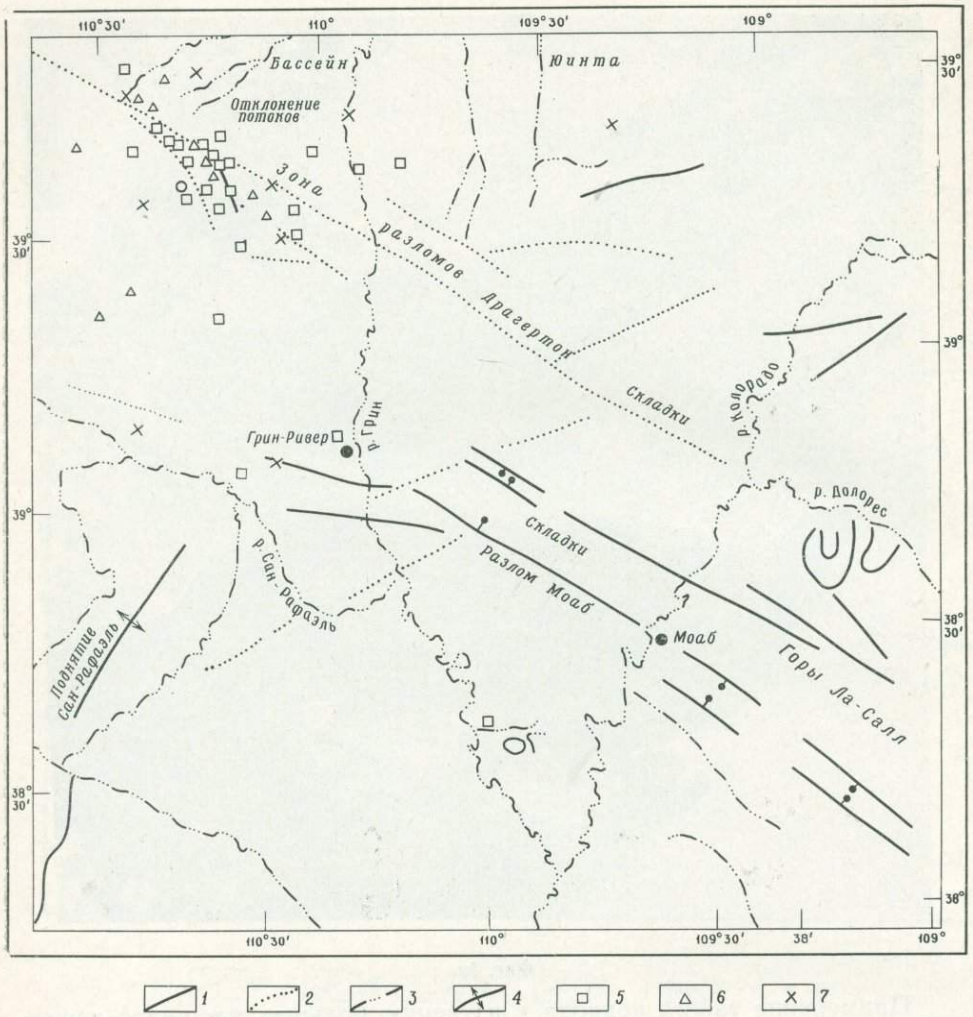


Фиг. 1а.

Применение такого подхода к изучению больших площадей в штатах Калифорния, Юта и Монтана иллюстрировано фиг. 1 и 2.

На фиг. 1 (снимок MCC 1037-18064) представлена карта западной части Поперечных хребтов в Калифорнии, на которой сплошной линией показаны некоторые известные крупные разломы. По результатам анализа данного снимка сделано несколько важных выводов. Главный вывод состоит в том, что многие изгибы разлома Сан-Андреас и другие его элементы, изображенные на геологических картах (атлас Калифорнии), соответствуют четкой системе поперечных разломов запад-северо-западного простирания, расположенных под углом к системе Сан-Андреас и способствовавших образованию в ней изгибов, ответвлений и других нарушений.

Хорошо известно, что в Поперечных хребтах имеются крупные широтные разломы, многие из которых характеризуются левосторонними сдвигами. С помощью снимков ERTC удалось показать, что широтная система разломов не ограничивается Поперечными хребтами, а пересекает также Береговые хребты. Предполагается, что некоторые разломы этой системы являются крупными коровыми разрывами; они проходят под долиной реки Сан-Хоакин и, возможно, обусловливают изгибы в очертании западной стороны блока Сьера-Невада и Большой долины. Другие поперечные разломы имеют вид четких коротких отрез-

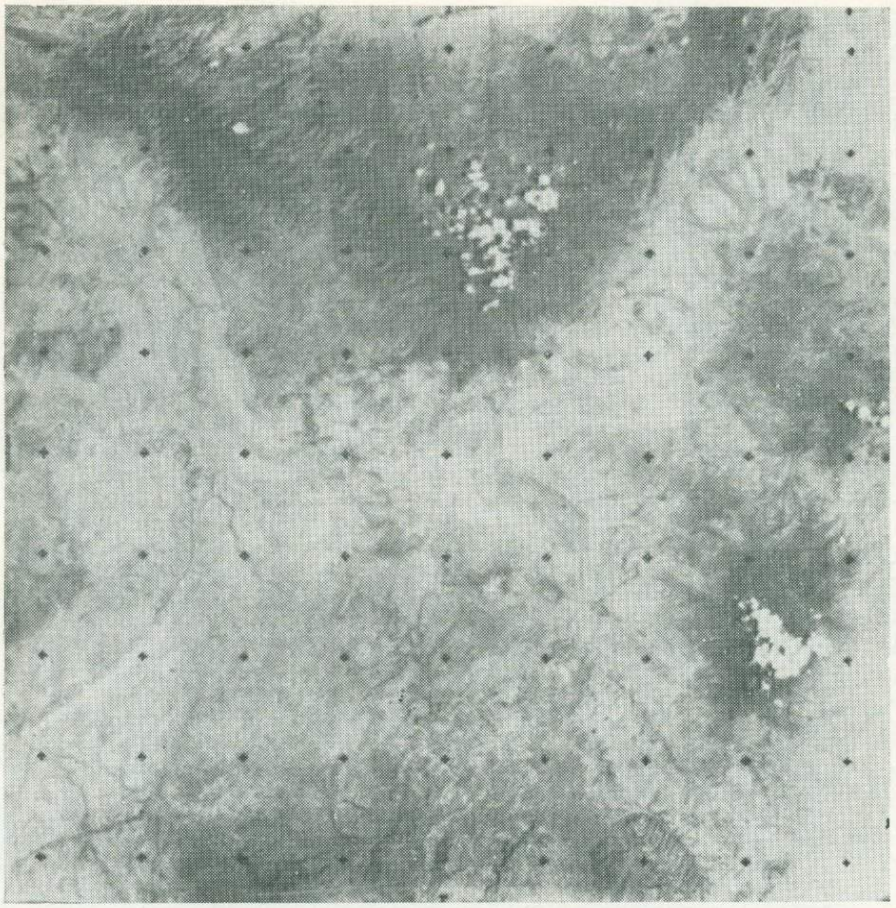


Фиг. 2. Расположение разломов и сейсмичность в северной части плато Колорадо, Юта.

1 — известные разломы; *2* — разломы, выделенные по данным ЕРТС; *3* — линии русл; *4* — оси антиклиналей. Эпицентры землетрясений (*5*—*7*): *5* — магнитуда не известна; *6* — магнитуда 0—4; *7* — магнитуда 4,1—4,9.

ков между сквозными разломами системы Сан-Андреас. Вероятно, это останцы древней поперечной системы сдвигов, в настоящее время сильно нарушенной, образующей ответвление и расположенной частично в пределах системы Сан-Андреас. На геологических картах Калифорнии некоторые из этих поперечных разломов представлены в виде сог ряженных или разветвляющихся вторичных структур системы Са Андреас. Снимки ЕРТС-1 в отличие от карты показывают, что они о носятся к хорошо выраженной, самостоятельной системе разломов.

Это наблюдение имеет особое научное и практическое значение. Научная сторона его рассмотрена более детально в другой работе [1]. Однако здесь уместно отметить, что особая сложность разломно-глыбовой мозаики земной коры в Калифорнии и тихоокеанских Кордильерах обусловлена в основном как частными, так и эпизодическими взаимодействиями не одной первичной системы сдвигов, а, вероятнее, двух, которые пересекают и смещают друг друга; этот процесс, по-видимому, продолжается и в настоящее время.

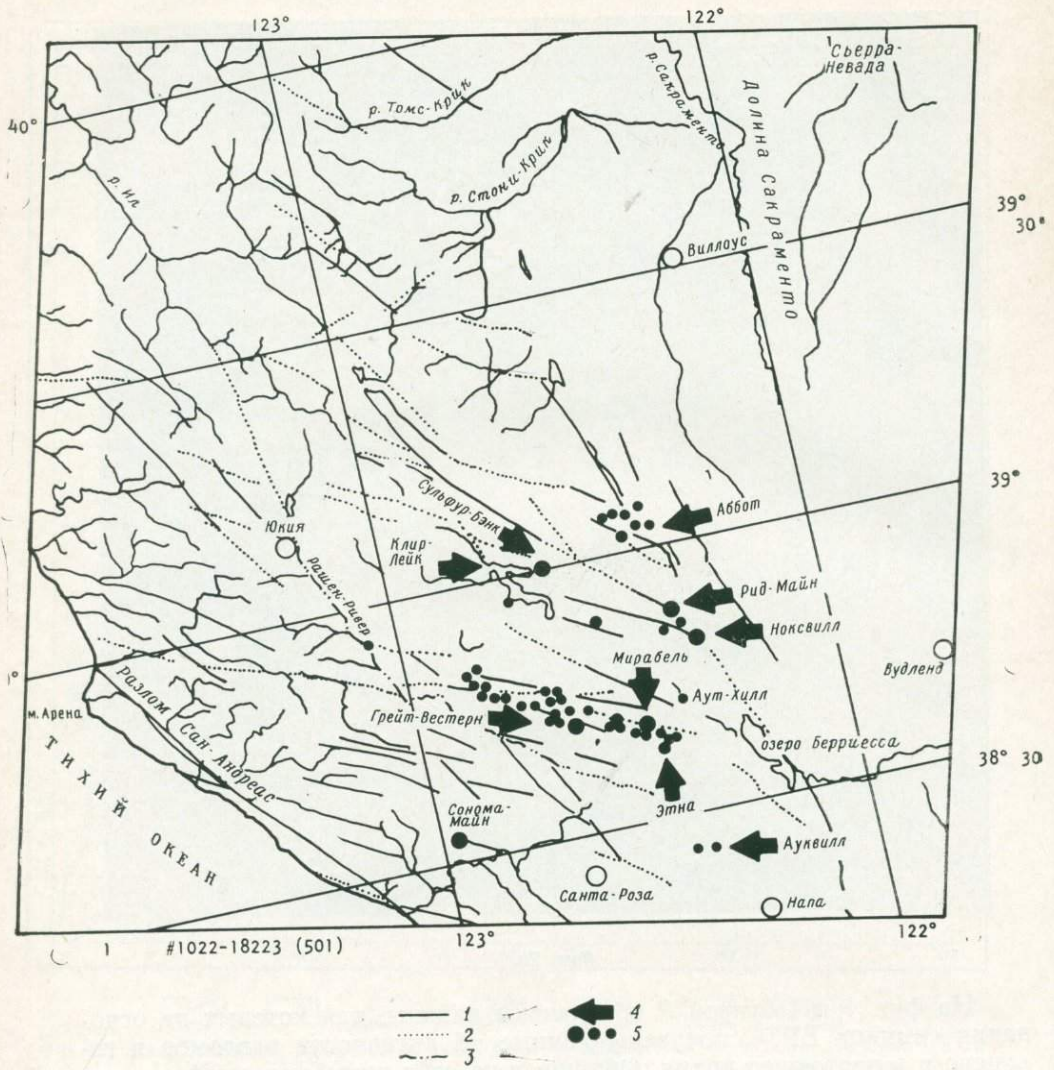


Фиг. 2а.

На фиг. 1 и 4 буквой *R* обозначены районы, для которых на основании снимков ЕРТС получены данные об активности разломов в голоцене и в настоящее время. Обращает на себя внимание тот факт, что во многих местах признаки современной активности на поперечных разломах столь же многочисленны, как и в системе разломов Сан-Андреас. Напрашивается вывод, что нарушения, изгибы и ответвления в системе Сан-Андреас возникают за счет поперечных деформаций. Этот процесс неизбежно приводит к образованию участков сжатия, где возникают тектонические напряжения, которые затем разрешаются внезапными расколами. Такое сложное взаимодействие между двумя эпизодически активными системами разломов объясняет тенденцию к концентрации землетрясений на участках пересечения разломов — наблюдение, с некоторых пор ставшее общеизвестным [3].

При планировании размещения геофизических станций для наблюдения за разломами гораздо больше внимания, чем до сих пор, следует уделить основным поперечным разломам.

На фиг. 1 показаны многие линеаменты, выявленные по снимкам ЕРТС-1, которые ранее либо не картировались, либо были показаны на картах вместе с другими разломами. Особый интерес представляет линеамент, который проходит по каньону Хот-Спрингс и образует юго-восточное продолжение разлома Куяма — Озена, пересекая при этом

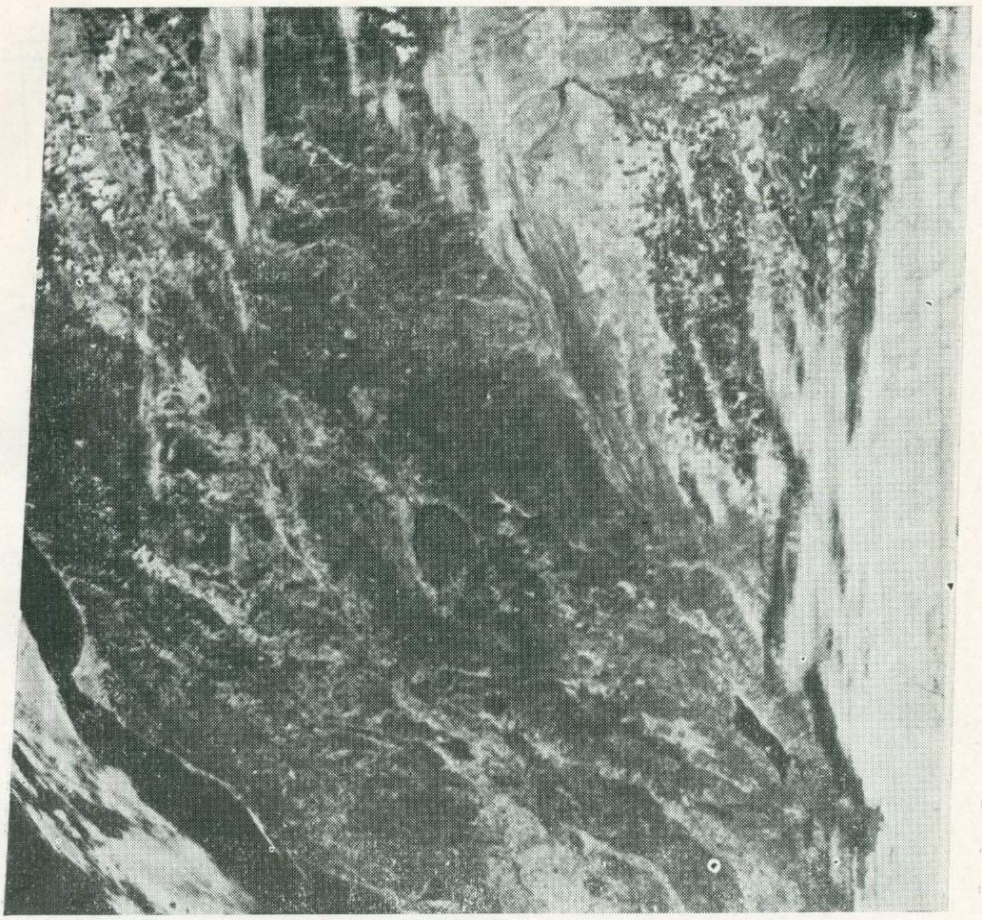


Фиг. 3. Связь месторождений ртути с поперечными разломами, Береговые хребты, Калифорния.

1 — известные разломы; *2* — разломы, выявленные по снимкам ЕРТС; *3* — линии русл; *4* — ртутные горнорудные районы; *5* — ртутные месторождения.

разлом Биг-Пайн. Этот линеамент образует единую линию со средним отрезком разлома Сан-Габриель. Промежуточный участок близ озера Перу также расположен в зоне разлома.

При выявлении связи между распределением сейсмичности и расположением разломов по снимкам ЕРТС-1 устанавливается, что в большинстве районов, где наблюдается концентрация землетрясений, обычно имеются явные признаки современных дизъюнктивных дислокаций. Однако обратная картина совершенно не обязательна: многие районы и даже участки крупных разломов, в пределах которых геоморфологические особенности (такие, как разветвления водотоков или отчетливые линеаменты в современном аллювии) свидетельствуют о современных дизъюнктивных дислокациях, оказываются сейсмически спокойными. Это показывает, как отмечалось выше, что оценка сейсмически опасных районов на основе современного распределения земле-

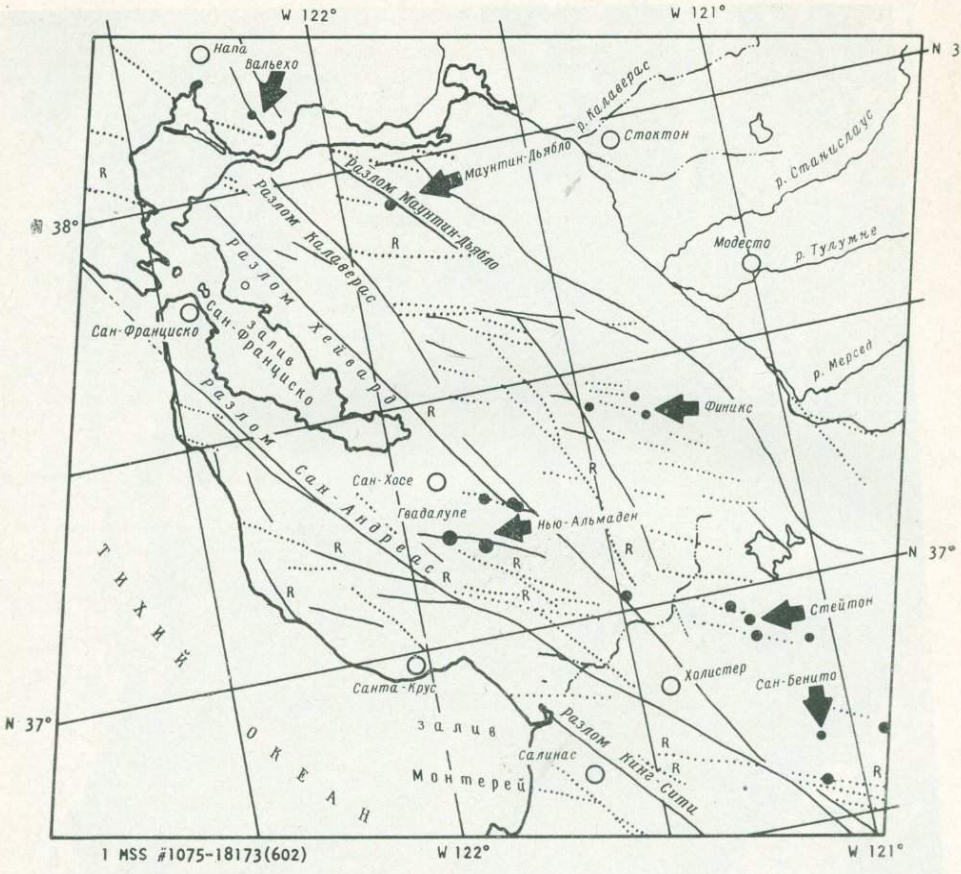


Фиг. 3а.

трясений может оказаться ошибочной и дать неожиданные результаты. Практика использования данных ERTC на обширных площадях в Калифорнии, Неваде, Юте и Соноре свидетельствует о возможности выявления с их помощью многих еще не известных потенциально активных разломов. Карты размещения потенциально активных разломов, по мнению авторов, отличались бы от имеющихся в настоящее время большей детальностью и позволили бы точнее обосновать работы по защите от землетрясений.

С другой стороны, нанесение на снимки ERTC эпицентров землетрясений, происходивших в прошлом, позволяет успешно выявить неизвестные ранее разломы.

Для примера на фиг. 2 приведен снимок RBV северной части плато Колорадо в штате Юта. Эпицентры известных в прошлом землетрясений, нанесенные на прозрачную основу, неожиданно сгруппировались в северо-западной части территории. Это привлекло внимание к зоне разломов северо-западного простирания, проходящей близ города Драгертон через горы Патмос и юго-западную часть плато Тавапутс. Зона разломов, названная зоной Драгертон, простирается параллельно зонам разломов Солт-Велли — Парадокс-Велли и Моаб-Спэниш-Велли — Гипсум-Велли.



Фиг. 4. Связь месторождений ртути с поперечными разломами. Береговые хребты, Калифорния.

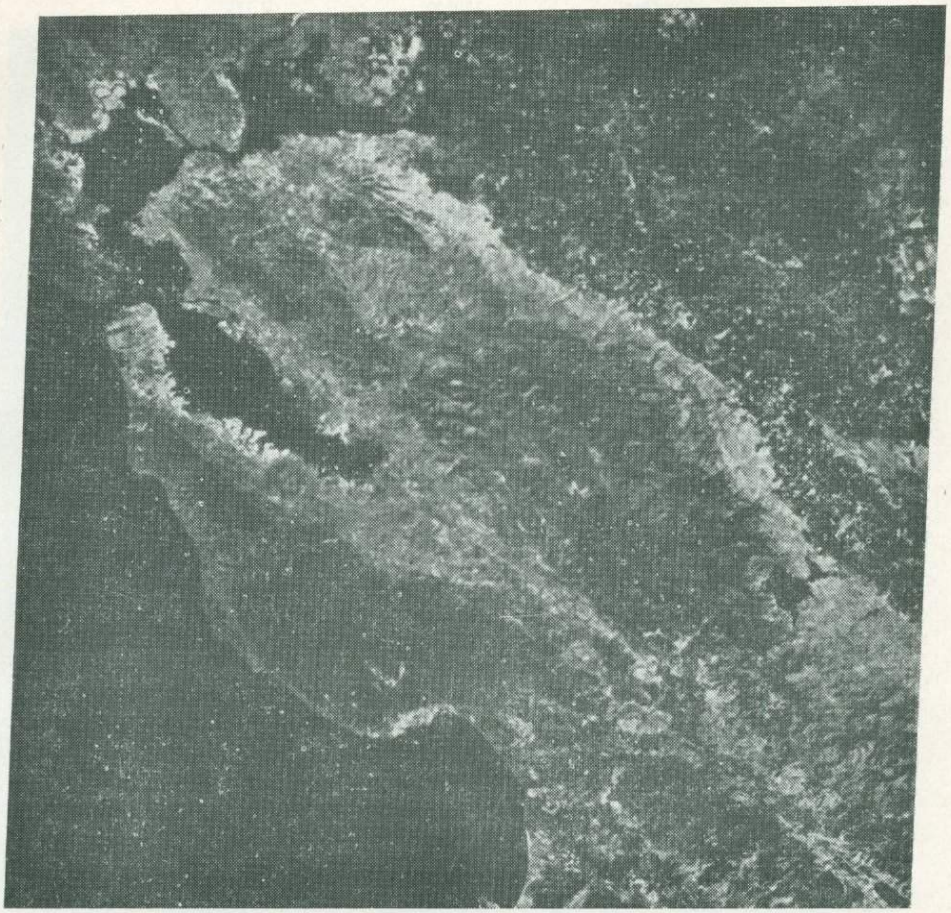
Условные обозначения см. на фиг. 1, 3.

Разломы зоны Драгертон не показаны ни на тектонической карте Северной Америки [12], ни на геологической карте США [19], ни на тектонической карте плато Колорадо [18], хотя выделенный линеамент представляет интерес по нескольким причинам. В юго-восточном направлении он прослеживается до слияния рек Долорес и Колорадо и, вероятно, служит северо-западным продолжением крупного разлома, ограничивающего на юго-западе горы Анкомпагре и продолжающегося далее на юго-восток до центра третичного вулканизма в горах Сан-Хуан (Колорадо).

СВЯЗЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РТУТИ С ПОПЕРЕЧНЫМИ РАЗЛОМАМИ

В Калифорнии известно около 100 месторождений ртути, расположенных в 21 районе. Большинство месторождений находится на территории Береговых хребтов от Лейк-Каунти на севере до Санта-Барбара на юге [9].

Давно установлено, что ртутные руды образуются в эпитермальных (низкотемпературных гидротермальных) условиях и часто приурочены к районам третичного и четвертичного вулканизма. Месторождения ртути, встреченные в Береговых хребтах Калифорнии, залегают примерно в одинаковых условиях, но отдельные из них часто считают



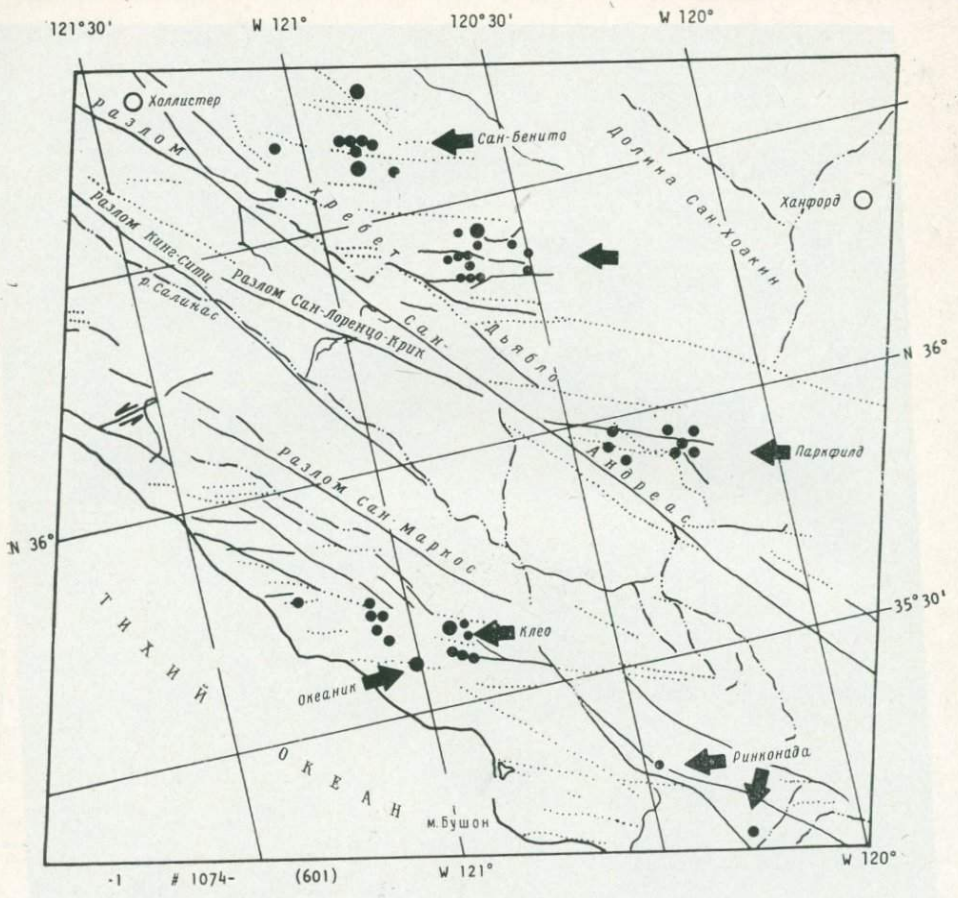
Фиг. 4а.

эрратическими, поскольку они резко отличаются по характеру, размеру, сортности руд и местным тектоническим условиям.

Карбонатно-кремнистые породы — продукты изменения серпентина — часто ассоциируются с месторождениями ртути, но распространены значительно шире, чем ртутные рудопроявления, поэтому сами породы не следует использовать как поисковый признак. В северной Калифорнии ртутные руды обнаружены в районе развития вулканов Клир-Лейк (фиг. 3). Крупное месторождение ртути Сульфур-Бэнк приурочено к району горячих источников [20].

Почти не было данных о наличии какого-либо характерного регионального тектонического элемента или структуры, которые контролировали бы региональное распространение месторождений ртути, хотя известно, что многие месторождения приурочены к породам Францисканской группы и перекрывающим верхнемеловым толщам, сильно дислоцированным и нарушенным разломами и сдвигами.

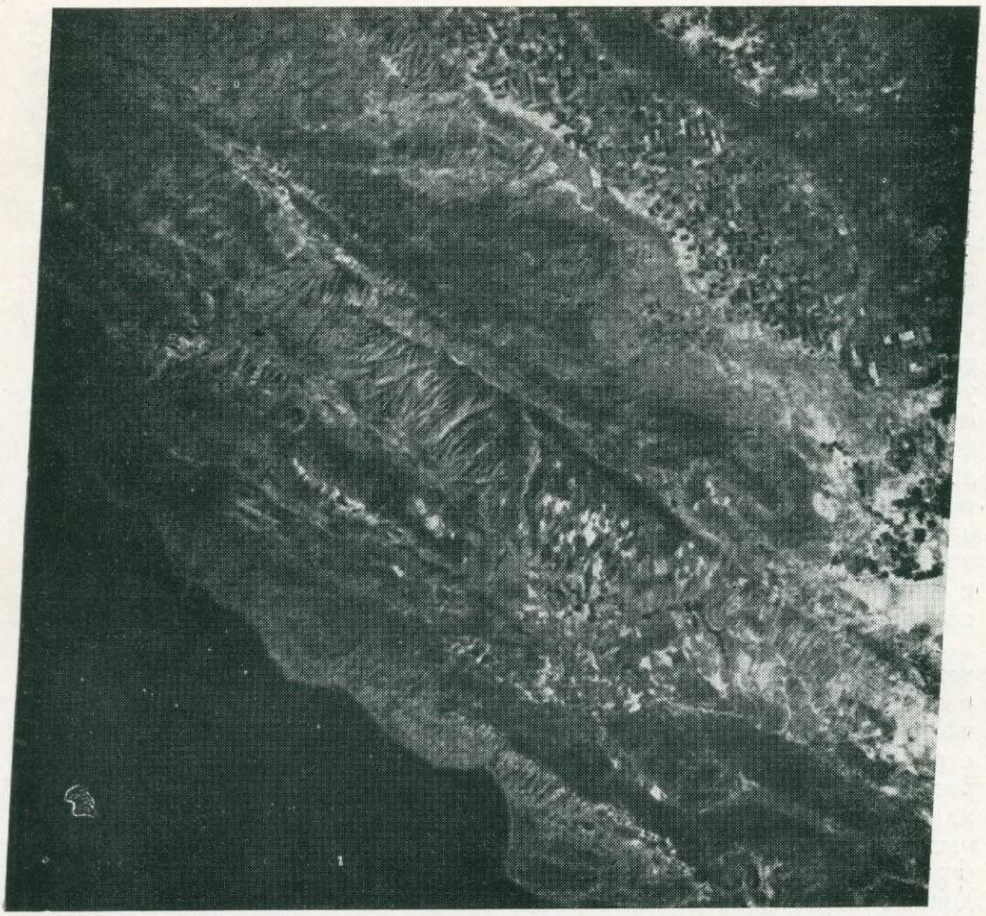
Поперечные разломы играют важную роль в истории тектонических движений Тихоокеанской системы Калифорнии и наряду с большой научной ценностью представляют определенный экономический интерес. Расположение ртутных месторождений, нанесенных на снимки



Фиг. 5. То же, что на фиг. 3.

ЕРТС для изучения характера их распределения в районе Береговых и Поперечных хребтов, удивительно точно совпало с зонами сдвига запад-северо-западного простирания, которые расположены под углом к основному простиранию системы Сан-Андреас.

Наиболее интересная закономерность наблюдается в северной Калифорнии в районах ртутных месторождений Клир-Лейк и Грейт-Вестерн. На фиг. 3 приведена карта, сделанная на прозрачной основе и соответствующая снимку ЕРТС-1 МСС 1022-18223. На карту нанесены все известные разломы, а также разломы, выявленные по снимкам ЕРТС. С возможной в даном случае точностью, по данным Бейли [4], нанесены также наиболее крупные месторождения ртути. Группы месторождений выделяются по названию районов или крупных рудников. Скопления ртутных рудников Грейт-Вестерн, Этна, Мирабель и Оут-Хилл характерны тем, что они образуют четкую полосу запад-северо-западного простирания, совпадающую с зоной поперечных разломов; многие из этих разломов имеются на геологической карте района Санта-Роза (атлас Калифорнии). В этом особом случае связь между ртутными месторождениями и поперечными разломами достаточно хорошо устанавливается по рисунку разломов на геологической карте. Подобная зависимость, однако, не столь очевидна на геологических картах других участков Береговых хребтов, где большинство изученных поперечных разломов показано в виде изгибов ориентированной на северо-



Фиг. 5а.

запад системы разломов Сан-Андреас и поэтому в качестве самостоятельной системы не выделяется. В то же время структуры многих поперечных разломов различаются на снимках ЕРТС-1.

В районах, расположенных южнее, связь между ртутными рудниками и поперечными разломами на геологических картах менее очевидна, чем на снимках ЕРТС. На фиг. 4 известные месторождения ртути показаны совместно с зонами поперечных разломов, выявленных по снимкам ЕРТС-1 1075-18173. На рассматриваемом участке Береговых хребтов имеется 6 ртутных горнорудных районов; здесь расположено месторождение Нью-Альмаден — первое открытое в Северной Америке ртутное месторождение, которое с 1846 г. до сих пор остается одним из двух наиболее продуктивных в Калифорнии.

Месторождение Нью-Альмаден представлено типичным ртутным оруденением, приуроченным к кремнисто-карбонатным породам, которые залегают на граувакках, кремнистых сланцах, зеленокаменных породах и серпентинитах Францисканской формации. Рудник расположен на «антиклинали северо-западного простирания, юго-западное крыло которой подверглось сдвигу, а по узким трещинам северо-восточного простирания внедрилась киноварь» [9]. Хотя некоторые поперечные разломы и показаны на геологической карте (лист Сан-Хосе) главным

образом в виде флексур в системе разломов Сан-Андреас, зависимость положения Нью-Альмадена, Гваделупы и других месторождений от зон поперечных разломов становится очевидной лишь при рассмотрении снимков ЕРТС. В хребте Дьябло, восточнее разлома Хейуорд, четыре ртутных месторождения — Вальехо, Маунт-Дьябло, Феникс и Стейтон — расположены в зонах поперечных разломов или близ этих зон, выявленных по снимкам ЕРТС-1.

На фиг. 5 показана пространственная зависимость между шестью ртутными районами и поперечными структурами в южной части Береговых хребтов. Горнорудный район Нью-Идриа в округе Сан-Бенито выделяется как наиболее продуктивный в США; вместе с месторождением Нью-Альмаден они дали 0,5 млн. фляг ртути (172,5 тыс. т) с начала добычи в 1853 г. Месторождения горного района Нью-Идриа приурочены к массиву серпентинитов, прорывающих толщу глинистых сланцев и песчаников верхнемеловой формации Паноч и третичные осадочные породы. Указывалось [11, 9, 13], что ртутное оруденение локализуется здесь под надвигом Нью-Идриа в измененных верхнемеловых породах формации Паноч. Крупный рудный столб расположен у пересечения надвига Нью-Идриа и секущего разлома. Вероятно, важно, что надвиг Нью-Идриа имеет характерное поперечное простирание и может рассматриваться как поверхностное выражение глубинного поперечного сдвига.

При изучении поперечных разломов в этой части Береговых хребтов, в частности разломов, пересекающих хребет Дьябло, восточнее разлома Сан-Андреас, и при сравнении с данными геологических карт часто обнаруживалась их взаимосвязь с известными складками. Эти структуры часто рассматривают как складки волочения и вторичные разломы, возникшие в результате первичного правостороннего сдвига на разломе Сан-Андреас. Большинство поперечных разломов, показанных на геологических картах, проходит сквозь мезозойскую толщу Францисканской формации и перекрывающие их верхнемеловые осадочные породы, лишь немногие из них пересекают породы моложе эоценового возраста. Снимки ЕРТС показывают, однако, что большинство поперечных разломов, в частности разломы, встречающиеся вдоль флексур на восточном склоне хребта Дьябло, выдерживаются в виде четких линеаментов, пересекающих третичные и четвертичные осадочные породы Большой долины. Если тектонические напряжения, вызвавшие поперечные сдвиги, могли возникнуть в дотретичное время, то линеаменты в более молодых отложениях долины Сан-Хоакин свидетельствуют о том, что процесс осадконакопления сопровождался поперечными сдвиговыми деформациями, которые, вполне вероятно, периодически возобновляются и в настоящее время.

Фиг. 1 соответствует снимку ЕРТС-1 1037-18064 и показывает сложную взаимозависимость между Поперечными хребтами и характерными левосторонними ложными сбросами, с одной стороны, и Береговыми хребтами и системой разломов Сан-Андреас — с другой. Три ртутных месторождения — Ринконада, Кочума и Лос-Приетос — указывают на связь с поперечными структурами. Несмотря на то что открытое месторождение Сан-Бард (район Лос-Приетос) в округе Санта-Барбара оказалось одним из самых продуктивных с конца 60-х годов нашего века [14], может показаться странным, что в Поперечных хребтах ртутные месторождения не были обнаружены в большом количестве. Широкое распространение мощного покрова третичных морских осадочных пород в этой провинции, возможно, маскирует ртутные рудопроявления на поверхности, но не исключает возможности наличия крупных месторождений ртути на глубине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abdel-Gawad M., Silverstein J.,* Earthquake epicenters and fault intersections in central and southern California, Type II Progress Report June-November 1972, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, p. 23, 1972.
2. *Abdel-Gawad M., Silverstein J.,* The fault pattern of southern California — a model for its development (Abstract), Geol. Soc. Am., Annual Meeting, Minneapolis, Minnesota, November 13, 1972.
3. *Allen C. R., St. Amard P., Richter C. F., Nordquist J. M.,* Relationship between seismicity and geologic structure in the southern California region, Bull. Seism. Soc. Am., **55**, pp. 753—797, 1965.
4. *Bailey E. H.,* Mercury in the United States, United States Geol. Survey Mineral Invest., Res. Map MR 30, 1962.
5. *Bailey E. H., Everhart D. L.,* Geology of quicksilver deposits of the New Almaden district, U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 360, p. 206, 1964.
6. *Bailey E. H., Smith R. M.,* Mercury — its occurrence and economic trends, United States Geol. Survey Circ. 496, pp. 1—11, 1964.
7. California Department of Water Resources Bulletin 116-2 Crustal Strain and Fault Movement Investigation, Faults and Earthquake Epicenters of California, January 1934, December 1961.
8. *Davis F. F.,* Mercury, in: Mineral Commodities of California, Calif. Div. Mines and Geology Bull. 176, pp. 341—356, 1957.
9. *Davis F. F.,* Mercury, in: Mineral Resources of California, Calif. Div. Mines and Geology Bull. 191, pp. 247—254, 1966.
10. *Eardley A. J.,* Structural Geology of North America, New York, Harper and Row Publ. Inc., 2nd ed., p. 743, 1962.
11. *Eckel E. B., Myres W. B.,* Quick silver dpeosits of the New Idria district, San Benito and Fresno Counties, California, Calif. Div. Mines, Report 42, pp. 81—124, 1946.
12. *King P. C.* (comp.), Tectonic Map of North America, Scale 1 : 5 000 000, United States Geol. Survey, 1969.
13. *Linn R. K.,* New Idria Mining District, in: *Ridge J. D.,* ed., Ore Deposits of the United States, The Craton-Sales Volume, Am. Inst. Mining, Metal. and Petrol. Engineers, New York, **3**, pp. 1623—1649, 1933—1967.
14. *Mitko F. C.,* The Mineral Industry of California, in: Minerals Yearbook, **3**, U. S. Dept. of Interior Bureau of Mines, pp. 127—158, 1968.
15. NOAA Geographic Hypocenter Data File (Magnetic Tape), January 1961 through December 1971.
16. NOAA Hypocenter Data Cards, January 1972 through August 1972.
17. *Ryall A., Slemmons D. B., Gedney L. D.,* Seismicity, tectonism, and surface faulting in the western United States during historic time, Bull. Seism. Soc. Am., **56**, 5, pp. 1105—1135, 1966.
18. *Shoemaker E. M.,* Structural features of southeastern Utah and adjacent parts of Colorado, New Mexico, and Arizona, Guidebook to the Geology of Utah, № 9, Utah Geol. Soc., pp. 48—69, 1954.
19. *Stose G. W., Ljungstedt O. A.* (comp.), Geologic Map of the United States, scale 1 : 2 500 000 000, 1960.
20. *White D. E., Roberson C. E.,* Sulphur Bank, California, a major hot-spring quicksilver deposit, in: Petrologic Studies, A volume in honor of A. F. Buddington, Geol. Soc. Am., pp. 397—428, 1962.

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ АЛЯСКИ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ СНИМКОВ ЕРТС-1

Л. Гедни, Дж. Ван-Уормер

(Геофизический институт, Университет Аляски, Фэрбенкс, Аляска)

ВВЕДЕНИЕ

Для района столь отдаленного и труднодоступного, как большая часть Аляски, геологическое картирование в лучшем случае является импровизацией. Картирование в этом штате (если оно вообще проводилось) часто является результатом лишь нескольких «точечных на-

блюдений» с помощью вертолета и последующей интерполяции полученных данных. По этой причине применение снимков ЕРТС при изучении подобных районов имеет особенно важное значение.

Примером структурных образований, которые обычно пропускали при полевом геологическом картировании на Аляске, служит разлом Денали, до 1957 г. даже не имевший названия, хотя по масштабу, он, вероятно, более значителен, чем разлом Сан-Андреас [6]. Затем было обнаружено, что этот разлом входит в качестве важного элемента в систему трансформных тихоокеанских разломов, частью которой является и разлом Сан-Андреас [7]. Дальнейшие исследования [5] показали, что максимальные тектонические подвижки между северной Тихоокеанской плитой и континентом происходят, вероятно, в настоящее время вдоль системы разломов Точунда, связывающей активные участки разломов Денали и Фэруэтер. Все эти образования отчетливо видны на снимках ЕРТС-1 и выражены на них гораздо яснее, чем на детальных картах, полученных в результате наземной съемки. Рассмотрим для примера участок, где пересекаются разломы Денали и Точунда (ID E-1081-20275). Очевидно, что линия разлома Точунда протягивается в северо-западном направлении через реку Стоун, долину реки Набесна к горам на северо-западе. Однако на наиболее детальной геологической карте, имеющейся для данной территории [4], эта структура не отражена, вероятно, по следующим причинам: разлом по простиранию перекрыт аллювиальными отложениями и пересекает область развития слабо дифференцированных горных пород; горные районы для непосредственного картирования явно недоступны. На снимке также виден небольшой не известный ранее разлом на северо-западном склоне горы Сэнфорд. Хотя это и второстепенная структура, она интересна тем, что является взбросом, так как породы, слагающие гору, опущены относительно пород, развитых в долине. Ценность снимков, полученных при низком положении солнца, подтверждается тем, что упомянутый разлом не виден (без увеличения) на двух других снимках, отснятых со спутника ЕРТС ранее (в августе и сентябре) в условиях безоблачного неба. Настоящий снимок был сделан 12 октября, когда угол положения солнца над горизонтом был равен 18°. Углы положения солнца для более ранних пересечений составляют 43 и 25° (снимки ID E-1010-20331 и E-1063-20273).

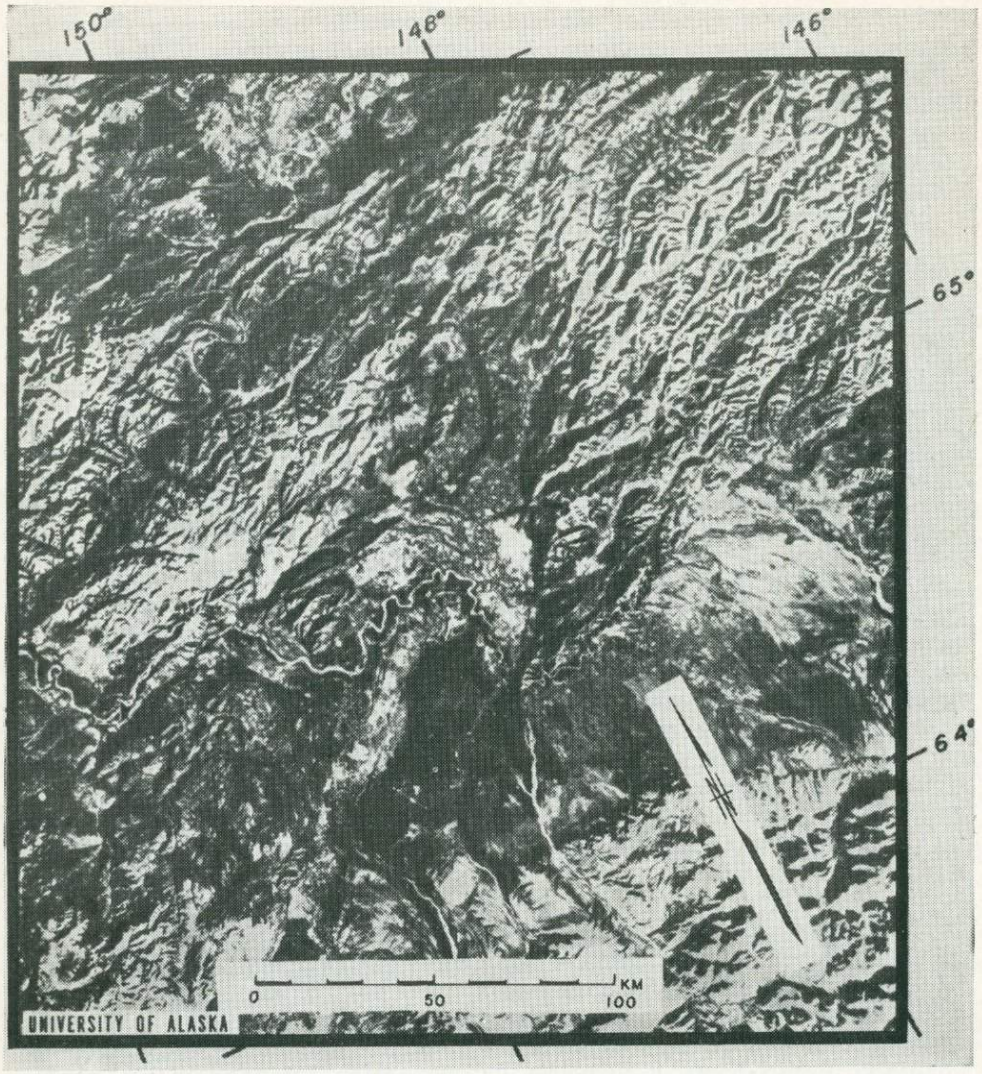
ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ТЕКТОНИКЕ АЛЯСКИ

Одно из главных направлений настоящего исследования состояло в изучении сейсмической активности разломов, существование которых предполагалось на основании наземных исследований сейсмичности. После нескольких лет накопления фактов. было сделано заключение, что во внутренней и южной частях центральной Аляски, где традиционными методами не картируется ни один разлом, землетрясения приурочены к линейным зонам. Установлено, что снимки ЕРТС-1 очень ценны для выявления разломов на этих площадях. Особенно хороший пример дает снимок ID E-1066-20444. Сейсмически активная ветвь разлома Денали легко прослеживается по крайней мере на 120 км (с координатами ее конечных точек: 62°26′ с. ш., 149°23′ з. д. и 63°14′ с. ш., 147°44′ з. д.). Разлом образует линейную депрессию, вдоль которой развиты водотоки и цепочки водоемов. Сейсмограммы, записанные до 1967 г., показывают, что землетрясения на этой площади имели тенденцию проявляться и группироваться вдоль разлома (особенно вблизи его крайних точек). В частности, район южного окончания разлома был местом землетрясения магнитудой 4,8, прошедшего 1 октября

1972 г. Это землетрясение ощущалось по всей долине реки Суситна. Положение плоскости разлома, установленное 1 октября 1972 г., показывает правостороннее смещение, на основании чего было сделано предположение о принадлежности этой структуры к разлому Денали, хотя на снимке видно, что река Суситна фиксирует левосторонний сдвиг. Латрам [3] по снимку спутника «Нимбус-IV» установил линейность форм рельефа примерно для той же площади, но на этом снимке сдвиги видны менее отчетливо по сравнению со снимками ЕРТС-1.

Севернее Аляскинского хребта в центральной части рассматриваемого района расположена широкая зона незначительной сейсмичности, которая простирается к северу вплоть до южной части хребта Брукса [2]. В этой местности с 1904 г. произошло восемь землетрясений магнитудой свыше 6 (до 7,8). Несмотря на то что в последние годы собраны важные сведения о сейсмичности этого района, геологическое и тектоническое картирование проведены здесь в минимальном объеме. В октябре 1968 г. в долине Минук-Крик северо-западнее Фэрбенкса произошло землетрясение магнитудой 6,5. На фиг. 1 представлен фотомонтаж, составленный из шести снимков спутника ЕРТС-1 (снимки ID E-1104-20554, E-1104-20560, E-1104-20563, E-1105-21012, E-1105-21015; E-1105-21021). Долина Минук-Крик расположена на снимке левее и выше центра, в координатах примерно 65,4° с. ш. и 150,1° з. д. До землетрясения 1968 г. эта особенность ее рельефа как разлом не картировалась. Позже изучение долины после толчков землетрясений, определение положения плоскостей разломов и площадное геологическое картирование показали, что они действительно являются левосторонними сдвигами. Если бы снимки со спутника ЕРТС-1 поступили к нам раньше, то это заключение, несомненно, было бы сделано уже давно. Исключительно интенсивный речной врез, текстурные и тональные различия, наблюдаемые в направлении, поперечном к простиранию долины, и серия параллельных разрывов в окружающих горах не оставляют даже малого сомнения в этом. Левосторонний характер самого разлома Минук-Крик не столь очевиден, но достаточно хорошо виден по смещению межгорных ложбин к северу и к югу от линии водораздела, по расположенному восточнее четвертому параллельному линеаменту.

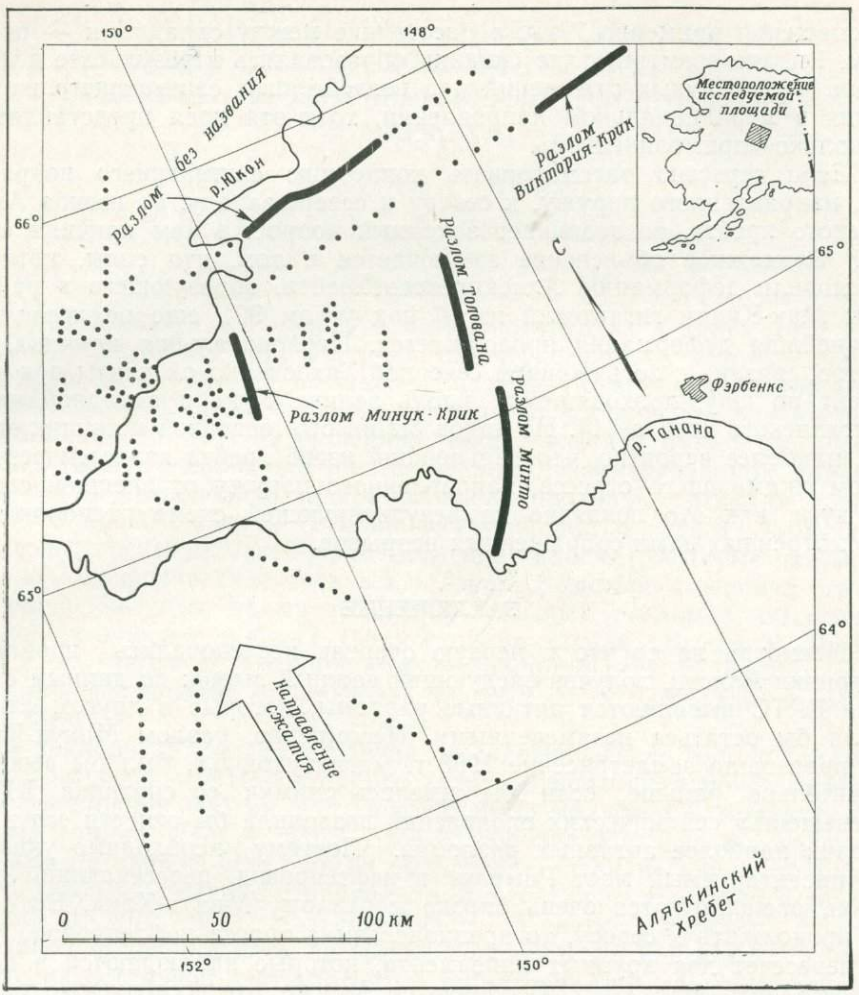
Более тщательное исследование показывает, что разлом Минук-Крик является только частью системы разломов большего масштаба, включающей много других линейных элементов. К северо-западу от разлома Минук-Крик в рельефе наблюдаются параллельные гряды, поперечные к простиранию долины реки Юкон, которые также прослеживаются на ее юго-восточном борту, где они предопределяют расположение притоков. Два протяженных линеамента выделяются также юго-западнее, в горах Кускоквим. В поперечном по отношению к ним направлении на снимке наблюдаются текстурные изменения. Северные окончания этих линеаментов теряются в аллювии реки Танана. Схема, представленная на фиг. 2, является ключом к фотомонтажу (фиг. 1) и отражает положение как упомянутых разломов, так и рассматриваемых ниже. Серия сопряженных разрывов, выраженных в рельефе почти таким же образом, пересекает систему разломов Минук-Крик под углом 55° и прослеживается на юго-восток до Аляскинского хребта. Системы разрывов образуют, по-видимому, тот двугранный угол, под которым должны разрушиться хрупкие материалы, если сжимающее боковое давление приложено по направлению, разделяющему пополам острый угол, образованный двумя сериями линеаментов. В данном случае таким направлением является азимут около 345°, грубо перпендикулярный простиранию Аляскинского хребта. Серии сопряженных линеаментов наиболее различимы в горах Рей. Они пересекают реку



Фиг. 1. Фотомонтаж по 6 снимкам ERTC-1 MCC внутренней части центральной Аляски.
Описание в тексте. Результат дешифрирования снимка показан на фиг. 2.

Юкон северо-западнее Минук-Крик, но также наблюдаются в горах вокруг Минук-Крик, южнее реки Танана, и на территории, соответствующей нижней части середины фиг. 1. Другой линеамент, по-видимому, пересекает невысокие горы вблизи центра фиг. 1.

Существуют веские основания предполагать, что землетрясения в этом районе являются результатом сжимающего напряжения, радиально направленного от изгиба Аляскинского хребта, и что это напряжение привело к образованию системы сопряженных сдвигов, вдоль которых и расположены эпицентры землетрясений. Механизм такого рода хорошо согласуется с положением плоскости разлома, определенной по землетрясению 1968 г. и землетрясению магнитудой 6, происшедшему в 1967 г. около Фэрбенкса. Для этого землетрясения были получены данные о субмеридиональном простирании сжимающего напряжения. В районе Фэрбенкса напряжение перпендикулярно простиранию Аляс-



Фиг. 2. Расшифровка фиг. 1.

Известные ранее разломы изображены жирной линией. Пунктирные линии показывают незакартированные ранее разломы и линеаменты, впервые выделенные по снимкам ЕРТС-1.

кинского хребта точно так же, как и при землетрясении Минук-Крик. Землетрясение 1967 г. произошло в зоне хорошо выраженного линеамента, протягивающегося от города Ненана, северо-восточнее Фэрбенкса, в верховья реки Чена. Эта линия в качестве предполагаемого разлома была исследована с помощью самолета НАСА (NP 3A) летом 1972 г. В то время как обычная и отраженная инфракрасная фотосъемка не дала убедительных доказательств существования разлома (так же как и радарная съемка бокового обзора), применение инфракрасного сканатора привело к некоторым необычным и неожиданным результатам. Непосредственно к югу от Фэрбенкса, на линеаменте Чена, в зоне следов землетрясения 1967 г. имеется, по-видимому, серия крутопогружающихся складок. Их вид фактически исключает вероятность того, что они являются древними речными меандрами. Складки располагаются на площади, перекрытой мощными аллювиальными отложениями. Это делает маловероятным предположение, что складки являются отражением структуры нижележащих коренных пород. Оси складок ориентированы в основном вдоль линеамента Чена. Амплиту-

да смещения примерно 7 км, а расстояние между складками — около 3 км. Вполне возможно, что складки образовались в результате деформации четвертичных отложений под воздействием сжимающего напряжения в меридиональном направлении, хотя эта идея представляется несколько «прямолинейной».

Если серьезно рассматривать концепцию сжимающего напряжения, направленного наружу, к северу и северо-западу, от изгиба Аляскинского хребта, то возникает законный вопрос: в чем причина сжатия? Возможное объяснение заключается в том, что силы, которые обусловили деформацию Аляскинского хребта, образующего в районе горы Мак-Кинли гигантский изгиб под углом 90°, еще не иссякли и дальнейшая деформация продолжается. Первоначальная причина, вероятно, связана с погружением северной Тихоокеанской плиты под континент по шву, проходящему вдоль залива Кука и западной части Аляскинского хребта [1]. Но каков бы ни был основной источник энергии, наиболее вероятно, что дальнейший изгиб хребта является результатом сжимающего стресса, направленного наружу от внешней стороны дуги, как это показано на результирующей схеме расположения рассмотренных нами сопряженных разрывов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что в первую очередь исследовались проблемы тектоники Аляски, получен следующий важный вывод: по данным спутника ЕРТС выявляются активные разломы, которые в другом случае могли бы остаться незамеченными. Несомненно, разлом Минук-Крик, где произошло землетрясение 1968 г. магнитудой 6,5, был бы выявлен значительно раньше, если бы имелись снимки со спутника ЕРТС, а «свежесть» сейсмических проявлений позволила бы отнести его к категории наиболее активных разломов. Поэтому необходимо указать, что проектируемый мост Рампарт и нефтепровод, пересекающий реку Юкон, располагаются очень близко к разлому Минук-Крик. Если же его продолжить к северу, то предполагаемая трасса нефтепровода также пересечет два крупных линеамента, которые наблюдаются в центральной части фиг. 1 и 2. Особенно на Аляске, где исследуемые территории отдалены и доступны лишь при больших затратах времени и средств, снимки со спутника ЕРТС являются многообещающим средством для планирования строительства, геологического районирования и оценки сейсмичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Davies J.*, Crustal morphology in central Alaska, Bull. Sebb Seism. Soc. Am., **63** (1), 1973.
2. *Gedney L., Shapiro L., VanWormer D., Weber F.*, Correlation of epicenters with mapped faults, east-central Alaska, 1968—1971, map with 8 pp., U.S.G.S. Open-file Report, 1972.
3. *Lathram E.*, Nimbus IV view of the major structural features of Alaska, Science, **175**, pp. 1423—1427, 1972.
4. *Richter D.*, Reconnaissance geologic map and section of the Nabesna B-4 quadrangle, Alaska, Miscellaneous Geologic Investigations, Map I-656, U. S. Geol. Survey, 1971.
5. *Richter D., Matson N. Jr.*, Quaternary faulting in the eastern Alaska Range, Geol. Soc. Am. Bull., **82**, pp. 1529—1540, 1971.
6. *St. Amand P.*, Geological and geophysical synthesis of the tectonics of portions of British Columbia, the Yukon Territory, and Alaska, Geol. Soc. Am. Bull., **68**, pp. 1343—1370, 1957.
7. *Tobin D., Sykes L.*, Seismicity of tectonics of the northeast Pacific Ocean, Journ. Geophys. Res., **73**, pp. 3821—3845, 1968.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНИМКОВ ЕРТС-1 ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ (НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1972 г. В МАНАГУА)

В. Картер, Г. Итон

(Геологическая служба США, Вашингтон)

ВВЕДЕНИЕ

Город Манагуа в Никарагуа был разрушен 23 декабря 1972 г. в результате серии из трех крупных землетрясений, из которых основное имело магнитуду 5,6 по шкале Рихтера. Во время землетрясений погибло свыше 11 тыс. человек, а потери от разрушения оценивались в 0,5 млрд. долл. [1]. Разрушения, такие же, как от землетрясений 1931 и 1968 гг., возникли в результате двух взаимосвязанных причин: 1) Манагуа расположен на слабоконсолидированных осадках вулканического происхождения (вулканические шлаки и пепел); 2) многие здания построены из материалов (каменная кладка), которые оказывают слабое сопротивление сильным толчкам. Заметное смещение структур, расположенных на продолжении активных разломов, объясняет сильное разрушение и более сейсмостойких зданий (*Brown R. D. Jr., Ward P. L., Plafker G.,* Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972, U. S. Geol, Survey, Prof. Paper 838).

24 декабря 1972 г. со спутника, предназначенного для выявления земных ресурсов (ЕРТС-1), орбита которого проходила приблизительно на расстоянии 900 км над Землей, было получено 2 мультиспектральных снимка (НАСА, ЕРТС-1154-15385) над Манагуа и соседними районами на западе. Эти снимки обработали затем в Центре космических полетов в Годдарде и направили для расшифровки ученым геологической службы США. Большая часть Манагуа на снимке скрыта рассеянной облачностью, и поэтому разрушения не поддаются оценке. Однако на остальной части заснятой территории, где облачный покров отсутствовал, хорошо картируется ряд геологических особенностей, которые в определенной степени отражают региональные условия землетрясения и дают возможность составить общее представление о районе.

Цель данного предварительного сообщения — оценка снимков ЕРТС-1 и результатов быстрой интерпретации полученных данных (приблизительно в течение 3 часов).

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Авторы не имели возможности посетить Никарагуа, и обработка результатов интерпретации проводилась в январе 1973 г. с использованием небольшого библиотечного материала. Прозрачные позитивы 22×22 см размещали на световом столе и, используя 8-кратное увеличение, получали прозрачные основы на миларе. Совмещенные оригиналы с искаженным цветом изготавливались на диазофольге с помощью обычного негатива Озалид.

Система для получения снимков ЕРТС-1 представляет собой мультиспектральное сканирующее устройство (МСС), в котором зеленая (0,4—0,5 мкм), красная (0,5—0,6 мкм) и две инфракрасные зоны (0,6—0,7 и 0,8—1,1 мкм) используются для выявления структур. В следующих разделах производится попытка вскрыть их недостатки и преимущества.



Фиг. 1. Перистый рисунок осадков в заливе Фонсека.
Снимок Никарагуа (зона 4).

Зеленая зона (MCC-4), несмотря на некоторое воздействие дымки, показывает распределение донных осадков, или особенности прибрежных водных масс, или и то, и другое (фиг. 1). Например, два хорошо различимых кратерных озера на полуострове Чилтеп, вдающемся в озеро Манагуа, имеют различный тон. Более светлый тон, очевидно, обусловлен дымкой. Заболоченные участки дают более светлые тона, чем вода, но они темнее, чем окружающие участки суши. Вулканический пепел и лавы, а также вулканические конусы и обломочный материал темнее, чем окружающие породы. Площади, покрытые растительностью, такие, как фермы и поля под посевными культурами, различаются с большим трудом.

Общий облик красной зоны спектра наиболее четкий; на ней меньше всего сказывается влияние дымки (фиг. 2). Поверхность суши имеет темно-серый тон, обусловленный наличием растительности. Четко видны постройки, искусственные насаждения; выделяются структуры почв. Прозрачность воды минимальная, но в эстуариях отчетливо различается перистый рисунок осадков, выстилающих дно. Снимки двух инфракрасных зон очень сходны по отражению водных бассейнов, которые



Фиг. 2. Постройки и искусственные насаждения на территории Никарагуа. Снимок сделан со спутника ЕРТС-1 (зона 5).

выделяются на них резким черным тоном (фиг. 3). На снимках в инфракрасных зонах с большой точностью оконтуриваются болотистые участки и площади развития наносов; хорошо также определяется наличие воды в небольших реках, ручьях и руслах сезонных потоков.

Тональность участков поверхности суши на инфракрасных зонах ярче, чем на зеленой и красной за счет более высокой отражательной способности растительного покрова, имеющего белый и светло-серый оттенки (фиг. 3 и 4). Обработанные посевные площади выглядят наиболее яркими (за исключением облаков и снега) и выделяются легко. Естественная растительность имеет светло-серый тон. Инфракрасные зоны пригодны для выявления тектонических структур, таких, как линеаменты и вулканы. Следы жизни человека, например небольшие населенные пункты и города, выделяются в виде темных пятен, сходных по тону с вулканическими пепловыми конусами, но прямоугольной формы и разделенных сетью дорог на участки неправильной формы (как будто составлены из отдельных коробочек). На них отсутствует радиальный рисунок гидросети, присущий вулканическим конусам. Все это способствует их безошибочному выявлению.

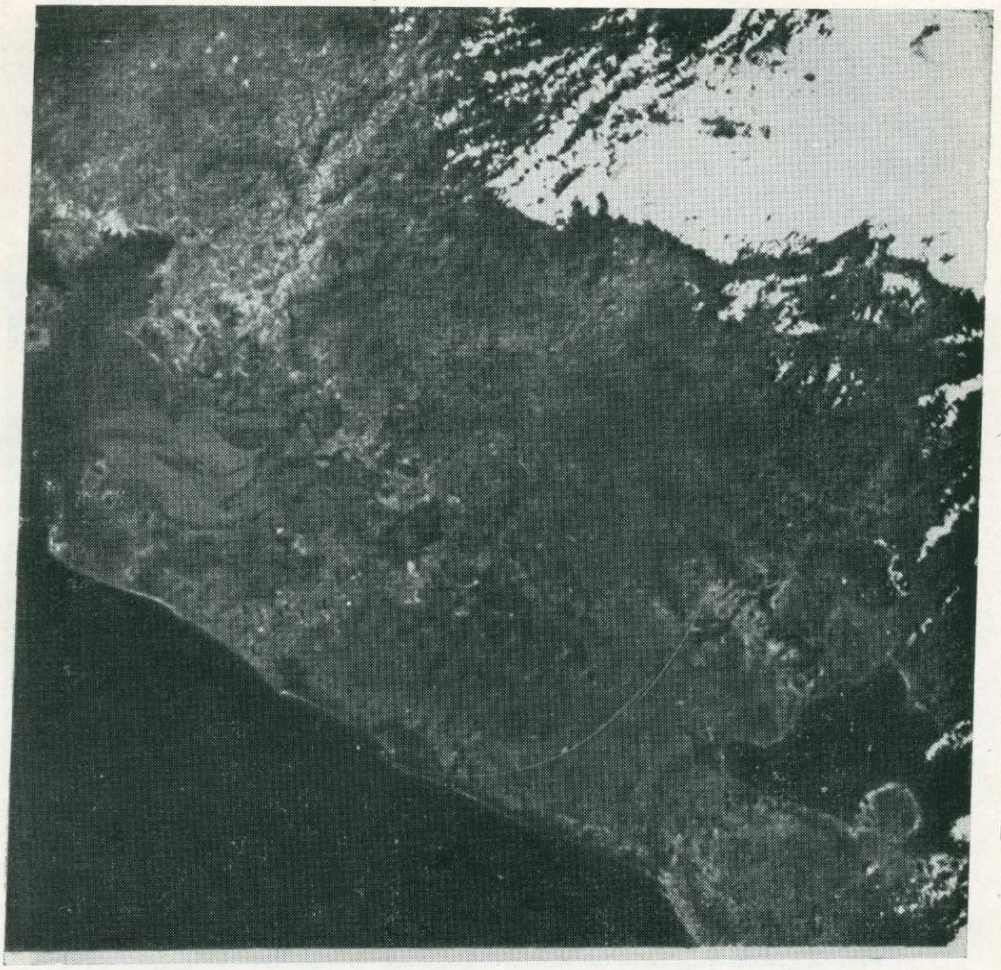


Фиг. 3. Распределение центров вулканической активности в Никарагуа. Снимок сделан со спутника ERTC-1 (зона 6).

Почва на снимках имеет слабый серый тон, трудно отличимый на черно-белых снимках от тона естественной растительности. Однако на цветных совмещенных изображениях почвы выделяются легко (фиг. 5). Большое преимущество инфракрасных зон заключается в возможности отличать естественный растительный покров от затенений, обусловленных низким углом солнечного освещения, тогда как в зеленой и красной зонах сделать это значительно трудней.

Разрушения, вызванные землетрясением в Манагуа, послужили поводом для составления предварительной карты геологических структур с целью выяснить возможность использования такой информации при изучении последствий землетрясений. На карте (фиг. 6) показаны результаты приблизительно трехчасовой интерпретации. Исследования снимков продолжаются и, очевидно, дадут новую, дополнительную информацию. Фиг. 7 подготовлена доктором Д. Н. Ринкером примерно за 10 часов.

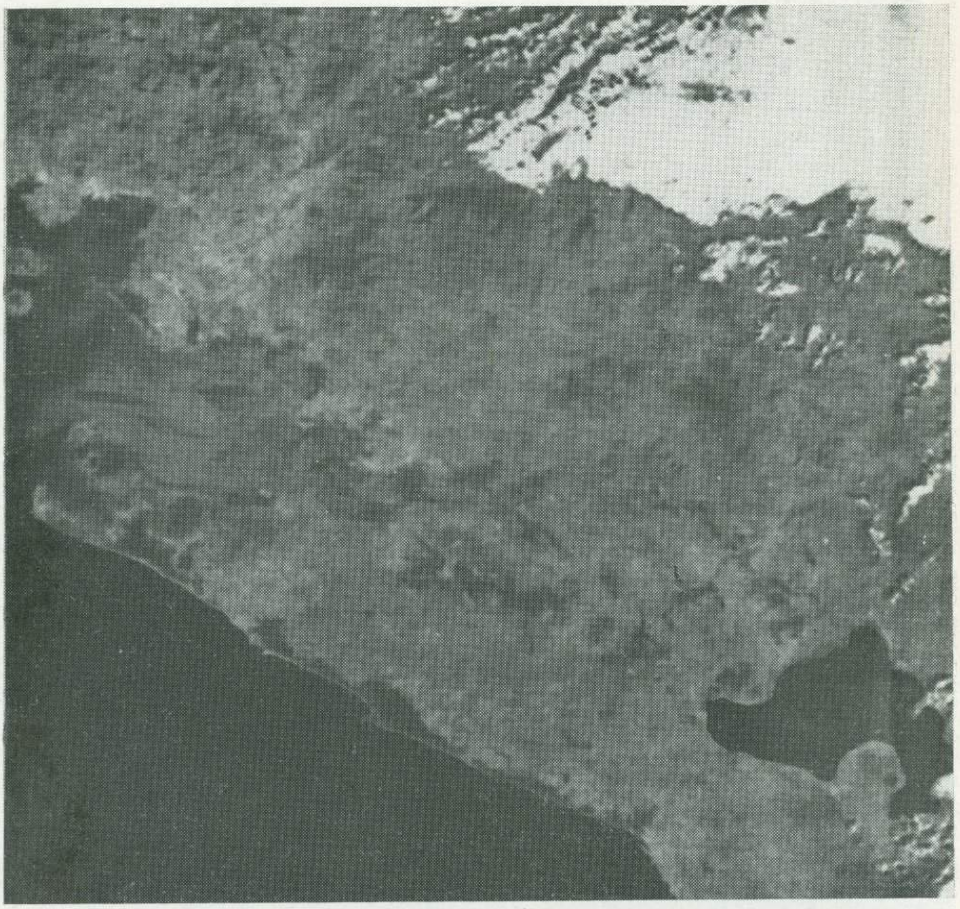
Голоценовые вулканы, протягивающиеся параллельно берегу, — наиболее четко различимые на снимке тектонические структуры



Фиг. 4. Снимок Никарагуа, сделанный со спутника ЕРТС-1 (зона 7) и использованный для интерпретации структур, которые видны на фиг. 3.

(фиг. 7). Образуемые ими линейные элементы ориентированы в направлении Манагуа (ЮВ 130°). Большинство вулканов различается по темному тону и круглым очертаниям. На многих вулканах видны эрозионные «шрамы», радиально расходящиеся от центрального конуса, и языки или изрезанные края потоков в нижней части вулканической осыпи. Иногда в зонах, близких к инфракрасным, различаются черные пятна кратерных озер. Особенно отчетливо видны два кратерных озера: Лагуна-де-Апоек и Лагуна-де-Хилоя на Пунта-Чилтеп (полуостров на юго-западном берегу озера Манагуа, в 10 км от города). Еще два кратерных озера, скрытые на снимке облачностью, лежат к югу от города. Одна из них — Лагуна-де-Тискапа — находится на окраине города, в районе президентского дворца и здания посольства США, где разрушения были особенно сильными.

Представляет интерес также узкий пояс линейных структур северо-северо-западного простирания (335°) на северном берегу озера Манагуа. Продолжение этих линейных структур на юг через озеро пересекает линию вулканов в направлении на северо-запад от города Манагуа. Этот вулканический пояс представляет собой ответвление длиной

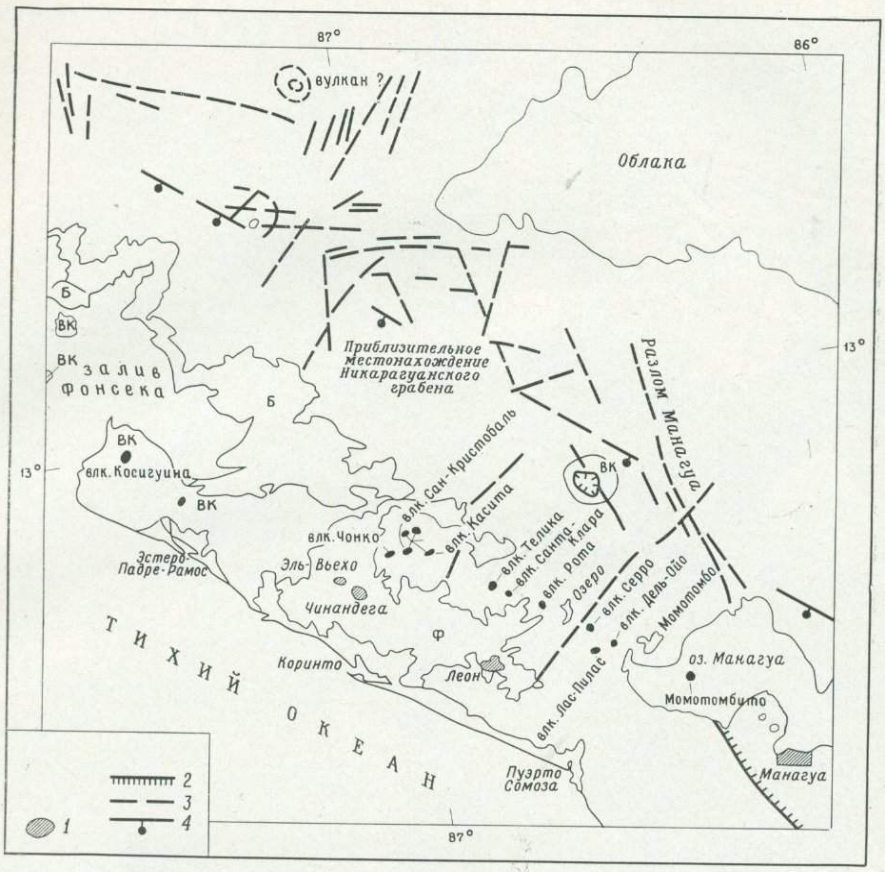


Фиг. 5. Совмещенные снимки с искаженным цветом (зоны 4, 5 и 7).

около 10 км, по отношению к которому восточный блок смещен на юг. Смещение невозможно различить на снимке, но оно показано на региональной геологической карте (фиг. 8).

Третья и четвертая группа четких линейных элементов имеет северо-северо-восточное (25—45°) и северо-восточное (50—60°) простирание и пересекает одновременно вулканические структуры и Никарагуанскую депрессию. Из-за облачности они плохо различимы на снимках ЕРТС-1, но, по сообщению Л. Анстеда, работавшего в Манагуа во время землетрясения, на территории города наблюдалось образование трещин северо-северо-восточной ориентировки. Трещины были видны на земле и различались на крупномасштабных (1 : 5000) аэрофотоснимках. Указанная серия структур детально закартирована; структуры протягиваются параллельно узкой полосе трещин, возникших после землетрясения.

На стенах зданий, бордюрном камне тротуаров и на дорогах, разбитых разрывными нарушениями, замерена величина сдвига от долей сантиметра до нескольких десятков сантиметров. Подобные сдвиги картировались и ранее Хуаном Куаном С. и Карлосом Валле Г. (недостоверное письменное сообщение); сдвиги видны также на радарном монтаже этого района, сделанном Анстедом (устное сообщение,

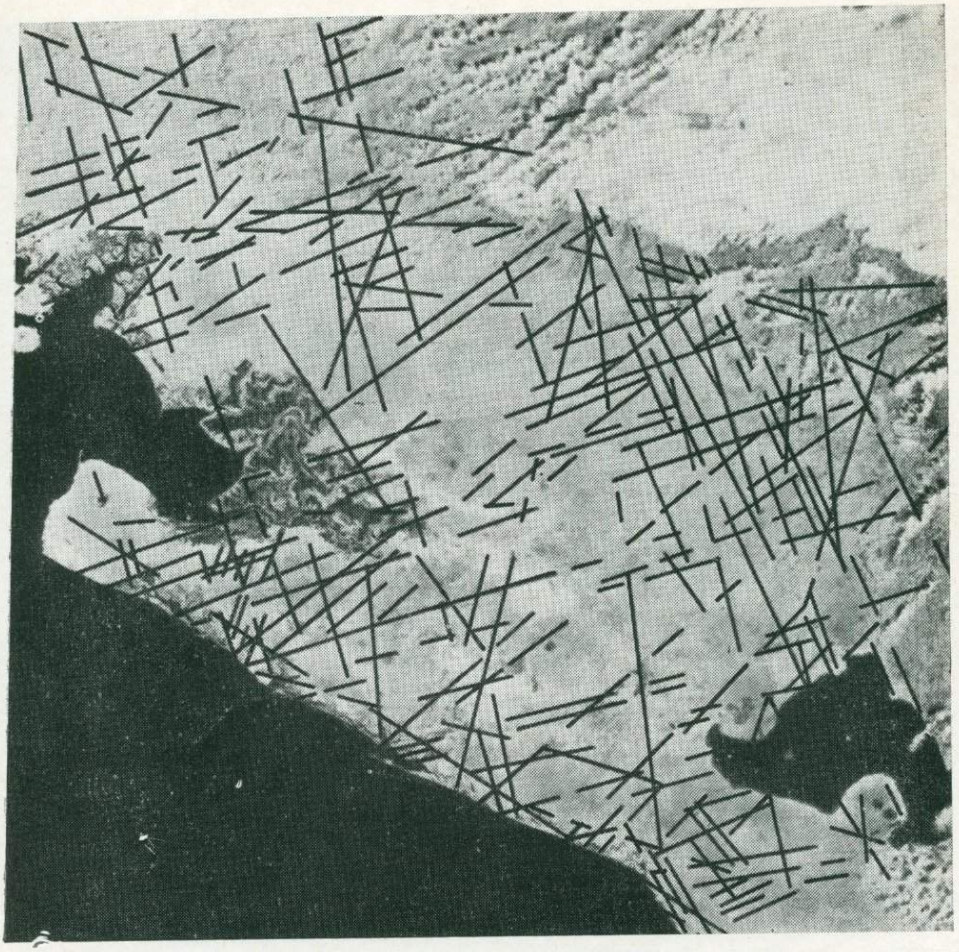


Фиг. 6. Предварительная контурная карта линейных элементов и вулканических структур, выявленных по снимкам ЕРТС-1 на территории Никарагуа.

Б — болота; *Ф* — фермы; *ВК* — кратер вулкана или кратерное озеро; *1* — город или деревня; *2* — край кальдеры; *3* — линеаменты (возможные разрывные нарушения или разломы); *4* — примерное положение края грабена озера Никарагуа; кружок указывает опущенный блок. Снимок сделан 24 декабря 1972 г. Составитель У. Картер, Геологическая служба США.

1973 г.); сдвиг прослеживается на расстояние более 100 км. Учитывая, что этот ряд структур проходит параллельно трем другим линеаментам, расположенным северо-западнее и хорошо различимым на снимке ЕРТС, было бы целесообразно провести региональные полевые исследования для оценки возможности возникновения региональных землетрясений.

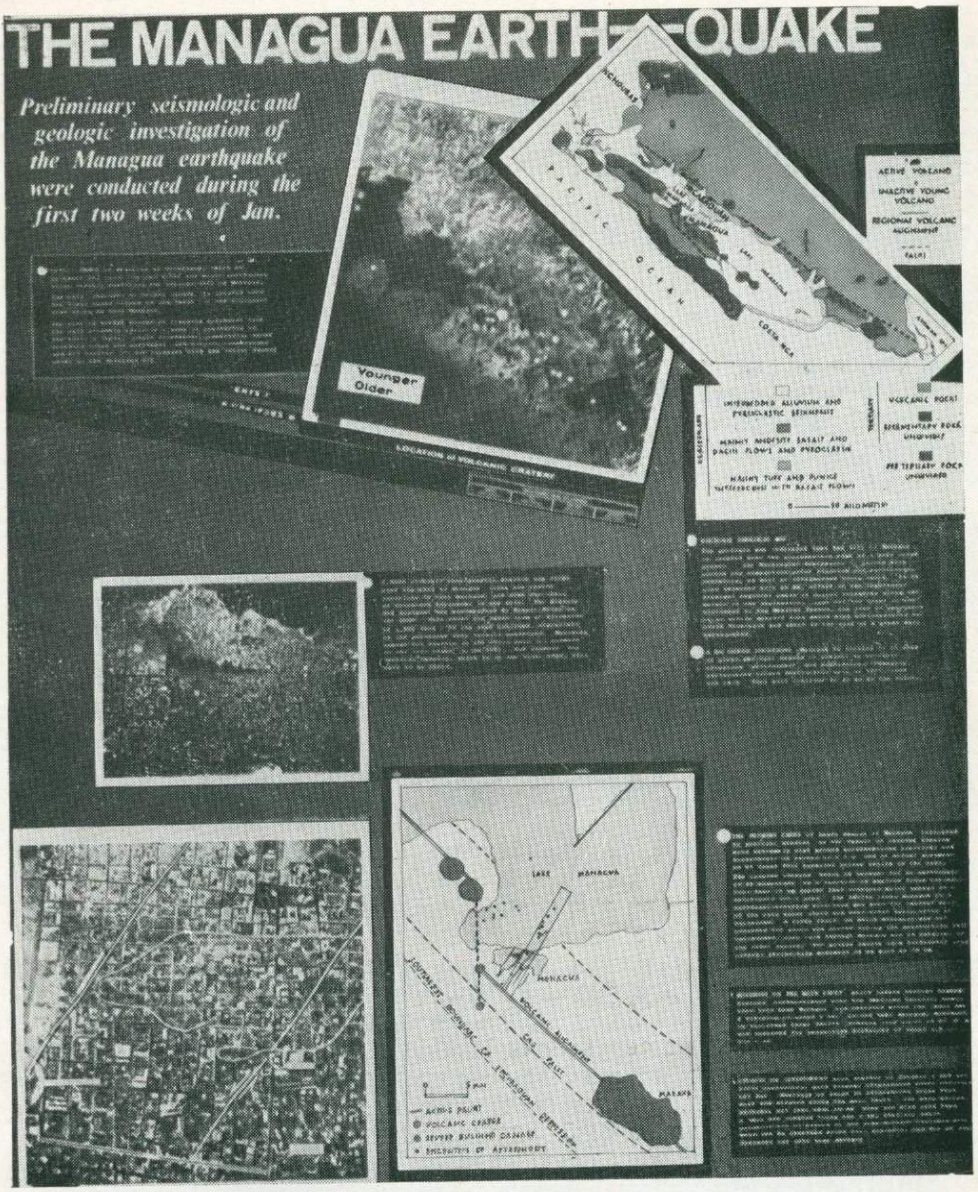
Авторы смогли лишь бегло просмотреть цветные инфракрасные аэрофотоснимки, сделанные по программе НАСА С-130 28 декабря 1972 г. или примерно в это время. Кадр, в который попадает центр города, соответствует участку самых сильных разрушений; тон участка — от белого до светло-серого, форма — эллиптическая, охват — примерно 70 дорожных кварталов. Зона разрушения имеет широтное простирание и фиксируется по разрушенным крышам, стенам и большим скоплениям камня на улицах. Разрушения видны также на небольших участках в направлении на северо-северо-запад. Значительные разрушения наблюдаются по этой же линии на юг от предполагаемого эпицентра главного толчка до небольшого кратерного озера Лагуна-де-Тискапа.



Фиг. 7. Более детальный рисунок разрывной сети, выявленный Дж. Ринкером.

ВЫВОДЫ

Землетрясение в Манагуа произошло в декабре 1972 г., когда изучение возможности использования системы ЕРТС-1 для оценки стихийных бедствий находилось на ранней стадии. Благодаря оперативности персонала НАСА, обслуживающего спутник, удалось собрать данные на следующий же день после землетрясения. Снимки в течение 5 дней обрабатывались сотрудниками в Годдарде, после чего были переданы геологам; еще через две недели посольство в Никарагуа получило предварительную расшифровку этих данных. Полученная информация дает хорошее представление о геологическом строении региона. Облачность и дым мешали детальному изучению разрушений города Манагуа по снимкам ЕРТС-1, однако площадь разрушений была достаточно большой для анализа по снимкам, увеличенным до масштаба 1 : 250 000 или 1 : 100 000, и для обработки с помощью компьютера. Целесообразно провести сравнение результатов первого анализа со снимками, сделанными через 18 дней после землетрясения. Снимки Манагуа, сделанные со спутника ЕРТС-1 до землетрясения, также были бы очень полезны для оценки изменений, вызванных землетрясением.



Фиг. 8. Иллюстрация источников сейсмологической и геологической информации, по которым производилось предварительное изучение землетрясения в Манагуа.

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ, ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ МОРЕЙ В ПУСТЫНЯХ АФРИКИ, АЗИИ И АВСТРАЛИИ

Э. Мак-Ки, К. Брид, Л. Гаррис

(Геологическая служба США, Денвер, Колорадо;
Музей северной Аризоны, Флагстафф, Аризона)

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача исследования — сравнение крупных песчаных морей земного шара. Для этого сравниваются типы и формы песчаного рельефа, их ориентировка и связь последней с ветровыми или другими метеорологическими факторами, влияние поверхностных вод, высоты рельефа и растительности, выявляется геологическое строение каждого геоморфологического объекта. Данные о внутренней структуре песчаных тел могут быть использованы для определения генезиса и контуров распространения древних эоловых песчаников.

Начальная ступень исследования — разработка классификации отложений крупных песчаных пустынь земного шара. Снимки ЕРТС уникальны для этой цели, так как вскрывают структуры форм рельефа в масштабе, ранее недоступном. Изучались снимки, полученные в результате прохождения спутника над 16 выбранными эталонными участками, из которых 11 крупных находятся в разных странах и 5 небольших — в США. Были изучены следующие районы:

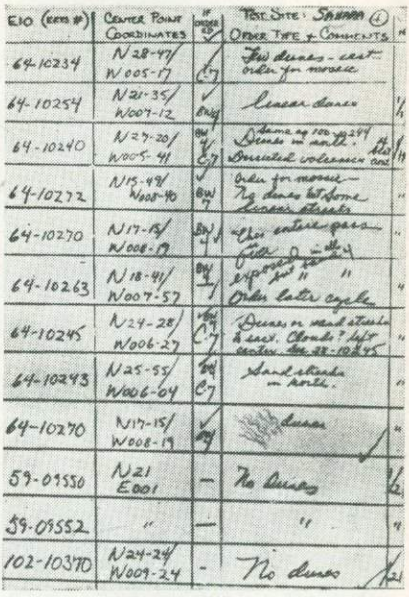
1. Западная часть Северной Африки, включая Алжир, Испанскую Сахару и Мавританию.
2. Пустыня Сахара на территории Ливии, Нигера и Республики Чад.
3. Пустыни Калахари и Намиб на территориях Южно-Африканской республики, Ботсваны и Намибии.
4. Пустыня Такла-Макан на территории Синьцзян в Китае.
5. Западная часть внутренней пустыни Гоби на территории Китая и Монголии.
6. Пустыня Тар на территории Индии и Пакистана.
7. Пустыни Кызылкум и Каракум на территории СССР.
8. Большая песчаная пустыня Австралии.
9. Пустыни Большая Виктория и Симпсон на территории Австралии.
10. Пустыня Ан-Нафуд в северной части Саудовской Аравии.
11. Пустыня в южной части Саудовской Аравии.
12. Уайт-Сандс, штат Нью-Мексико.
13. Большие песчаные дюны на территории штата Колорадо.
14. Малая долина Колорадо, штат Аризона.
15. Пустыня Юма на территории штата Калифорния и в Мексике.
16. Район Генри-Маунтинс, штат Юта.

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП

После получения снимков ЕРТС данные для каждого снимка регистрировались на рабочем листе (фиг. 1), составленном Бридом для каталогизирования первичной информации по исследуемому участку. В таблицу заносятся: номер снимка, координаты центральной точки

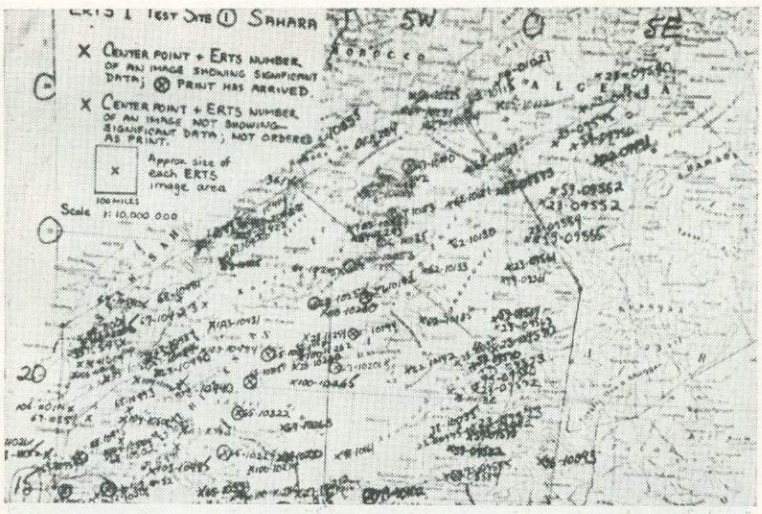
снимка, указанные, по каким из имеющихся данных следует делать запросы, некоторые исходные сведения о качестве снимка и важности наблюдаемых форм рельефа, дата поступления снимка.

После указанных операций центральную точку каждого снимка наносят на карту изученности или сводную карту изученного участка (фиг. 2). Эти небольшие сводные карты обеспечивают быструю информацию о степени охвата территории снимками. На картах изученности все снимки ЕРТС, содержащие материал, отвечающий цели данного исследования, и имеющие соответствующую разрешающую характеристику, помечаются красным, а снимки, менее важные для данного исследования или худшего качества, отмечаются синим и нередко исключаются из дальнейшего рассмотрения.



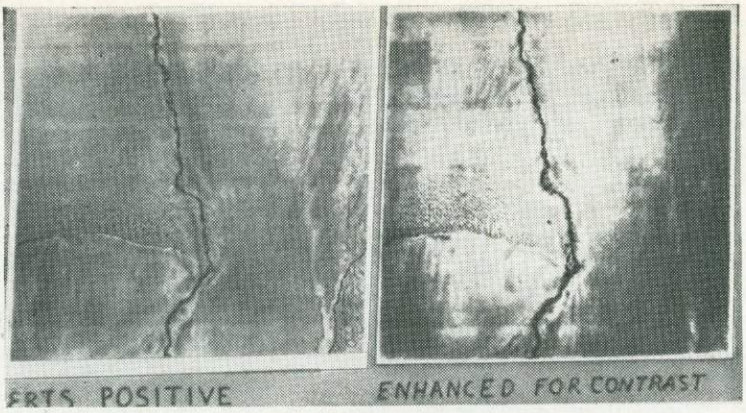
Фиг. 1. Образец копии рабочего листа.

При подготовке некоторых снимков ЕРТС для изучения предусматривается также дополнительный этап. Он заключается в усилении изображений, на которых имеются структуры, рассматривающиеся как ключевые для данного исследования (фиг. 3, 4, 5). Усиление прозрачных 70-мм снимков ЕРТС предусматривает операции с помощью различных видов негативной пленки (1), перепроявления пленок в проявителях с высоким восстановительным потенциалом (2), печати на высококонтрастной бумаге (3). Детальное описание этих операций дано в статье Гарриса [2].

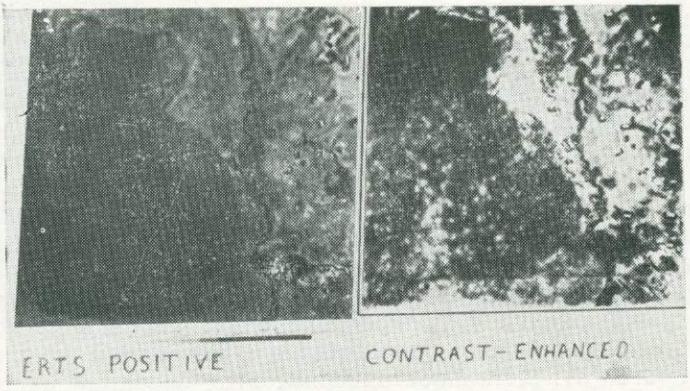


Фиг. 2. Пример регистрации данных в пределах исследуемого участка на основе навигационной карты ВВС.

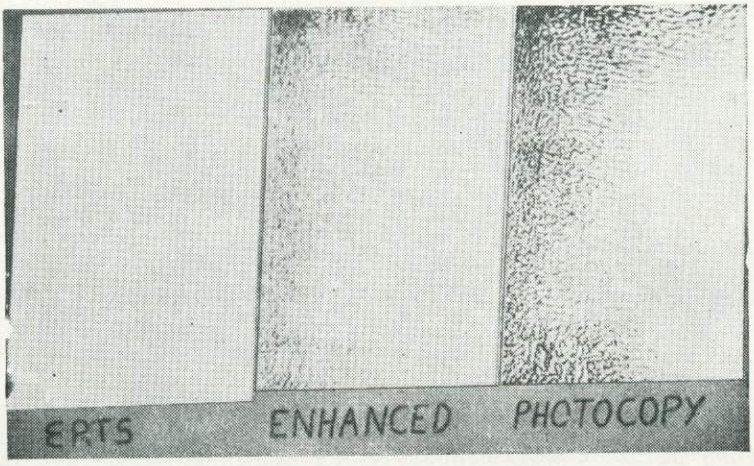
Участки, подлежащие дальнейшему изучению, обозначаются красным; участки, которые следует исключить из рассмотрения, — синим.



Фиг. 3. Эталонный участок в пустыне Такла-Макан, Китай.
Иллюстрация результатов контрастного усиления позитивного отпечатка снимка ЕРТС (1078-04481).

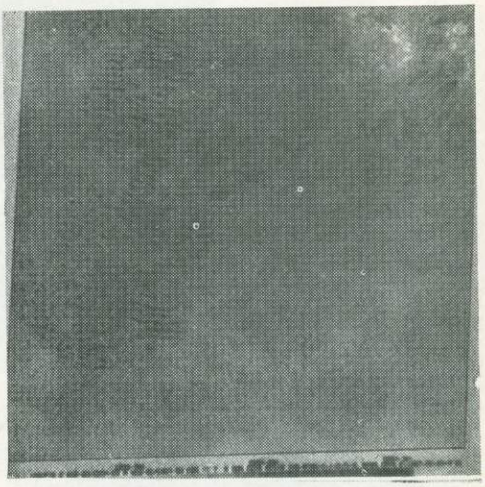


Фиг. 4. Эталонный участок в районе Ташкента, Узбекистан, СССР.
Иллюстрация результатов контрастного усиления позитивного отпечатка снимка ЕРТС (1070-05443).



Фиг. 5. Эталонный участок в пустыне южной части Саудовской Аравии.
Сравнение позитивного снимка ЕРТС, контрастного усиленного отпечатка и фотокопии усиленного отпечатка. Снимок ЕРТС 1057-06193.

По мере того как продолжается сканирование прозрачной пленки, в центр космических полетов в Годдарде посылаются запросы на ретроспективные данные для получения черно-белых и цветных отпечатков (фиг. 6) со снимком ключевых районов, намеченных для дальнейшего изучения. Из полного комплекта отпечатков на каждый опытный участок изготавливают фотомонтаж, используя топоосновy, составленную Береговой геодезической службой США, и навигационную карту ВВС США, опубликованные в том же масштабе (1 : 1 000 000), что и снимки ЕРТС. При таком масштабе, как указывал Колвокоресс [1], снимки ЕРТС МСС находятся в хорошем соответствии с реальными объектами на земной поверхности. Фотомонтажи служат основой для построения тематических карт, отражающих геоморфологические структуры пустынь. Предполагается, что эти карты позволят разработать и проиллюстрировать классификацию типов дюн песчаных морей земного шара.

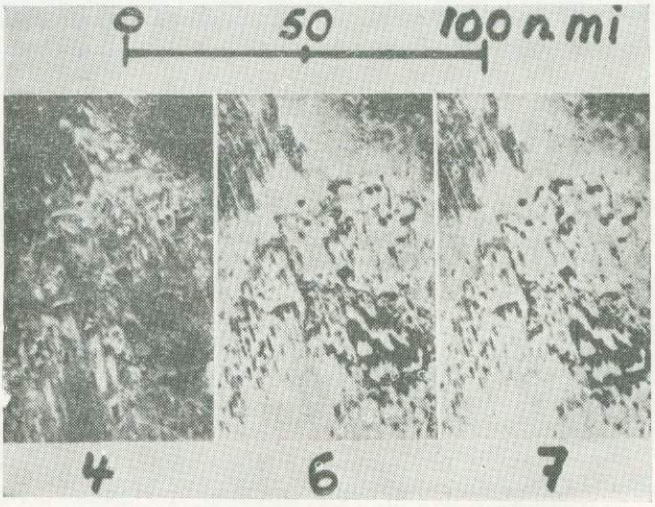


Фиг. 6. Эталонный участок в пустыне южной части Саудовской Аравии.

Черно-белая копия цветного совмещенного отпечатка, полученного из Центра космических полетов в Годдарде, на котором песок выглядит желтым, а междюнные пространства — голубовато-зелеными. Снимок ЕРТС 1057-06193.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАЗЛИЧИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗОН НА ЧЕРНО-БЕЛЫХ СНИМКАХ ЕРТС

Обычно существенные различия в облике рельефа пустынь или водоемов наблюдаются при переходе от данной полосы спектра к другой на одном и том же снимке. Например, на фиг. 7 видно четкое различие в облике нескольких озер пустыни Симпсон в Австралии, которое

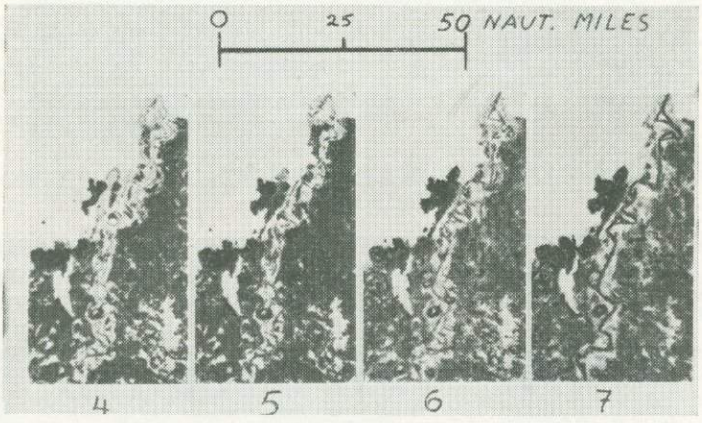


Фиг. 7. Эталонный участок в пустыне Симпсон, Австралия.

Сравнение зон 4, 5 и 6. Снимок ЕРТС 1097-00034.



Фиг. 8. Эталонный участок в районе Ранн-оф-Катч, Пакистан и Индия.
Река Инд (R); озеро (L); дюны (D) и территория Ранн (нижняя треть снимка). Снимок ERTC 1066-05263.



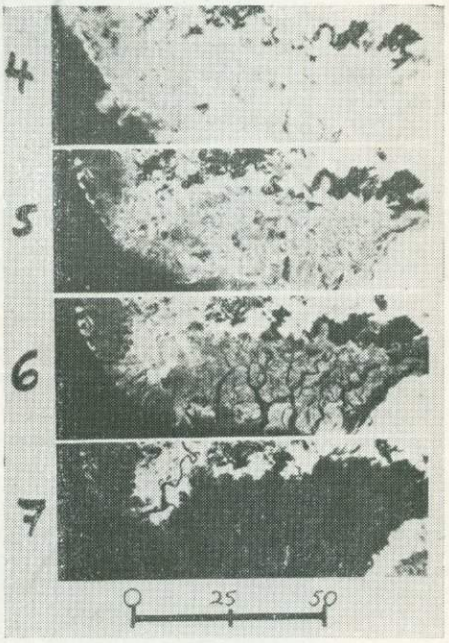
Фиг. 9. Район Ранн-оф-Катч, Пакистан и Индия.
Сравнение спектральных зон 4, 5, 6 и 7 в окрестностях реки Инд. Снимок ERTC 1066-05263, северо-западная часть.

может существенно сказаться на интерпретации. Зона 7, близкая к инфракрасной, на которой вода выглядит черной, показывает, что исследуемые озера не сухие, а наполнены водой, тогда как наблюдение тех же объектов в зоне 4 (зеленая) допускает обратное предположение. Поэтому светлый тон озер в зоне 4 указывает на наличие осадков в воде, а не на солевой пласт или какой-либо другой отражающий сухой материал. В зоне 4 виден растительный покров. Зона 6, близкая к инфракрасной (фигура в центре), дает, вероятно, наиболее достоверную картину этого района.

Район Ранн-оф-Катч в Пакистане (фиг. 8) — еще один пример, показывающий важность сравнения снимков по всем зонам спектра. На фиг. 8 река Инд расположена в западной части снимка, большой участок дюн — на востоке центральной части, а частично покрытая во-

дой территория Ранн — на юго-востоке. Озеро на снимке, которое видно также на фиг. 9, наиболее отчетливо проявляется в зоне 7; в других зонах осадки в воде озера придают ему более светлый тон. В зоне 4 (фиг. 9) хорошо различается растительность, в то время как русло реки лучше фиксируется в зоне. 7. Русла водотоков, прорезающих Ранн (фиг. 10), четко видны в зоне 6, но (вероятно, из-за наличия осадков в воде) слабо различимы в зонах 4 и 5. Во всех зонах равномерно представлены области распространения песчаных дюн, имеющих одинаково яркий тон.

Пустыня в южной части Саудовской Аравии (фиг. 11) — редкий пример несходства характеристик объектов песчаных пустынь в разных зонах. В зоне 4 междюнные участки выглядят темными, а сами дюны светлыми, тогда как в зоне 7 сами дюны темные, а междюнные участки светлые. Причины таких различий не совсем ясны, но, вероятно, их удастся выявить по фотоснимкам, сделанным с небольшой высоты, или по данным наземных наблюдений.



Фиг. 10. Район Ранн-оф-Катч. Пакистан и Индия.

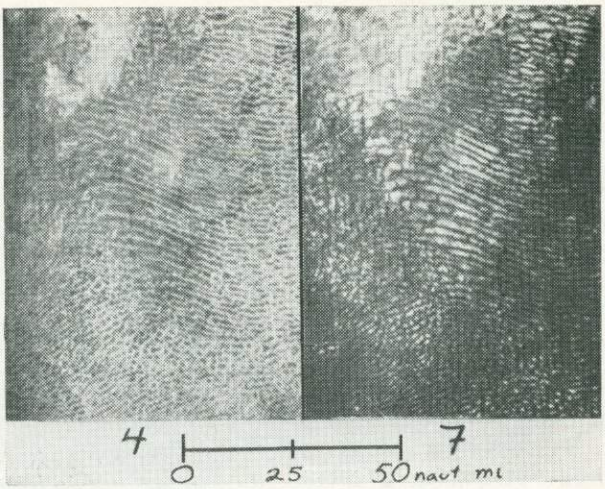
Сравнение спектральных зон 4, 5, 6 и 7 в окрестностях пустыни Рани. Снимок ЕРТС 1066-05263, южная часть.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОДНЫХ ЦВЕТНЫХ СОВМЕЩЕННЫХ ОТПЕЧАТКОВ

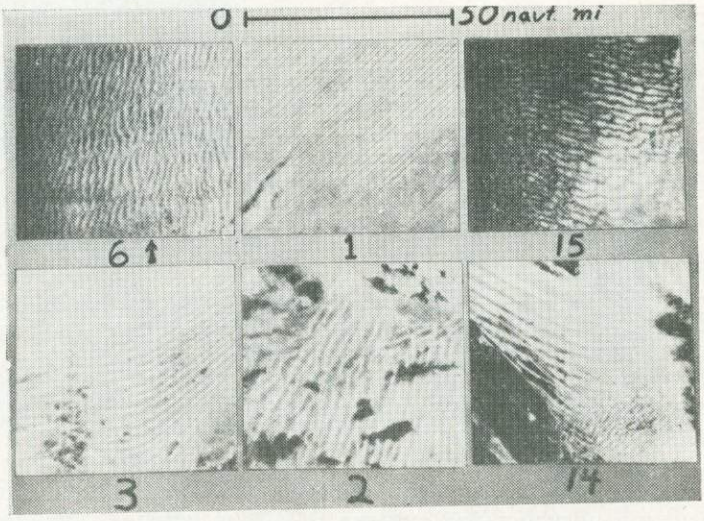
Ценность сводных цветных совмещенных отпечатков, изготовленных в Центре космических полетов в Годдарде, вполне очевидна. На фиг. 6 (снимок ЕРТС 1057-06193) показан сводный цветной совмещенный отпечаток, на котором изображен участок пустыни в южной части Саудовской Аравии. Песчаные дюны на отпечатке выглядят ярко-желтыми, а междюнные участки — голубовато-зелеными. Тот же район пустыни представлен на каждом из трех изображений фиг. 5; слева показан позитивный отпечаток снимка ЕРТС, в центре — усиленная фотография этого же снимка и справа — фотокопия (ксерокс) усиленной фотографии. Цель такого усиления состоит в том, чтобы получить более четкий рисунок, позволяющий вскрыть геоморфологические особенности различных песчаных тел и облегчить измерение их параметров. Цветной совмещенный отпечаток снимка рассматриваемого района свидетельствует, что структуры песчаных тел образовались в результате движения песка.

Желтый цвет песчаных тел в целом характерен, вероятно, для всех пустынь, которые к настоящему времени охвачены цветной съемкой; к их числу относятся пустыни в западной части Северной Африки, в Саудовской Аравии и Австралии. Такое постоянство означает, что цветные отпечатки опорных районов могут помочь при решении некоторых проблем интерпретации, когда черно-белые снимки не воспринимаются однозначно. Заслуживают внимания два примера:

1) Когда природа некоторых линейных структур на черно-белых отпечатках не ясна, цветные отпечатки тех же изображений часто по-



Фиг. 11. Эталонный участок в пустыне Эмпти-Квортер на территории Саудовской Аравии.
Сравнение зон 4 и 7. Снимок ERTS 1057-06190.



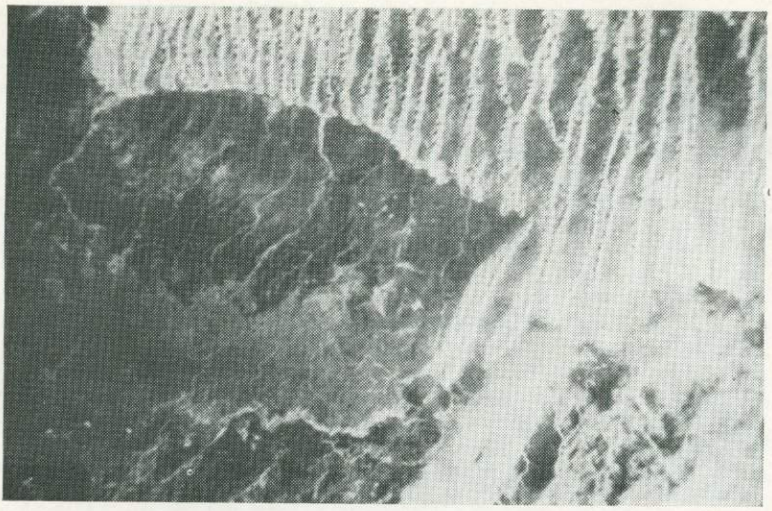
Фиг. 12. Различные структуры песчаных морей.
Такла-Макан, Китай (6), Мавритания (1), Саудовская Аравия (15), Ливия (3), Алжир (2), Ан-Нафуд, Саудовская Аравия (14).

зволяют по характерному желтому цвету определить принадлежность линейных структур к песчаным телам.

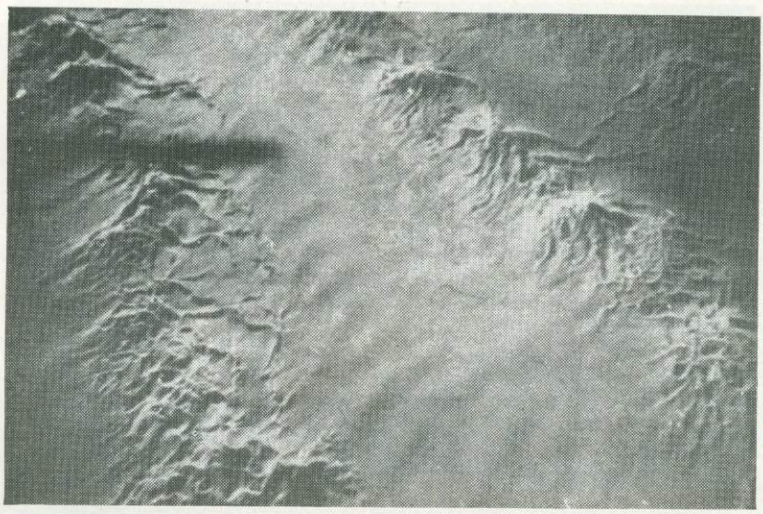
2) Песчаные тела иногда ошибочно принимают за изображение облаков, выпавший снег или соленосные отложения, которые выглядят достаточно яркими на черно-белых снимках. На цветных совмещенных отпечатках песок получается желтым, а все другие светлые объекты — отчетливо белыми.

КЛАССИФИКАЦИЯ

После того как для каждого исследуемого района установлены основные области распространения песка и усовершенствованы методы, помогающие различать современные активные дюны, с одной стороны,



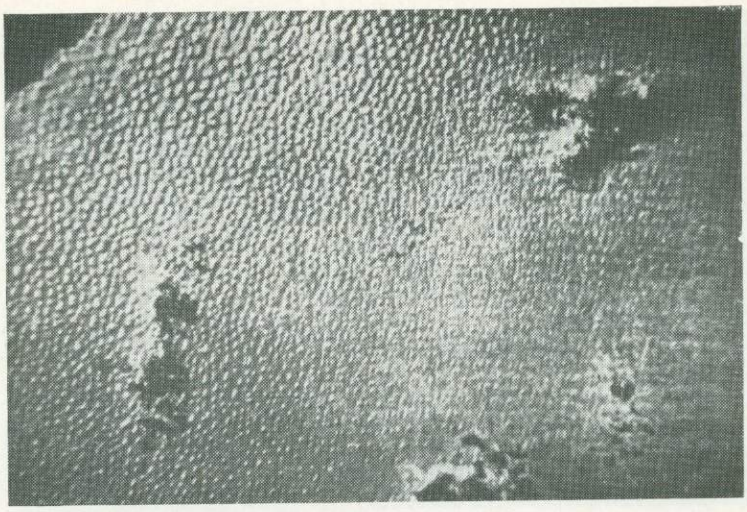
Фиг. 13. Линейная структура песков Алжирской пустыни, образованная рядами звездчатых дюн.
Снимок ERTS 1111-09442.



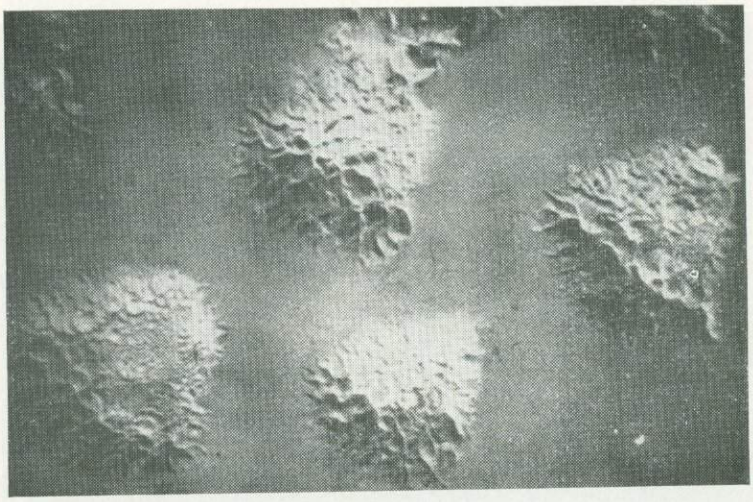
Фиг. 14. Ряды звездчатых дюн в Алжирской пустыне (аэрофотоснимок).

и стабилизовавшиеся древние дюны или песчаные тела эрозионного происхождения, с другой, исследования сосредоточивают на составлении таблиц и анализе основных структур, встречающихся в разных районах. Шесть форм дюн (фиг. 12) из шести районов (районы отмечены цифрой внизу), приведенных в одном масштабе, обнаруживают значительные морфологические различия. Рассматриваются следующие районы: (6) Такла-Макан, Китай, (1) Мавритания, (15) Южная часть Саудовской Аравии, (3) Ливия, (2) Алжир и (14) Ан-Нафуд, Саудовская Аравия.

Типичные примеры песчаных пустынь описываются и изображаются графически; этот материал служит основой для создания классификаций, необходимых при составлении специальных тематических карт



Фиг. 15. Сетчатая структура песков Алжирской пустыни, образованная скоплениями звездчатых дюн.
Снимок ЕРТС 1109-09322.



Фиг. 16. Скопления звездчатых дюн в Алжирской пустыне (аэрофотоснимок).

сравниваемых районов. Такие карты постоянно пополняются различными данными библиографического характера, которые наносятся условными знаками и необходимы в процессе работы для ссылок. Расшифровка многих структур может производиться с помощью аэрофотоснимков, которые сняты с небольшой высоты; на них формы отдельных дюн распознаются намного лучше, чем на мелкомасштабных снимках ЕРТС для тех же районов, позволяющих различать лишь песчаные комплексы. На снимках территории Алжирской пустыни, полученных со спутника ЕРТС (фиг. 13), различаются линейные структуры, в то время как на аэрофотоснимке (фиг. 14) видно, что это ряды звездчатых дюн; точно так же сетчатая структура на снимке ЕРТС (фиг. 15) оказывается скоплением звездчатых дюн на другом аэрофотоснимке (фиг. 16).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Дальнейшими работами предусматривается выяснение возможного генезиса структур дюнных комплексов и линейных элементов пустынь. В настоящее время собираются метеорологические данные для установления зависимости формы и ориентировки дюн от направления и скорости ветра. Кроме того, предполагается собрать фактический материал о внутреннем строении песчаных тел в зависимости от их формы и планового рисунка для определения генизиса и выявления их аналогов в геологических описаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Colvocoresses A. P.*, Overall evaluation of ERTS imagery for cartographic application (abs.), in: NASA Earth Resources Survey Program weekly abstracts, U. S. Dept. Commerce Natl. Tech. Inf. Service, pp. 7—8 (Jan. 22, 1973), 1973.
2. *Harris L. F.*, The use of photographic methods in contrast enhancement of ERTS images, ERTS-1 Symposium Proc., 1973.

КАРТИРОВАНИЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ФОРМ РЕЛЬЕФА НА ТЕРРИТОРИИ СРЕДНЕГО ЗАПАДА И ВЕЛИКИХ РАВНИН С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ, СДЕЛАННЫХ СО СПУТНИКА ЕРТС-1

Р. Моррисон

(Геологическая служба США, Денвер, Колорадо)

Дж. Халберг

(Геологическая служба штата Айова, Айова-Сити)

Цель данной работы — проверить пригодность снимков, сделанных со спутника ЕРТС-1, для картирования четвертичных отложений и форм рельефа в шести штатах Великих равнин и Среднего Запада: Иллинойсе, Айове, Миссури, Канзасе, Небраске и Южной Дакоте. Среди исследуемых форм рельефа наблюдаются конечные морены последнего оледенения, серии террас вдоль главных рек, морены среднего или раннего плейстоцена и долины, погребенные под более молодыми ледниковыми отложениями, под лёссом и эоловыми песками.

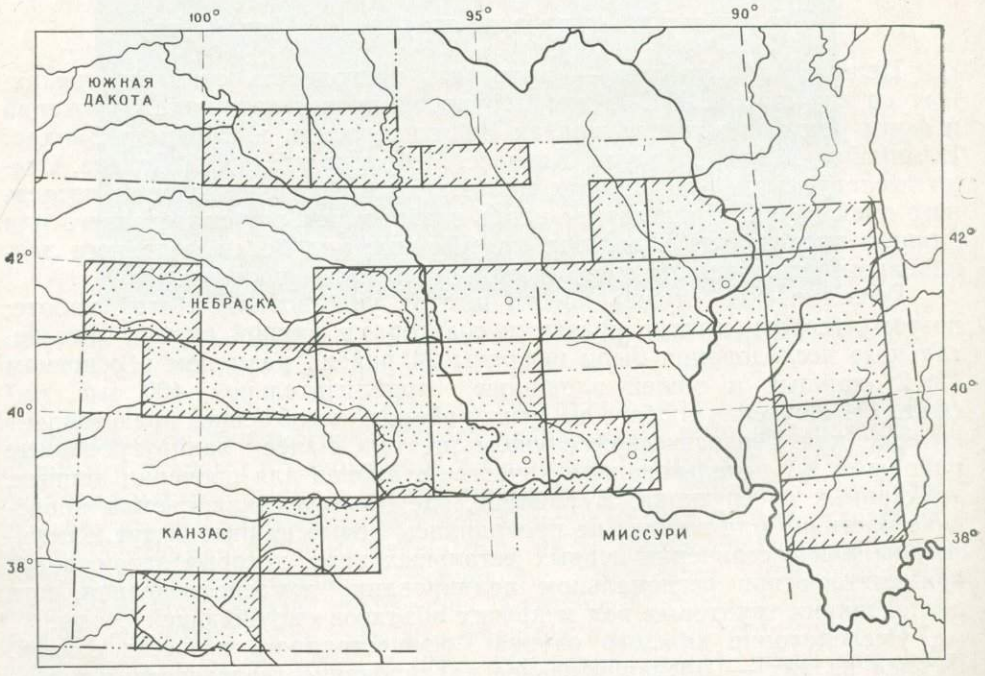
Геологические службы шести штатов участвовали в этой работе; поэтому геологи штатов являются соавторами данной статьи. Для детального исследования были выбраны 24 района размером в основном $1° \times 2°$ каждый и общей площадью приблизительно 400 тыс. км^2 (фиг. 1). Изучение любого из этих районов, несомненно, представляет интерес для Геологической службы штата. Ранее закартированные районы будут использованы в качестве эталонов для проверки данных, полученных со спутника. В районах, где геологическая съемка проведена частично или вообще не проводилась, новые данные будут использованы для составления первых детальных карт, которые затем могут применяться при региональном планировании землепользования, при исследовании грунтовых вод и других объектов окружающей среды.

Исследование каждого района осуществлялось в шесть стадий. Первая из них — предварительное картирование геологических и геоморфологических структур только по снимкам со спутника. На следующих стадиях использовались опубликованные и неопубликованные фак-

тические материалы и дополнительные данные последовательного ряда снимков со спутника ЕРТС, которые регистрируют изменения таких объектов, как растительный покров, пахотные земли, снежный покров, а также условия влажности почвы. Шестая стадия — суммирование информации, полученной по снимкам ЕРТС.

В настоящее время авторы статьи располагают лишь 70-миллиметровыми позитивами на прозрачной основе и несколькими негативами, в большинстве случаев слишком плотными для получения хорошего увеличения с помощью имеющегося оборудования. Позитивные пленки просматриваются под лупой при 8- и 10-кратном увеличении, а в некоторых случаях на специальном аппарате «I²S Mini-Addcol», предназначенном для просмотра движущейся пленки. Негативные отпечатки с 70-миллиметровых позитивов в масштабах от 1 : 1 000 000 до 1 : 250 000 используются в качестве фотографической основы при картировании геологических структур. Однако в настоящее время для получения увеличенных позитивных отпечатков используются промежуточные негативы, изготовленные с 70-миллиметровых позитивов. Авторы считают более целесообразным использование диапозитивов 9″×9″, которые следует просматривать на светостоле, перенося результаты интерпретации непосредственно на топографическую основу. Но в настоящее время количество крупноформатных негативов еще недостаточно.

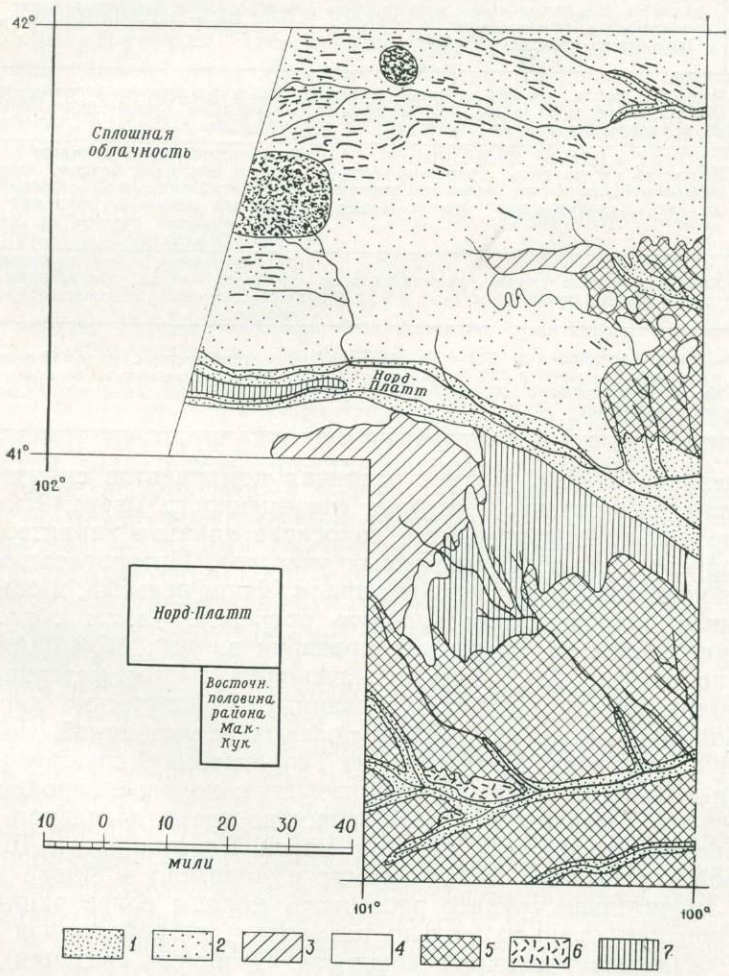
Основными помехами при данном исследовании были растительный покров, повсеместно развитый на Великих равнинах и Среднем Западе в вегетационный период, очень дождливые лето и осень и вызванная атмосферными условиями плохая видимость. В вегетационный период хлеба на нивах и лиственный покров в лесах сильно затрудняли сбор информации о геологии района, почвах и в особенности о мелких формах рельефа. На летних снимках «красная» зона 5 МСС была наиболее полезной для интерпретации геологических формаций. На осен-



Фиг. 1. Обзорная карта возможных районов исследований на Великих равнинах и Среднем Западе.

них фотографиях более информативными оказались инфракрасные зоны, потому что общая инфракрасная спектральная характеристика уменьшается благодаря наличию посевов и естественного растительного покрова. Весенние фотографии должны давать максимальную информацию о почвах, четвертичных отложениях и формах рельефа.

Потенциальные возможности снимков ЕРТС для расчленения и картирования геологических формаций в масштабе 1 : 250 000 и меньшем вполне удовлетворительны. Разрешающая характеристика снимков и распознаваемость объектов исключительно хорошие. Можно различить «сетку» сельских дорог в основном шириной 18—24 м (включая естественное основание дороги, обочину, придорожные канавы) и таким образом точно определить местоположение структур. Авторы статьи считают, что крупные формы рельефа как в совокупности, так и в отдельности обычно выглядят очень четко на снимках ЕРТС хорошего качества, что, как правило, позволяет выделить основные комплексы четвертичных отложений. Следует указать, что при интерпретации геологических структур на таких мелкомасштабных снимках редко встречаются очень четкие признаки; поэтому следует обращать внима-



Фиг. 2. Предварительная карта районов исследований (Норд-Плат и Восточный Мак-Кук, штат Небраска).

Условные обозначения см. на стр. 222.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К ФИГ. 2

Условные обозначения	Характеристика форм рельефа	Характеристика рыхлых отложений
1	Придолинные понижения — пойменные равнины и низкие аллювиальные террасы	Позднечетвертичный аллювий (висконсин и голоцен)
2	Формации Песчаных Холмов. Высокие непрерывные песчаные дюны большой протяженности. Относительные превышения рельефа 30—75 м. Поперечные и продольные дюны чередуются с узкими междюнными понижениями, локально обводненными и заболоченными; водотоки очень редки. Жирная пунктирная линия — простирание крупных, удлиненных дюн. Жирный пунктир — участки с многочисленными активно перевеваемыми песками	Эоловый песок мощностью 15—75 м и более, перекрывающий среднеплейстоценовый аллювий, лёсс и другие осадки
3	Низкие песчаные дюны и песчаные равнины с одиночными дюнами. Относительные превышения до 22,5 м. Очень мало водотоков	Эоловые пески мощностью 0,5 м, редко более 22,5 м, перекрывающие среднеплейстоценовый аллювий, лёсс и другие осадки
4	Равнины, почти плоские с превышениями обычно менее 15 м, редко — 30 м; водотоки редкие, разрозненные	Лёсс и локальные эоловые пески, перекрывающие среднеплейстоценовый аллювий и лёсс
5	Умеренно расчлененные равнины (превышения меньше 60 м). Умеренно широкие, до узких, сравнительно ровные водоразделы	Возвышенности с мощным позднечетвертичным лёссовым чехлом, перекрывающим среднеплейстоценовый аллювий и лёсс, а в южной половине трапеции Е 1/2 Мак-Кук — коренной породы (в основном формация Огаллала)
6	Умеренно расчлененная равнина (превышения обычно менее 30 м)	Возвышенности с позднечетвертичным лёссовым чехлом, залегающим на среднеплейстоценовом аллювии или коренной породе
7	Сильно расчлененные равнины (превышения рельефа обычно около 60 м) с близко расположенными долинами и узкими водоразделами	Возвышенности с маломощным позднечетвертичным лёссовым чехлом, залегающим на среднеплейстоценовом аллювии и лёссе

ние на незначительные, мелкие различия компонентов снимка, например тональности оттенка, рисунка, насыщенности цвета. Интерпретация типов рельефа производится на основе анализа характера речной сети, водоразделов, обрабатываемых участков. Интерпретация четвертичного покрова более трудна, чем анализ форм рельефа, и обычно предусматривает двойную или тройную проверку. Таким образом, при составлении надежной карты для проверки данных необходимо значительное количество фактического материала. Таким материалом служат опубликованные и неопубликованные геологические карты, данные бурения, а также результаты полевых исследований, полученные авторами статьи и их соавторами из Геологической службы штатов.

Были выделены следующие образования: крупные заполненные аллювием русла и морены, образовавшиеся во время последнего оледенения, такие, например, как система морен Блумингтон и Шелбивилл в Иллинойсе и система морен Бемис и Алтамонт в Айове и Южной Дакоте. Значительно труднее распознать морены более ранних оледенений. Они, как правило, сильно размыты и погребены под лёссом и другими осадками различной мощности. Обзорные сведения о речной сети, водоразделах и степени эрозионного расчленения территории способствуют выявлению аномалий, которые могут указывать на наличие погребенных морен. Анализ осуществлялся в основном с помощью

снимков большой обзорности, сделанных со спутника ЕРТС. На основании анализа речной сети и водоразделов в Небраске, Канзасе, Айове и Миссури удалось установить несколько систем довисконсинских морен, достаточно хорошо изученных по данным бурения. Кроме того, несколько аномалий, выделенных в перечисленных штатах, выявляют неизвестные ранее системы довисконсинских морен.

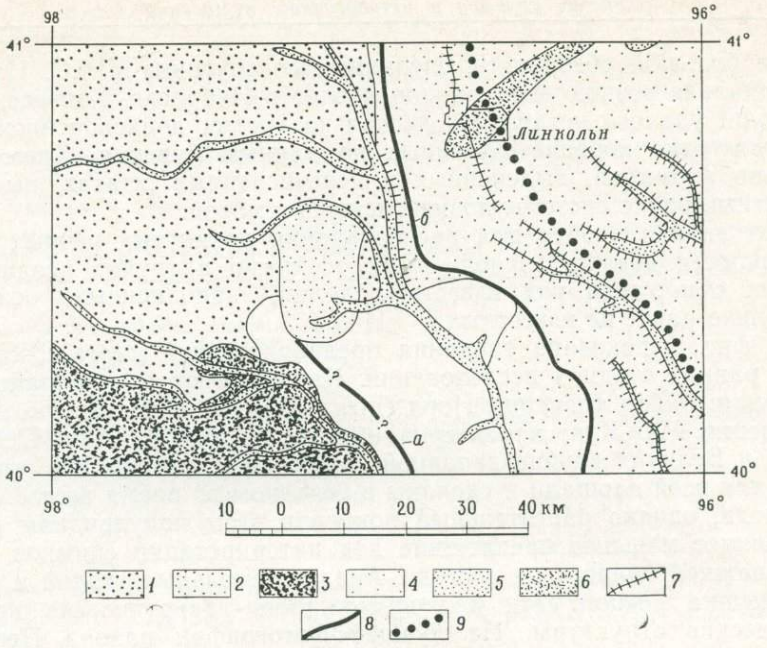
Этот анализ удобен для распознавания покинутых речных долин, в особенности древних, заполненных осадками и трудно различимых. Так был обнаружен ряд известных долин, заполненных осадками, и несколько ранее не известных.

На фиг. 2 показана типичная предварительная карта, составленная на ранних стадиях исследования. Карта включает два района исследования: район трапеции Норд-Платт (1°×2°) и восточную половину трапеции Мак-Кук; характерна она также для районов Песчаных Холмов и Великих равнин западной Небраски. Снимки ЕРТС имеются еще не для всей площади и сделаны в основном во время вегетационного периода, однако растительный покров в этом полуаридном районе представляет меньшее препятствие для интерпретации снимков, чем в более влажной области на востоке. Анализ земельных угодий и планового рисунка речной сети дал возможность закартировать крупные геологические структуры. На лучшей фотографии района Песчаных Холмов легко различаются крупные дюны и депрессии между ними. По снимкам в инфракрасных зонах регистрируют положение уреза воды в многочисленных водоемах и болотах этого района и таким образом получают новейшую сводку о положении уровня грунтовых вод. На некоторых участках района Песчаных Холмов гидрологам недавно удалось установить возможность истощения грунтовых вод, связанную с их усиленным отбором.

На фиг. 3 дан уменьшенный и обобщенный вариант предварительной карты района Линкольн, Небраска. Это типичный район переходной зоны между непокрывавшейся ледником восточной частью Великих равнин и центральными районами, которые подверглись оледенению в среднем и раннем плейстоцене. На карте показаны не только крупные геологические структуры, которые можно различить на снимках ЕРТС, но и некоторые частично погребенные, не выявленные ранее. Линии простирания трех систем древних морен определяются по аномалиям в расположении речной сети и в характере водоразделов. Канзанские[1] и возможно более древние морены плохо различимы, так как подверглись сильной эрозии, прежде чем оказались скрытыми лёссом. Необычный характер русла близ района Линкольна также указывает на наличие погребенной долины. Существование этих структур подтверждено полевыми наблюдениями и бурением, проведенным Геологической службой штата Небраска.

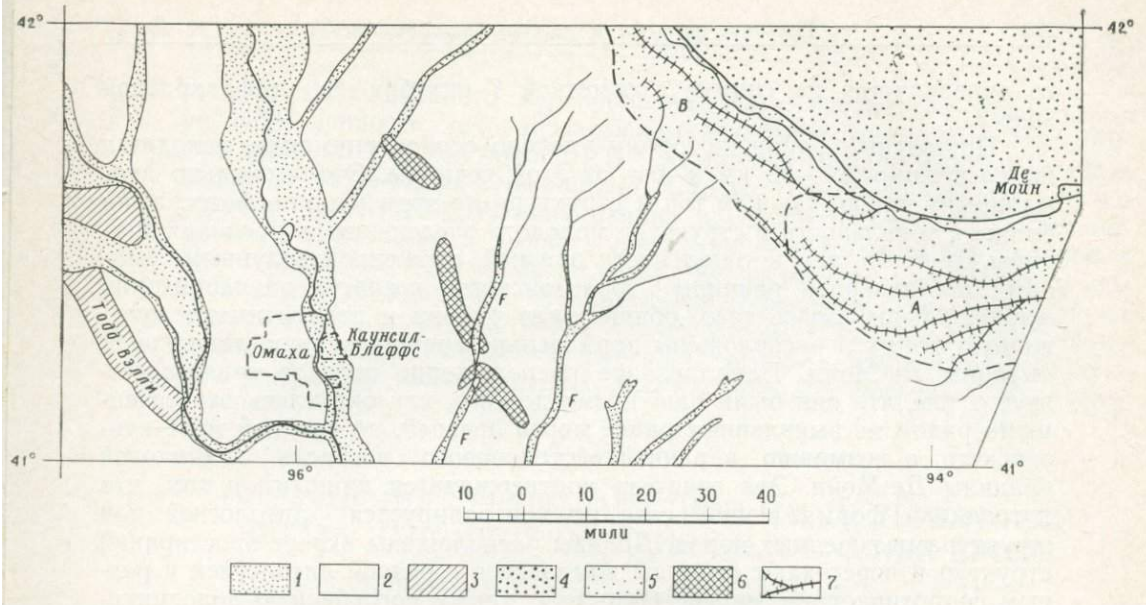
Наиболее детально изучен район площадью 25 тыс. км², простирающийся от Де-Мойна на 45 км к западу в сторону Омахи (фиг. 4). На фиг. 4 показано лишь несколько наиболее важных образований. В северо-восточной части лучше всего видна граница между районом, который был покрыт ледником в период 14 тыс. — 13 тыс. лет назад (ледниковая впадина Де-Мойн), и более древним ландшафтом на юге, претерпевшим оледенение в среднеплейстоценовое время; в настоящее время рельеф здесь глубоко расчленен речными потоками. Эта граница хорошо видна (по конфигурации земельных угодий) на снимках «красной» зоны 5, сделанных во время вегетационного периода, а на снимках в инфракрасных зонах различается плохо. Эта граница лучше все-

[1] Вторая ледниковая стадия плейстоцена. — *Прим. перев.*



Условные обозначения	Характеристика форм рельефа	Характеристика рыхлых отложений
1	Равнина с редкими водотоками, с широкими, почти плоскими водоразделами. Основные водотоки врезаны меньше чем на 30 м	Возвышенности с мощным позднечетвертичным лёссовым покровом, перекрывающим средне- и раннеплейстоценовый аллювий и лёсс. В восточной части местами моренные отложения
2	Умеренно расчлененные равнины. Умеренно широкие до узких, сравнительно плоские водоразделы; речные долины на среднем расстоянии друг от друга. Основные водотоки врезаны на 30—60 м	
3	Умеренно расчлененные равнины, подобные указанным выше	Возвышенности с маломощным до мощного позднечетвертичным лёссовым покровом, перекрывающим моренные осадки и другие осадки средне- и раннеплейстоценового возраста
4	Сложно расчлененные равнины с близко расположенными долинами и узкими водоразделами. Основные потоки врезаны на 30, реже — более чем на 60 м	
5	Придолинные понижения, различимые на фотографиях со спутника ЕРТС: пойменные равнины и низкие аллювиальные террасы, показанные штрихами (гашюрами), там, где простирание их контролируется средне- и раннеплейстоценовыми моренами	Позднечетвертичный аллювий, локально — лёсс (висконсин и голоцен)
6	Древние (среднеплейстоценовые) долины	
7	Водотоки без понижений, различимые на снимках со спутника ЕРТС, простирание которых контролировалось ранне- и среднеплейстоценовыми моренами	
8	Водораздел, контролируемый известной системой морен среднеплейстоценового (канзанского) возраста *а* — валунные глины морены Никерсон, *б* — валунные глины морены Седар-Блафс	
9	Линия простирания аномалий гидросети, созданных, вероятно, моренами средне- или раннеплейстоценового возраста	

Фиг. 3. Предварительная карта района исследований (Линкольн, штат Небраска). Составлена по снимкам со спутника ЕРТС-1 (1022-16384-5; 1095-16451-5,7; 1076-16391-5,7).



Условные обозначения	Характеристика форм рельефа	Характеристика рыхлых отложений
1	Придолинные понижения. Пойменные равнины и низкие террасы. *F* — обводненные зоны вдоль рек Восточная и Западная Нишнаботна по снимкам ЕРТС	Позднечетвертичный аллювий (висконсин и голоцен)
2	Равнины от умеренно до сильно расчлененных	Возвышенности, покрытые позднечетвертичным лёссом, перекрывающим тилль (валунные глины) и другие средне- и раннечетвертичные осадки
3	Промежуточные террасы рек Платт-Ривер и Тодд-Велли, покинутое русло реки Платт-Ривер	Висконсинский аллювий
4	Морены (система конечных морен Бемис) и моренная равнина ледниковой впадины Де-Мойн	Поздневисконсинский тилль (кэри — поздний вудфорд), локально перекрывает более древние плейстоценовые отложения
5	«Тонально-аномальный» район с дуговидной врезанной речной системой, параллельной системе морен Бемис. Район *A* выявлен по фотографиям 1003-16334-5, район *B* — вероятное продолжение снимка 1076-16384-7	Возвышенности, покрытые позднечетвертичным лёссом (мощность редко менее 6 м), залегающим на средне- и, возможно, раннеплейстоценовом тилле
6	Аномально темные участки (с низкой инфракрасной отражательной способностью) на снимке 1003-16334-7	То же, что в графе 2. Значение инфракрасных аномалий не ясно
7	Водотоки, направление которых, возможно, контролировалось моренами ранне- или средиечетвертичного возраста	

Фиг. 4. Предварительная карта районов исследования (Омаха и частично Де-Мойн и Фремонт, штаты Небраска и Айова).

го определяется на снимке с отметкой 7 октября в инфракрасной зоне 7.

Интересный район, которому уделено особое внимание, находится на расстоянии 24—38 км к югу от этой границы. Это «тонально аномальный» район, так как тон и структура на этом участке фотографии ближе к тональности и структуре молодого оледенения в пределах впадины Де-Мойн, чем к тональности древней, сложенной валунными глинами расчлененной равнины доканзанского возраста на территории южной Айовы. Более того, общий план района и потоки имеют дуговидную форму и расположены параллельно внешнему краю ледниковой впадины Де-Мойн. Параллельное расположение потоков свидетельствует о том, что они были линейными до того, как оказались пересеченными рядом не выявленных ранее морен древней, по крайней мере канзанского, а возможно, и раннеплейстоценового возраста ледниковой впадины Де-Мойн. Эта гипотеза подтверждается данными о том, что дуговидная форма речной сети не контролируется литологией или структурами коренных пород. Долины расположены вкрест простирания структур и пересекают границы комплексов с разной литологией и разным сопротивлением эрозии. Они секут также погребенную доледниковую эрозионную долину, строение которой согласно структурам в коренных породах.

На упомянутой карте показаны также зоны, заливаемые во время сильных наводнений, которые закартированы по снимкам ЕРТС. Эти зоны являются придолинными понижениями и обозначены буквой *F* на юге центральной части фиг. 4. С 11 по 13 сентября подъем воды в реке Восточная Нишнаботна в юго-западной Айове был наибольшим за последние 50 лет. Разлив реки Западная Нишнаботна был не столь значительным. На снимках ЕРТС, сделанных через 6—7 дней после наводнения, затопленные площади выделяются как отчетливые аномально темные зоны в инфракрасной области спектра (особенно в зоне 7). Зоны с низкой отражательной способностью в инфракрасной области спектра связаны с избыточной влажностью почвы и густым растительным покровом. Лаборатория дистанционных методов при Геологическом управлении штата Айова закартировала обводненные зоны по мультиспектральным снимкам и спектрозональным аэрофотоснимкам, полученным через три дня после наводнения. Границы наводнения, закартированные по аэрофотоснимкам и по снимкам со спутника ЕРТС, хорошо совпадают.

В заключение следует сказать, что многозональные снимки, сделанные со спутника ЕРТС, имеют как недостатки, так и некоторые большие преимущества. Их основной недостаток заключается в умеренной разрешающей характеристике снимков и очень ограниченной их стереоскопичности. Даже когда горизонтальные изменения в орбитальных полосах давали значительные перекрытия при повторных изображениях одного и того же района, перепады высот рельефа на стереопарах были неразличимы, поскольку большая орбитальная высота спутника создает ограниченный параллакс. Основное преимущество, по нашему мнению, заключается в возможности получения снимков сверхширокой обзорности для очень крупных регионов. Другое важное их преимущество состоит в привлечении внимания к районам, в которых следует провести полевые и (или) буровые работы. Еще одно преимущество — их мультиспектральность и многократная повторяемость.

Эти фотографии — первые космические снимки Великих равнин и Среднего Запада — свидетельствуют о больших потенциальных возможностях указанных районов и дают материал для обзорного геологического картирования и проведения соответствующих исследований.

Для мелкомасштабного картирования они представляют значительно большую ценность, чем аэрофотоснимки и аэрофотомонтажи. На снимках, сделанных со спутника ЕРТС-1, выявляются зависимости, которые ранее не были столь очевидными. Следует отметить, однако, что по снимкам территории Великих равнин и Среднего Запада сложнее получить информацию и выявить аномалии, чем по снимкам районов с более высокими отметками рельефа, менее густым растительным покровом и слабой дымкой. Низкие отметки рельефа изучаемого района заставляют производить более углубленный и многократный анализ снимков с целью выявления аномалий, которые могут свидетельствовать о наличии таких скрытых образований, как погребенные долины и морены.

ОЛЕДЕНЕНИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТЕРРИТОРИИ ШТАТА ВАЙОМИНГ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ЕРТС-1

Р. Бреккенридж

(Геологический факультет Вайомингского университета, Ларами)

В эпоху плейстоцена на территории северо-западной части штата Вайоминг образовались огромные массы ледникового льда, который не входил в сплошной ледяной покров Северной Америки, но оказал большое влияние на рельеф и современный облик этой местности. Отложения песка и гравия, образовавшиеся под влиянием ледниковой эрозии, служат важным источником строительных материалов; кроме того, к ним приурочены превосходные водоносные горизонты. Оледенение создало также многочисленные природные резервуары в виде озер, заполняющих ледниковые цирки или образовавшихся в результате подпруживания стока моренами.

Хронология оледенения Скалистых гор основана на типах отложений, обнаруживающихся в горах Уинд-Ривер штата Вайоминг. Несмотря на то что на отдельных участках оледенение было изучено детально, область в целом с точки зрения гляциологии по существу не исследована. Большие площади, сложный рельеф местности, невозможность проверки полученных данных и труднодоступность района не позволяли провести региональные исследования. Появление данных ЕРТС-1 создало великолепную техническую базу для широких геоморфологических исследований гляциологического профиля. В этой статье излагаются предварительные результаты гляциологического картирования, проведенного с использованием простых методов интерпретации (с определенным ограничением точности) по снимкам, переданным со спутника.

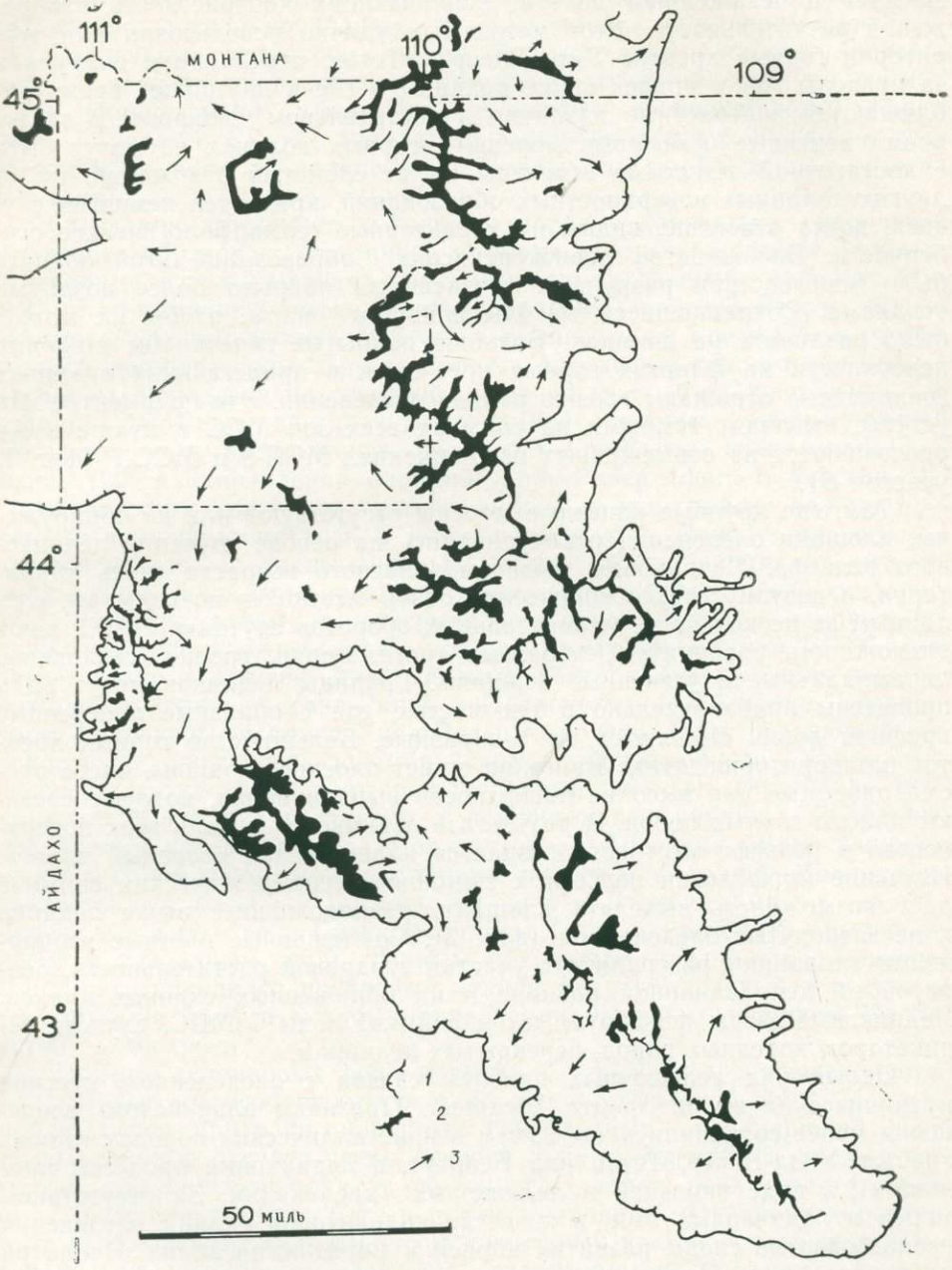
На фиг. 1 представлен мелкомасштабный фотомонтаж снимков исследований территории по данным ЕРТС-1 МСС-5. Более темная северо-западная часть снимка, на которой отражен пологий рельеф и отчетливо выделяется озеро, соответствует Йеллоустонскому плато. Оно обрамлено с востока горным хребтом Абсарока, а с юга — горами Тетон и Гро-Вентр. Большая структура северо-западной ориентировки в центре южной части снимка соответствует горному хребту Уинд-Ривер. Гребни и долины северной ориентировки в юго-западной части снимка относятся к надвиговой зоне Вайоминга. Все снимки были получены ранней осенью 1972 г. при безоблачной погоде. Анализ изображения осуществлялся посредством обычных методов фотоинтерпретации, дополненных контролем цвета снимков и стереонаблюдениями.



Фиг. 1. Монтаж снимков ЕРТС МСС-5 для территории северо-западной части штата Вайоминг.

Для получения изображения, представленного в упрощенном виде на фиг. 2, были совмещены снимки, очерчивающие распространение ледяного покрова в момент максимального оледенения. Области оледенения, показанные на карте, выявлены на основе изучения одного или нескольких типов ледникового рельефа. Ледниковые формы рельефа на снимках легко подразделяются на эрозионные и аккумулятивные. Наиболее характерными аккумулятивными ледниковыми формами рельефа считаются морены. Отложения подобного типа хорошо оконтуриваются в районе озер Бул-Лейк и Пайндейл, хотя в тех случаях, когда контакт скрыт, их трудно выделить. Эти мощные петлеобразные конечные морены подпруживали бывшие ледниковые озера на флангах хребта Уинд-Ривер (фиг. 1, участок *А*). Озерные тилли[1] до сих пор не используются для сельскохозяйственных целей из-за сложного рельефа местности, неблагоприятных литологических особенностей и низкой проницаемо-

[1] Участки, сложенные ледниковыми валунными глинами. — *Прим. ред.*



Фиг. 2. Карта оледенения северо-западной части территории штата Вайоминг.
1 — максимум оледенения (штрихи направлены в сторону ледника); *2* — площади, выступающие надо льдом; *3* — направления основных ледниковых потоков.

сти. Однако ледниковые наносы, конусы выноса и долинные (слоистые) отложения, расположенные вдали от осадков края ледника, часто содержат достаточное количество основной почвенной массы для разведения таких полевых культур, как кормовая трава и люцерна.

Таким образом, ледниковые отложения на снимках можно разделить на тилли (неслоистые валунные глины) и слоистые отложения, что достигается путем использования совмещенных спектрозональных

снимков с искаженным цветом, усиливающих контрастность изображения растительности. Этот метод был удачно использован для территории горных хребтов Уинд-Ривер и Тетон, где ледники выступали за пределы гор в прилегающие впадины и где в настоящее время наблюдаются контрастные различия в растительном покрове. В то же время конечные и боковые морены в горных долинах не могут быть с достаточной четкостью отделены ни от слоистых отложений, ни от других долинных поверхностных образований, кроме тех немногих случаев, когда отчетливо видны их характерные геоморфологические особенности. Большинство довисконсинских образований этой области было впоследствии разрушено эрозией или покрыто более поздними осадками. Сохранившиеся выходы слишком малы, чтобы их можно было различить на снимках. Большие покрытые галечником столовые поверхности на флангах горных хребтов и в прилегающих впадинах (педименты) отражают эрозию ранних оледенений. Эти педименты, или уступы, выглядят темными на снимках всех зон МСС и лучше всего распознаются на совмещенных изображениях МСС-5 и МСС-7 (фиг. 1, участок *B*).

Там, где крупные конечные морены отсутствуют или не обнаружены, площади оледенения оконтуривались на основе изучения ледникового рельефа. Ледниковая эрозия альпийского возраста очень характерна, и поэтому стереоскопический обзор местности по снимкам, сделанным за несколько последовательных оборотов спутника ЕРТС, дают возможность различить U-образные троги, цирки, гребни, седловины, пирамидальные и усеченные вершины. Границы ледников могут быть проведены приблизительно в тех местах, где U-образные поперечные профили долин сменяются на V-образные. Большинство горных хребтов на территории штата Вайоминг имеет плоские вершины, часто рассматриваемые как высокие поверхности выравнивания, которые срезают пласты горных пород. В результате ледниковой эрозии этих поверхностей в рельефе местности создается классический «слоеный пирог». Изучение морфологии рельефа с помощью стереоскопических снимков дает возможность выделять площади, расположенные выше ледника и не затронутые оледенением (фиг. 2). Совмещенные цветные изображения позволяют разграничить участки тундровой растительности, развитой на денудационной равнине и на обнаженных склонах цирков. Ледниковые озера, фиксируемые на снимках зоны 7 МСС, служат индикатором коренных пород, перекрытых ледником.

Целый ряд нерешенных проблем связан с оледенением массива вулканических пород хребта Абсарока. Признаки альпийского оледенения менее сохранились здесь, чем в кристаллических породах горных хребтов Уинд-Ривер, Тетон или Беартут, а ледниковые процессы проявились в виде оползней и ледниковых дислокаций. За отсутствием морен и ледниковых озер в качестве индикаторов границ оледенения использовались следы развития цирков и морфология долин. Несмотря на то что плато Йеллоустон также имеет вулканическое происхождение, его низкий рельеф в меньшей степени подвергался денудации, в результате чего здесь сохранилось больше признаков оледенения, включающих морены, наносы и озерные отложения.

В процессе картирования направлений ледниковых потоков (фиг. 2) использовались такие показатели, как общий уклон местности и расположение ледниковых трогов, U-образных долин и цирков. В некоторых районах лучшим признаком оледенения служат эродированные слоистые породы. Направления ледниковых потоков в высокогорной части хребта Уинд-Ривер проверялись также по рисунку крупных трещин, развитых в докембрийских породах. Линейные сгущения

таких трещин образуют зоны, по которым происходит избирательная ледниковая эрозия, приводящая к образованию серий прямолинейных и параллельных ледниковых долин. Великолепный образец хорошо распознаваемого направления ледникового потока имеется на снимке ЕРТС для северной части Йеллоустонского национального парка (фиг. 1, участок *C*), где ледник, двигавшийся с плато Буффало, прослеживается вниз по долине реки Йеллоустон до Гардинера (штат Монтана).

Сочетания друмлинов и боковых морен с коренными породами, в которых образованы промоины в форме широких желобов и ориентированные озера, выглядят на снимке параллельными линиями. Линейные образования особенно хорошо развиты на горе Евертс вблизи Маммота, где лед должен был иметь мощность не менее 600 м, чтобы покрыть вершину горы. Другая область, где ледниковые потоки весьма наглядны, находится на северной оконечности хребта Уинд-Ривер, где ледник Грин-Ривер двигался из огромной долины, напоминающей Йосемитскую и, наталкиваясь на хребет Гро-Вентр, поворачивал под углом 120° в направлении бассейна Грин-Ривер (фиг. 1, участок *D*). Свидетельством движения ледяного потока в этом районе служат срединные и боковые морены. В юго-западном углу Йеллоустонского национального парка видны крупные русла; в выполняющих их отложениях потоки талой воды проделали множество параллельных каналов.

Сравнение данных о максимальном продвижении и направлении движения ледниковых потоков, установленных по снимкам ЕРТС, свидетельствует о наличии двух главных центров аккумуляции льда — покровных ледников Уинд-Ривер и Йеллоустон — Абсарока. Большая часть покровного ледника Уинд-Ривер, вероятно, была ограничена высокогорьем, сложенным докембрийскими образованиями, кроме, возможно, десятка мест, в которых долинные глетчеры пересекали пояс каменистых гребней и стекали в прилегающие впадины. Локальные ледниковые потоки покрова Йеллоустон — Абсарока имели сложную конфигурацию, радиально растекаясь на север в долину Йеллоустон, на восток — к бассейну Бигхорн, на юг — в Джексон-Хол и на запад — к равнине реки Снейк. Глетчеры Тетон и Гро-Вентр обычно относят к указанным двум главным покровным ледникам. Севернее Вайоминга находился покровный ледник Беартут, который в результате движения льда в южном направлении слился с ледником Йеллоустон — Абсарока.

Помимо ледниковых форм рельефа, с успехом картируются многие родственные им особенности рельефа перигляциальной зоны. Местами наблюдаются признаки обширных современных перемещений льда. В большинстве случаев следы течения льда определяются прежде всего там, где он изолирован от окружающих пород, почв и растительности. Движение ледяных масс в целом выявляется благодаря характерным дугообразным формам его фронтальных частей и торосистым поверхностям, которые обусловлены характером и скоростью течения льда. Эти относительные черты используются при выявлении ледяных потоков. На совмещенных цветных изображениях отчетливо различаются крупные оползни в районе населенных пунктов Гардинер и Маммот, у горы Картер и близ перевала Тогвоти. Хорошо видны также оползневые склоны и конусы выноса на известных оползнях Гро-Вентр и Хебген-Лейк.

С помощью данных МСС-5 и 7 были закартированы участки медленно оползающих скальных обломков (каменные глетчеры). Самые крупные и наиболее многочисленные каменные глетчеры наблюдаются в цирках хребта Абсарока. Другие перигляциальные образования

(исключая дюнные поля) различимы только на крупномасштабных аэрофотоснимках. Широкий пояс дюн южнее хребта Уинд-Ривер может служить примером ледниковых эоловых отложений. В процессе картирования активные дюны отличались от дюн, закрепленных растительностью, по характерной для них более высокой отражательной способности во всех зонах спектра.

Водное питание всех бассейнов Вайоминга зависит от величины горного водостока. Постоянно сохраняющиеся снежные поля и небольшие глетчеры — останцы последней стадии оледенения или «эпохи малого льда», играют существенную роль в гидрологическом цикле. Предварительные исследования с использованием снимков ЕРТС выявили хорошие возможности картирования и производства измерений в областях развития снежных и ледяных покровов. Снимок, сделанный в конце лета, был с успехом использован для обнаружения круглогодично сохраняющихся снежных полей и небольших глетчеров. Снег легче распознается на снимках МСС-4, тогда как на снимках МСС-7 лучше различаются глетчеры. Древние ледниковые и аллювиальные отложения служат водосборными емкостями, которые удерживают талую воду и медленно пропускают ее в течение летних месяцев, способствуя плодородию всего бассейна и более обильной растительности по сравнению с окружающими обнаженными породами мелового и третичного возраста. Аллювиальные и ледниковые отложения картируются с помощью совмещенных снимков с искаженным цветом.

Результаты исследований, проведенных с помощью снимков ЕРТС, сравнивались с данными аэрофотосъемки, после чего с использованием обычных технических средств составлялись соответствующие карты зон оледенения. Карты, составленные по данным ЕРТС, не противоречат результатам исследований Лава [1], Ричмонда [3], Ричмонда и др. [4, 5], Уолдропа и Хайдена [6] и Пирса [2]. Большое количество ледниковых образований не обнаруживалось на снимках ЕРТС, пока не было произведено сравнение с обычными картами или мультиспектральными аэроснимками. Аэроснимки, сделанные с небольшой высоты, в результате оказались полезнее, чем снимки, полученные со спутника ЕРТС, так как содержали много важных деталей. В некоторых случаях дешифрирование аэроснимков давало больше информации, чем полевые карты.

В большинстве случаев интерпретация снимков, сделанных со спутника, вызывала затруднения для районов с относительно густой растительностью. Однако с помощью данных спутника даже незначительные различия в рельефе картируются намного легче, чем при наземных наблюдениях.

Успех данной работы свидетельствует об эффективности использования снимков, полученных со спутника ЕРТС, для региональных геоморфологических исследований, особенно в тех случаях, когда изучаемая территория труднодоступна. С помощью современных технических средств нельзя провести детальную стратификацию или подразделить сходные по облику тилли, однако существует возможность выявить общие закономерности в областях широкого развития ледниковых образований. Снежные и ледяные покровы легко и быстро картируются, а их изменения поддаются контролю с помощью ЕРТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Love J. D.*, Reconnaissance study of Quaternary faults in and south of Yellowstone National Park, Wyoming, Geol. Soc. Am. Bull., 72, p. 1753, 1961.
2. *Pierce W. G.*, The Carter Mountain landslide area, northwest Wyoming, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 600-D, pp. D235 — D241, 1968.

3. *Richmond G. M.*, Glacial geology of the West Yellowstone Basin and adjacent parts of Yellowstone National Park, U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 435, pp. 223—236, 1964.
4. *Richmond G. M. et al.*, Glacial chronology of the Wind River Mountains, in: Internatl. Assoc. for Quaternary Res., VIIth Congress, Guidebook for field conference E, Northern and Middle Rocky Mountains, Nebraska Acad. of Sciences, Lincoln, pp. 28—37, 1965.
5. *Richmond G. M., Pierce K. L., Waldrop H. A.*, Surficial geologic map of Yellowstone National Park, U. S. Geol. Survey Miscellaneous Geol. Invest. Map 1—710, 1972.
6. *Waldrop H. A., Hyden H. J.*, Landslides near Gardiner, Montana, U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 450-E, pp. E11—E14, 1963.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО СКАНАТОРА (МСС) СПУТНИКА ЕРТС-1 ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТОК И ДРЕНАЖА КИСЛЫХ ВОД В ПЕНСИЛЬВАНИИ

С. Александер, Дж. Дейн, Д. Голд

(Отдел дистанционных методов исследования земных ресурсов, Пенсильванский университет, Юниверсити-Парк)

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения угля на востоке США — важный естественный источник энергетического сырья как в настоящее время, так и в будущем. Несмотря на то что значительная часть угольных карьеров в западной Пенсильвании и в других местах Аппалачей уже выработана, в этих районах еще имеются большие запасы угля, залегающего сравнительно неглубоко и пригодного для разработки открытым способом. Однако реальная стоимость производства энергии из угля этих месторождений значительно превышает стоимость его добычи. Это вызвано затратами на восстановление площадей выработанных месторождений для других производственных целей и на осуществление контроля над степенью загрязнения среды кислыми дренажными водами из горных выработок. Даже в случае прекращения горнодобывающей деятельности решение проблем защиты окружающей среды, связанных с эксплуатацией месторождений в прошлом, требует значительных усилий и средств.

Поэтому чрезвычайно важно иметь эффективное средство регистрации размеров вскрытых площадей для обнаружения районов, подвергшихся вредному воздействию кислых вод. Необходимо оценивать результативность мер по восстановлению окружающей среды и борьбе с ее загрязнением. Спутник ЕРТС позволяет многократно получать снимки, полностью охватывающие исследуемую площадь, благодаря чему данные ЕРТС обеспечивают потенциальную возможность получения и оценки текущей информации о влиянии открытых разработок на окружающую среду в любом интересующем районе.

Цель настоящего исследования — определить полезность данных ЕРТС-1 (особенно данных МСС) для проведения мероприятий по охране окружающей среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В качестве объекта исследования был выбран район, охватывающий западную часть бассейна реки Саскуэханна (Пенсильвания), поскольку здесь находятся старые и новые открытые разработки битуминозных углей и связанные с ними многочисленные проявления дренажа

кислых вод из горных выработок. Выбор исследуемой площади определяется также наличием детальных наземных геологических и геофизических наблюдений, имеющихся, в частности, для одного из участков в районе Килертауна. Для некоторых участков этого района используются также данные аэрофотосъемки с самолетов U-2 и C-130. Эти дополнительные материалы служат основанием для оценки результатов, полученных путем цифровой обработки записей МСС спутника ЕРТС-1.

Например, с помощью ЭЦВМ была проанализирована запись цифровых данных (CCT 1045-15240), полученная 6 сентября 1972 г. при прохождении спутника над Пенсильванией. Хотя в этот день можно было использовать только 3 канала (4,5 и 7), благодаря их одновременному применению были получены очень хорошие результаты по определению характерных особенностей участков открытых разработок и дренажа кислых вод из горных выработок.

Обработка полученной информации заключается в подготовке и преобразовании первичных данных в рабочую цифровую запись, отвечающую исследуемой площади размером 32×32 км, расположенной в западной части бассейна реки Саскуэханна в округе Клирфилд (она простирается от Картуса на юг до Филипсберга). Полученные данные были проанализированы с помощью комплекса программ для ЭЦВМ, составленных Борденом и др. в отделе дистанционных методов исследований Пенсильванского университета [1—8].

Сначала было определено местоположение однородных участков и участков с высокй контрастностью объектов. Эти данные позволили определить общие границы некоторых районов открытых разработок и выявить их характерные особенности, такие, как реки и межевые знаки, по которым производится однозначное сравнение снимков с обычными картами. Выяснилось, что применение программ кластер-анализа, разработанных Тернером [8], обеспечивает наиболее точное определение участков открытых разработок и их характерных особенностей в пределах исследуемой площади. По этим программам данные объединяются в группы, каждая из которых имеет собственную спектральную характеристику.

Для такого рода операций предварительные знания о спектральной характеристике исследуемых участков не нужны. Однако эти данные можно использовать в других программах по распознаванию образов[1]. Следовательно, имеется возможность не только однозначного определения участков открытых разработок, но и нахождения таких критериев классификации, которые отражают их реальные различия, например: полностью вскрытые и выработанные участки; действующие в настоящее время открытые разработки угля; периферийные зоны карьеров, частично покрытые растительностью.

Некоторые участки реки Саскуэханна были отнесены к тем же категориям, что и открытые разработки. Это удивительное на первый взгляд явление, с нашей точки зрения, подтверждает правильность критериев классификации, так как вдоль берега реки образовалось большое количество отвалов породы из близлежащих выработок. Другие участки вдоль реки были также отнесены к этой категории из-за отмирающей или погибшей растительности вследствие дренажа кислых вод из горных выработок. Выводы о том, что река Саскуэханна в исследуемом районе сильно загрязнена дренажными кислыми водами, подтверждаются в работе [9].

[1] Имеются в виду программы, построенные на обучении и контроле по известным данным. — *Прим. перев.*

Особенно детальный анализ данных был проведен по небольшому участку снимка окрестностей Килертауна. Здесь были четко выделены следующие подклассы открытых разработок: полностью вскрытые площади, зоны отвалов пустой породы, площади новых разработок и подготовленные для будущей эксплуатации. Участки с растительностью, отмирающей или погибшей, вследствие поступления кислых вод из открытых разработок четко классифицировались посредством кластер-анализа, и их местоположение точно определялось, включая даже очень маленькую площадь, которая была тщательно изучена наземными методами.

Таблица 1

Спектральная характеристика по данным кластер-анализа для района Килертауна

Категория признаков	Символ	Каналы			Площадь, %
		4	5	7	
Леса	1 —	23,43	14,29	24,42	68
Открытые поля	2 X	27,20	21,37	21,27	17
Траншеи (горные выработки)	3 +	30,50	25,72	11,00	4
Засыпанные горные выработки	4 *	32,89	30,67	14,56	5
Дренаж кислых шахтных вод	5 0	24,67	15,67	14,33	4
Новые открытые разработки	6 =	38,00	41,00	19,00	1
Будущие открытые разработки	7 Z	46,00	52,33	23,67	1

В табл. 1 суммируются выводы кластер-анализа по исследуемой площади в районе Килертауна. На основе данных наземных исследований, указанных выше, удалось определить категории признаков, выявленных кластер-анализом. Они перечислены в первой колонке табл. 1. Степень различия этих категорий, выраженная количественно, приведена в табл. 2. Чем меньше расстояние между двумя категориями, тем

Таблица 2

Интервалы деления категорий признаков

	1 —	2 X	3 +	4 *	5 0	6 =	7 Z
1 —	0,0	8,62	19,00	21,33	10,25	30,91	44,24
2 X	8,62	0,0	11,63	12,80	9,33	22,52	36,30
3 +	19,00	11,63	0,0	6,54	12,09	18,81	33,30
4 *	21,33	12,80	6,54	0,0	17,11	12,36	26,91
5 0	10,25	9,33	12,09	17,11	0,0	29,01	43,44
6 =	30,91	29,52	18,81	12,36	29,01	0,0	14,64
7 Z	44,24	36,30	33,30	26,91	43,44	14,64	0,0

они более сходны. Например, подклассы 3 и 4, которые полностью охватывают вскрытые площади, отличные от зон отвалов пустой породы в открытых разработках, относительно мало различаются и обычно сходны по спектральной характеристике, как это видно из значений табл. 1.

Цифровая обработка данных позволяет не только точно классифицировать признаки, но и определить общую площадь, на которую повлияли вскрышные работы, путем подсчета площади для каждой кате-

гории, выделенной по программе кластер-анализа. Например, было обнаружено, что открытые разработки занимают примерно 20% площади исследуемого района у реки Саскуэханна и около 11% площади вокруг Килертауна. Последняя колонка табл. 1 показывает площадь (в %), относящуюся к каждой категории в районе Килертауна.

Было обнаружено, что спектральная характеристика для открытых разработок, расположенных в разных местах исследуемой площади, одинакова. Поэтому мы полагаем, что эта характеристика может использоваться при составлении точных карт существующих в настоящее время открытых разработок на больших территориях (возможно, для целых штатов или регионов). Кроме того, регулярное применение анализа такого типа способно обеспечить текущей информацией о мерах по восстановлению ландшафта и о дренаже кислых вод из выработок.

Цифровой анализ позволяет классифицировать горные разработки и выявлять их детальные особенности, тогда как визуальное изучение снимков, полученных с помощью ЕРТС-1, позволяет определять лишь местонахождение крупных открытых разработок. Посредством визуального анализа снимков ЕРТС нельзя выделить и определить площади, подвергшиеся воздействию дренажа кислых вод из горных выработок. Поэтому для получения такого рода информации необходима цифровая обработка данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Спектральные данные МСС ЕРТС-1 можно использовать в соответствующих программах цифровой обработки с целью картирования размеров и типов существующих в настоящее время открытых разработок полезных ископаемых, включая дробную классификацию их для каждого района.

2. На основании предварительных выводов этого исследования появилась возможность использовать данные ЕРТС для периодической регистрации размеров и местоположения существующих в настоящее время открытых горных разработок в пределах больших регионов для оценки эффективности мер восстановительных работ и борьбы с загрязнением среды.

3. Посредством тщательной цифровой обработки данных ЕРТС-1 можно обнаружить и нанести на карту участки, подвергшиеся губительному воздействию дренажа кислых вод из горных выработок. Такие районы нельзя обнаружить путем визуального анализа снимков ЕРТС.

4. Данные о характере растительного покрова участков в различные сезоны, полученные с помощью постоянного наблюдения за ними со спутника ЕРТС, дают еще более мощные критерии для классификации вследствие значительного влияния дренажа кислых вод из открытых разработок на растительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borden F. Y.*, Digital Aircraft Multispectral Scanner Data Tape Format, Tech. Rept. 1—71, Office for Remote Sensing of Earth Resources, The Pennsylvania State Univ., Univ. Park, Pa., 1971a.
2. *Borden F. Y.*, NMAP Program Description, Tech. Rept. 2—71, Office for Remote Sensing of Earth Resources, The Pennsylvania State Univ., Univ. Park, Pa., 1971b.
3. *Borden F. Y.*, UMAP Program Description, Tech. Rept. 4—71, Office for Remote Sensing of Earth Resources, The Pennsylvania State Univ., Univ. Park, Pa., 1971c.
4. *Borden F. Y.*, A digital processing and analysis system for multispectral sensor and similar data, Remote Sensing of Earth Resources, **1**, Edited by *F. Sharokhi*, Univ. of Tennesses Space Inst., Tulahoma, Tenn., pp. 481—507, 1972a.

5. *Borden F. Y.*, LMAP Program Description, Tech. Rept. 2—72, Office for Remote Sensing of Earth Researces, The Pennsylvania State Univ., Univ. Park, Pa., 1972b.
6. *Borden F. Y., Lachowski H. M.*, SUBSET Program Description, Tech. Rept. 3—71, Office for Remote Sensing of Earth Resources, The Pennsylvania State Univ., Univ. Park, Pa., 1971.
7. *Lachowski H. M., Borden F. Y.*, STATS Program Description, Tech. Rept. 6—71, Office for Remote Sensing of Earth Resources, The Pennsylvania State Univ., Univ. Park, Pa., 1971.
8. *Turner B. J.*, Cluster analysis of multispectral remote sensor data, Remote Sensing of Earth Resources, **1**, Edited by *F. Sharokhi*, Univ. of Tennesse Space Inst., Tulahoma, Tenn., pp. 538—549, 1972.
9. Appalachian Regional Commission, Acid Mine Drainage in Appalachia, Appalachian Regional Commission, 1666 Connecticut Avenue, Washington, D. C. 20235, 1969.
10. *Deasey G. F., Griess P. D.*, Atlas of Pennsylvania Coal and Coal Mining, Part I Bituminous Coal, Bull. Mineral Industries Experiment Station, № 73, The Pennsylvania State Univ., Univ. Park, Pa., 1959.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОТВАЛАХ ПОРОДЫ ПО СНИМКАМ СПУТНИКА ЕРТС-1 (ПЕРВЫЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)

Б. Гилбертсон

(«Спектрал Африка (Пти) Лимитед», Рандфонтейн, ЮАР)

ВВЕДЕНИЕ

Многие годы основой экономики Южной Африки была горнодобывающая промышленность. Вследствие этого на территории ЮАР возникли многочисленные отвалы породы, количество и объем которых непрерывно увеличиваются. Эти отвалы подразделяются на два основных типа: насыпные и намывные.

Первые представляют собой насыпи разрушенной горной породы. Со временем материал в отвале выщелачивается, теряя свойства связности. В результате он становится похожим на речной песок, который не содержит в себе питательных веществ и является инертной, неблагоприятной для роста растений средой. Намытый материал состоит из очень тонких частиц кремнистой породы. С ботанической точки зрения этот материал, содержащий цианистые соединения, вреден для растительности, но в процессе выветривания его вредные свойства исчезают. Отходы руды, из которых образуются эти отвалы, содержат пирит. В результате постоянного выветривания пирита в отвалах возникает кислая среда.

Поэтому еще совсем недавно отвалы породы рассматривались как вредное явление для окружающей среды. Например, район Витватерсранд снабжается водой только из реки Вааль; загрязнение же притоков вследствие дренажа из отвалов породы в районе Витватерсранд сказывается на качестве воды реки Вааль, так как горные выработки располагаются в основном на водосборной площади.

Растущее внимание общественности к проблеме загрязнения среды вызвало к жизни закон «О предотвращении загрязнения атмосферы» (Закон № 45 от 1965 г.). Раздел 32 этого закона относится, в частности, к горнодобывающей промышленности. Загрязнение воздуха и воды вследствие вредного влияния отвалов может быть в значительной степени предотвращено путем создания растительного покрова по всей их поверхности. После опубликования закона ежегодные расходы Управления шахт и рудников Южной Африки на создание растительного покрова на горных отвалах постепенно увеличивались и составили

к 1969 г. 1 млн. долларов. Эта сумма не включает затраты шахт и рудников, которые не входят в Управление шахт и рудников Южной Африки.

Состояние развития растительного покрова на горных отвалах до сих пор контролировалось двумя способами — аэрофотосъемкой и обследованием на месте. Обычно предпочитают последний способ из-за его меньшей стоимости и большей точности. С другой стороны, обследование на месте трудно организовать и координировать из-за географической разобщенности горных отвалов.

Снимки со спутника ЕРТС-1 используются, во-первых, с целью предварительной классификации горных отвалов по степени развития растительного покрова и, во-вторых, с целью оценки состояния этого покрова на любом выбранном отвале. Два снимка со спутника ЕРТС-1 (1049-07301 и 1050-07355), охватывающие часть площади, на которой в основном и сосредоточены горные отвалы, были рассмотрены с качественной и количественной стороны. Результаты исследования приведены ниже.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ГОРНЫХ ОТВАЛАХ

Для детального изучения было выбрано шесть горных отвалов. Этот выбор был проведен по фотомонтажу снимков территории Витватерсрандского горнорудного комплекса. Использованы черно-белые триангуляционно привязанные снимки масштаба 1 : 250 000. По фрагменту фотомонтажа был составлен краткий перечень отвалов, которые, по нашему предположению, должны хорошо изображаться на снимке

Таблица 1

Типы растительности	Характеристика степени развития растительного покрова	Пример отвала данной категории
0	Отсутствие растительного покрова	5/L/29 3/L/5 (восточная сторона)
1	Очень слабый растительный покров, требующий постоянного ухода: полива, подкормки и пропашки	3/L/5 (западная сторона)
2	Слабый растительный покров, требующий постоянного внимания. Широкое развитие обнажений почвы	6/L/20
3	Умеренный растительный покров, требующий периодического внимания и подкормки, с рядом обнажений почвы в местах, где почва отличается высокой кислотностью	17/L/1
4	Хороший растительный покров, развивающийся, вероятно, естественным путем, лишь с единичными незначительными обнажениями почвы (местами очень кислой)	1/L/40, 1/L/41
5	Растительность (в том числе древесная), развивающаяся, вероятно, естественным путем, покрывающая 100% поверхности отвала	1/A/20

ЕРТС-1. Затем было произведено наземное обследование этих отвалов и изучение их растительного покрова.

Для классификации горных отвалов по типам была составлена шкала растительности. Эта шкала приведена в табл. 1. Для детального анализа каждого типа отбирался один эталонный отвал с учетом размера площади (как можно большего), однородности (однообразия) растительности, распределенной по поверхности, и контраста (по отношению к окружающей отвал среде). Выбранные отвалы внесены в последнюю колонку табл. 1 по числовой системе, разработанной Управлением шахт и рудников.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

По цветным отпечаткам, изготовленным со снимка 1049-07301 МСС в зонах 4, 5 и 7, соответствующих голубому, зеленому и красному цветам, была проведена качественная интерпретация. С этого цветного отпечатка был получен черно-белый позитивный снимок. По существу все большие отвалы, которые представлены на аэрофотомонтаже, могут быть обнаружены и опознаны на снимке со спутника ЕРТС-1, хотя при этом многие детали цвета на отпечатке утрачиваются.

Более того, наблюдается хорошее качественное соответствие между типами растительности в табл. 1 и отвалами: отвалы, покрытые густой растительностью (отвечающие типам 4 и 5), представляются более темными, чем отвалы, не покрытые растительностью (типы 0 и 1). К тому же картина растительности, различимая на снимке ЕРТС-1, хорошо соответствует реальной обстановке, т. е. картине, которая наблюдается на аэрофотоснимке.

Такое соответствие между снимком ЕРТС-1 и действительностью обнадеживает, если учесть, что снимок 1049-07301 ЕРТС-1 был сделан в сентябре, когда растительность, покрывающая отвалы, находится в плохих условиях. Еще лучшее соответствие ожидается на снимках, сделанных в весенний или летний период.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

На черно-белых негативах снимков ЕРТС-1, увеличенных до масштаба 1 : 160 000, в точках местоположения различных отвалов породы были сделаны измерения оптической плотности. Значения плотности приведены в табл. 2. 95%-ные доверительные интервалы средней плотности свидетельствуют о точности анализа.

Для типов растительности, принятых в табл. 1, на основе данных денситометрии, приведенных в табл. 2, были получены кривые зависимости значений плотности от длины волны света (номер зоны снимка ЕРТС-1). Эти кривые показаны на фиг. 1 и 2.

Фиг. 1 демонстрирует хорошее разделение кривых плотности для каждого типа растительности (категории 0, 1, 4 и 5). Следовательно, можно предположить, что горные отвалы, попавшие в эти категории, вполне распознаваемы. Однако ряд аномалий требует дальнейшего изучения. Например, значения плотности для отвала 5/L/29 (см. табл. 2) ниже, чем для отвала 3/L/5, который попадает в ту же категорию по растительности. Хотя эта аномалия в настоящее время изучается, удовлетворительного объяснения ей еще не найдено.

Значения плотности для типов растительности 2 и 3 были сначала приняты за аномальные, поскольку кривые на фиг. 2 значительно отличаются по форме от таких же кривых на фиг. 1. Однако при изучении материалов Управления шахт и рудников по программе озелене-

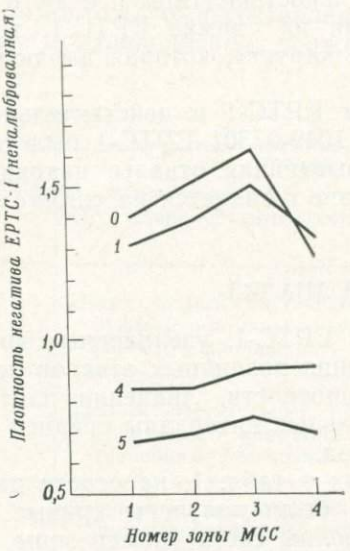
Таблица 2

Значения плотности изображений отвалов породы на негативных снимках масштаба 1 : 160 000

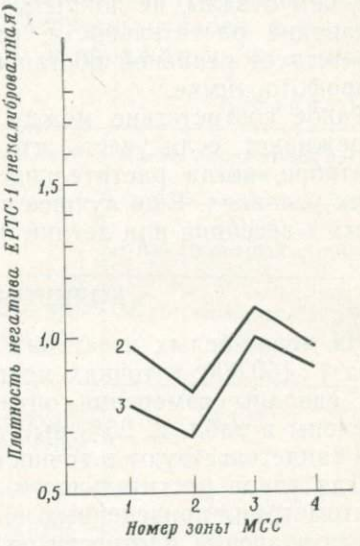
Типы растительности	Индекс отвала	Значение плотности снимка			
		Зона 4[1]	Зона 5	Зона 6	Зона 7
0	5/L/29	1,13±0,02	1,25	1,27	1,03
	3/L/5 (восток)	1,39±0,05	1,51	1,61	1,28
1	3/L/5 (запад)	1,30±0,02	1,38	1,50	1,33
2	6/L/20	0,97±0,01	0,82	1,10	0,97
3	7/L/1	0,78±0,02	0,68	1,01	0,91
4	1/L/40, 41	0,84±0,02	0,84	0,89	0,90
5	1/A/20	0,67±0,02	0,69	0,74	0,69

[1] Средние значения для зоны 4 даны с 95%-ными доверительными интервалами по девяти независимым увеличениям одного 70-мм позитива.

ния было обнаружено, что на отвалах 5/L/29 и 3/L/5 осуществлялось орошение, предшествовавшее съемке со спутника ЕРТС-1. Следовательно, отражательные свойства этих отвалов изменились очень заметно в



Фиг. 1. Зависимость оптической плотности от номера зоны спектра (типы растительности 0, 1, 4 и 5).



Фиг. 2. Зависимость оптической плотности от номера зоны спектра (типы растительности 2 и 3).

результате интенсивного роста растительности. Понятно, что знание таких хозяйственных мероприятий необходимо для интерпретации снимка.

Дальнейший аспект, который требует изучения, — сезонное и суточное изменение спектральных свойств любого взятого отвала. Чем больше снимков ЕРТС-1 будет сделано в различное время года, тем больше вероятность получения «ключа» для оценки состояния растительного покрова на данном горном отвале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что различные отвалы породы могут быть обнаружены и опознаны на снимках ЕРТС. Для конкретных отвалов выявляются их характерные особенности и тип растительного покрова. Наблюдается хорошая взаимосвязь между состоянием растительности некоторых отвалов и данных снимков со спутника ЕРТС-1.

Поэтому на основе первых снимков ЕРТС сделано предварительное заключение, что отвалы могут быть дифференцированы по их растительному покрову. Есть надежда, что будущая съемка со спутника ЕРТС подтвердит приведенную выше точку зрения и появится возможность согласовать все данные по отвалам, за исключением самых маленьких отвалов в Витватерсрандском горнорудном комплексе, на основе типов растительного покрова, принятых в табл. 1. Последующая съемка, показывающая сезонные изменения растительного покрова, должна содействовать программе восстановления и охраны окружающей среды.

КАРТА РАЙОНИРОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ ЙЕЛЛОУСТОНСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА

Ф. Томпсон, Н. Роллер

(Мичиганский институт по изучению окружающей среды, Анн-Арбор)

ВВЕДЕНИЕ

С 1967 г. коллектив Мичиганского института по изучению окружающей среды при участии Геологической службы США (Денвер) изучает на примере Йеллоустонского национального парка проблему использования дистанционных методов районирования земель. В последнее время к ним присоединились сотрудники Национального парка и студенты Университета штата Колорадо.

Данные, полученные посредством мультиспектрального сканатора (МСС), который установлен на спутнике, представляются весьма полезными для классификации основных типов земель Йеллоустонского национального парка. Цель эксперимента заключается в составлении карт классификации земель всего Йеллоустонского национального парка на основе данных мультиспектрального сканатора ЕРТС-1. Эти данные обрабатываются на ЭЦВМ, находящейся в распоряжении Мичиганского института.

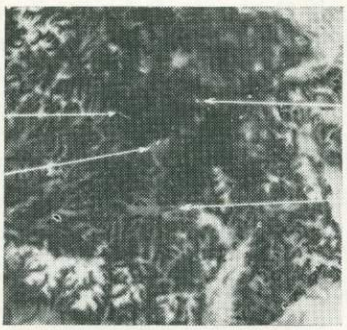
СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наземные исследования Йеллоустонского национального парка проводились в августе и сентябре 1972 г. во время многократного прохождения над парком спутника ЕРТС-1. Большая часть полученных серий данных вполне пригодна для использования, однако группа данных от 6 августа (кадр 1015-17404) по качеству превосходит все остальные, так как над парком полностью отсутствует облачный покров и снимки, сделанные на всех приемных каналах, свободны от помех. Эта группа данных и была выбрана для проведения анализа (фиг. 1).

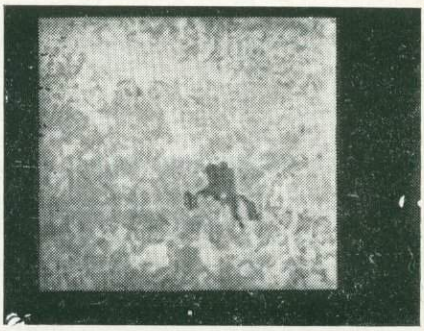
Было выделено пять отчетливых классов земной поверхности: 1) вода, 2) обнаженные горные породы различных типов, 3) участки разнообразного травяного покрова, 4) хвойный лес разной густоты на

различных подпочвенных породах (субстрате), 5) растительный покров низин и болот. Для каждого класса поверхности было выбрано несколько типовых участков. Затем были выявлены и проанализированы основные признаки каждого класса.

Анализ признаков показал возможность числовой дифференциации различных классов. В качестве предварительного шага была составлена карта классификации земель, основанная на пяти категориях. Ее можно рассматривать как основу для составления в будущем более подробной карты. До проведения районирования территории парка был осуществлен анализ данных, состоявший из двух этапов. На первом этапе индивидуальные признаки каждого из пяти классов были обобщены для выявления пяти комплексных «суперпризнаков», обусловлен-



Фиг. 1. Снимок Йеллоустонского национального парка.



Фиг. 2. Карта районирования земель Йеллоустонского национального парка.

ных географическими и компонентными различиями внутри каждого класса. На втором этапе были определены оптимальные каналы получения информации для целей районирования земель. Результаты этого анализа показаны в табл. 1. Средняя вероятность ошибки классифика-

Таблица 1

Средняя вероятность ошибки классификации земель при распознавании пяти категорий

Каналы (зоны)	Средняя вероятность ошибки классификации
2	0,086
2, 4	0,031
2, 4, 3	0,028
2, 4, 3, 1	0,027

ции соответствует проценту площадей, которые на карте районирования распознаны неправильно. Канал 2 (МСС-5) оказался наилучшим одиночным каналом. Комбинация каналов 2, 4, 3 лишь немногим хуже, чем применение в процессе спектральной классификации всех четырех каналов.

В данном эксперименте были использованы все четыре зоны МСС. Карта районирования площадей была получена с помощью компьютера МИИС[1] 7094. При образном воспроизведении карты использовалось

[1] МИИС — Мичиганский институт по изучению окружающей среды. — *Прим. перев.*

следующее цветовое кодирование: голубой цвет — вода; красный — горные породы и грунты; зеленый — различный растительный покров (фиг. 2).

АНАЛИЗ ПРОЦЕДУРЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЯТИ КАТЕГОРИЙ ЗЕМЕЛЬ

В процессе распознавания земель по геоморфологическим признакам и признакам обобщенных растительных ассоциаций было проведено районирование всей местности. Количественной оценки точности распознавания пока не получено, но сравнение наблюдаемых граничных признаков (береговые линии озер, границы распространения строевого леса, границы леса и лугов) с теми же отличительными признаками на топографических картах и аэрофотоснимках показывает их хорошее соответствие.

Легко распознаются водные бассейны, довольно четко различается гидросеть. Отдельные голубые вкрапления на карте, свидетельствующие о существовании ручьев или рек, позволяют отличать водоразделы с растительным покровом от долин. Более точное выявление гидросети может быть достигнуто путем использования каждого цифрового элемента картирования, получаемого при данном разрешении метода, а не каждого второго элемента, как это было сделано в настоящем эксперименте.

Площади с признаками культурной обработки и гидрогеотермальные участки, где доминируют скальные образования, участки обнаженного грунта и большие площади с редким растительным покровом, были отнесены к категории светлых пород и хорошо распознавались. Легко выделить и районы, часто посещаемые людьми, например Тамб-Грант-Виллидж, Фишинг-Бридж и Каньон-Виллидж. Кроме того, полностью оконтуриваются хорошо известные районы термальной активности, включая Верхний и Нижний гейзерные бассейны и бассейн гейзера Норрис. Особенно интересно, что обнаруживаются и гораздо более слабые центры гидрогеотермальной активности — источники Салфер, Вермильон, Пеликан и бассейн Бримстон. Все эти центры, окружающие озеро Йеллоустон, вполне различимы.

Неровные обнаженные склоны хребтов Галлатин, Бэртут и Абсарока соответственно выделяются как светлые горные породы. На меньших высотных отметках хорошо различаются огромные обнажения горных пород в Гранд-Каньоне Йеллоустонского национального парка и в долинах реки Ламар и нижнего течения реки Йеллоустон. В качестве потенциального признака для картирования в будущем следует указать на хорошо распознаваемые песчаные валы, обрамляющие меандры верховья реки Йеллоустон.

Долинные луга и увлажненные участки, характеризующие границы озера и многих долин, также помогают очертить гидросеть и выявить экологическую структуру незалесенных участков местности, когда они контрастируют с участками, покрытыми шалфеем.

Участки местности, покрытые шалфеем, преобладают на верхних склонах долин до границы леса и выше границы распространения леса. Наиболее четко они прослеживаются в верховьях рек Йеллоустон и Ламар, а также на плато Питчстон.

Дальнейшие усилия в области распознавания ландшафта будут направлены на выявление существенных более мелких категорий внутри основных типов земной поверхности. В этом отношении представляется полезным спектральный анализ данных по просекам, ориентированным вдоль участков с растительным покровом на различных вы-

сотных уровнях. Особенно важно научиться распознавать индивидуальную разновидность лесов, различать участки, покрытые хвойным лесом разной густоты, и определять типы леса на разных субстратах.

НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенной работы получены следующие результаты:

1. Точные карты классификации земель Йеллоустонского национального парка, основанные на выделении 5 категорий поверхности, были составлены с помощью обработки на ЭЦВМ данных, полученных мультиспектральным сканирующим устройством (МСС), установленным на спутнике ЕРТС-1 в 1972 г.

2. Были выделены следующие 5 категорий поверхности: обнаженные горные породы и грунты, водные массивы, хвойный лес, участки, покрытые шалфеем, и низменные участки, покрытые травяной растительностью.

3. Существуют все основания полагать, что дальнейший анализ позволит составить более детальные карты внутри выделенных 5 категорий поверхности.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДАННЫХ СПУТНИКА ЕРТС-1 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ И ОЗЕР В ПРЕРИЯХ

Э. Уорк мл.

(Мичиганский институт по изучению окружающей среды, Анн-Арбор)

Д. Гилмер, А. Клетт

(Бюро охоты, рыболовства и охраны рыбных ресурсов в северных прериях, Джеймстаун, Северная Дакота)

ВВЕДЕНИЕ

Перелетные водоплавающие птицы находятся в ведении Бюро охоты, рыболовства и охраны рыбных ресурсов. В Северной Америке основные районы размножения водоплавающих птиц — прерии и парки-заповедники Северных Штатов, а также степные пространства на территориях Канады и Аляски. Число и географическое распределение водоемов и озер в этих районах служат одним из важнейших критериев при определении и учете ежегодного прироста численности водоплавающей птицы. Бюро охоты, рыболовства и охраны рыбных ресурсов, Канадская служба охраны живой природы, а также ученые различных штатов и областей с 1947 г. выпускают ежегодные отчеты, содержащие сведения о районах размножения водоплавающей птицы [1]. Региональные обследования, проводимые в период с мая по июль, осуществляются с учетом природных показателей водной и воздушной среды для получения точных сведений о выведенном потомстве, условиях обитания птиц и их численном приросте. Периодически проводятся также дополнительные обследования заболоченных участков в отдельных районах для выявления длительных экологических изменений, вызванных как природными, так и экономическими причинами.

Канадские и американские биологи, занимающиеся изучением фауны в ее естественном состоянии, предполагают, что можно получить достоверные данные о пропорциональном приросте птиц независимо от их численности на основании подсчета числа водоемов, сохраняющихся до середины июля [2]. Степень обводненности и особенно изменение числа водоемов за период с мая по июль теперь определяются путем аэрофотосъемки намеченных с воздуха участков. Зоологи пришли к выводу, что такие сведения можно получить с большей быстротой и точностью, если использовать локаторы, установленные на самолетах и искусственных спутниках, а также данные автоматических записывающих приборов.

Мичиганским институтом по исследованию проблем охраны окружающей среды был предпринят ряд опытов с использованием данных мультиспектральных сканаторов (МСС), установленных на самолетах, и оценены их возможности при определении сезонных изменений в условиях существования водоплавающих птиц. Мичиганский институт, а также центр по исследованию рыбных ресурсов в северных прериях (Джеймстаун) провели эти исследования на опытном участке площадью около 15 км^2 в Вудуэрт-Стейшн, который расположен в 50 км северо-западнее Джеймстауна. Сопоставление данных по участкам и научная интерпретация биологических данных осуществляются упомянутым Мичиганским институтом.

В настоящее время эти учреждения ведут работу по сбору и анализу данных ЕРТС-1. Проводившиеся ранее исследования показали достоверность изучения водоемов на основе материалов, полученных с помощью мультиспектральных сканаторов, установленных на самолетах [3, 4, 5]. Аналогичные методы применяются в настоящее время и при анализе данных, поступающих со спутника. Первоочередные задачи текущей работы состоят в составлении карт и обобщении статистических данных о водных ресурсах, включая самые малые водоемы, распознаваемые с помощью новой методики, а также в определении изменений степени обводненности почвы в период между весной и летом с помощью материалов ЕРТС-1 МСС-7 (0,8—1,1 мкм). Для интерпретации и корреляции результатов космической съемки используются соответствующие данные сканатора, установленного на самолете, и аэрофотоснимки.

Первый полет спутника над Вудуэртским опытным участком состоялся только в конце июля 1973 г. С этого времени стало возможным использовать данные спутников для определения сезонных изменений на обводняющихся площадях. Мы полагаем, что в результате обобщения материалов, которые будут получены за период с мая по июль 1973 г., появится возможность успешно продолжить работу по определению и оценке сезонных изменений увлажненности площадей.

Материалы, полученные со спутника ЕРТС-1 и с самолета в 1972 г., сопоставлялись между собой для оценки возможностей использования данных ЕРТС МСС при подсчете количества и изучении распределения водоемов и озер в прериях. Установлена возможность успешного картирования водоемов и озер путем одновременного использования снимков, сделанных со спутника и с самолета, и их интерпретации по методике, разработанной для дешифрирования аэрофотоснимков.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предыдущими исследованиями опробованы различные методы картирования водных бассейнов. В число этих методов входят: 1) использование данных многоспектральных каналов в видимом диапазоне

спектра; 2) использование разности температур водной и земной поверхности; 3) разделение излучения на сигнальные уровни, воспринимаемые в единой отражающей инфракрасной зоне.

Разделение на сигнальные уровни — простейший из применяемых методов, так как отражение от воды однозначно и водные поверхности обычно располагаются ниже, чем большинство других видимых объектов. Этот метод требует определения сигнального уровня, отделяющего водные поверхности со слабым излучением от других объектов с более сильным излучением, находящихся в поле зрения. Исследователи применяли этот метод в зоне, близкой к инфракрасной (0,8—2,5 мкм), и получали в общем хорошие результаты, за исключением диапазона 2,0—2,5 мкм, соответствующего атмосферному «окну» в случаях, когда на освещенность территории затрачивалось сравнительно малое количество солнечной энергии.

Применение метода расчленения на уровни начинается с составления черновой карты по цифровым данным компьютера. Получив таким образом графическое изображение местности, на нем выделяют изолированные водные массивы и другие площадные объекты, имеющие низкий уровень отражения. Гистограммы распределения уровней отражения составляются для каждой определенной категории отражения отдельно. Значения отражений обычно стремятся приблизиться к распределению Гаусса, поэтому гистограмму для воды следует смещать относительно гистограмм отражений других объектов. Таким образом, необходимо, основываясь на уровнях отражения, наметить точные границы, отделяющие показатели отражения водной поверхности от всех других видимых объектов.

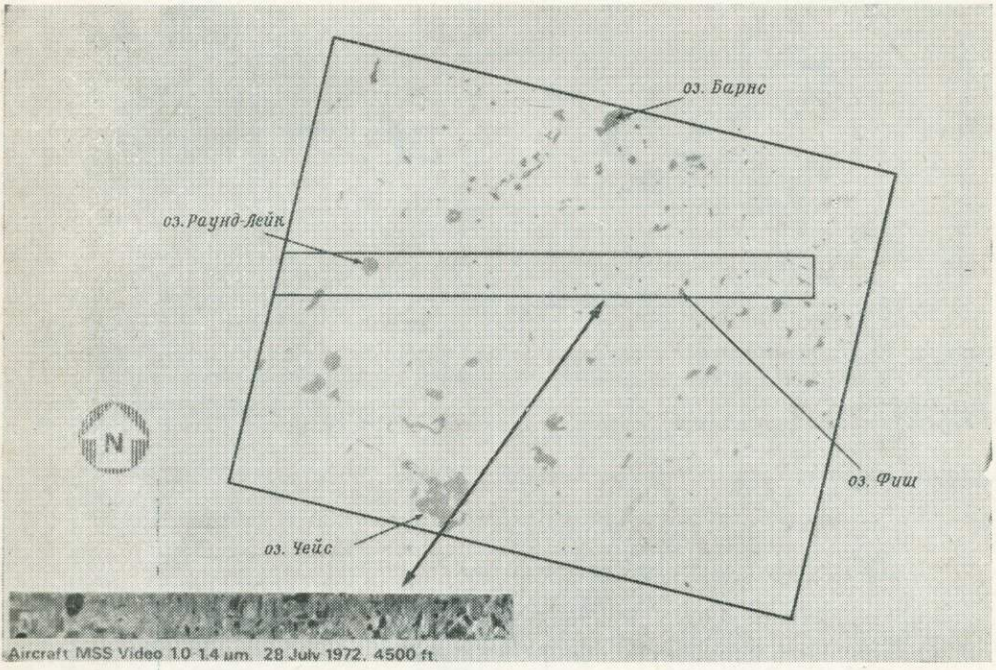
Определив эти границы (или разделив на уровни с помощью компьютера), получают напечатанную в цифровом виде карту водных поверхностей. Такая программа пригодна также для составления различных статистических сводок, но этот аспект в данной статье не рассматривался.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные аэросъемки Мичиганского института (С-47) и спутника были получены соответственно 28 и 31 июля 1972 г. Для дальнейшей обработки был выбран район Вудуэртской станции, расположенной вблизи нижнего края кадра ЕРТС. Площадь, обработанная с целью обнаружения водоемов, включая Вудуэртский опытный участок, составляет приблизительно 10% этого кадра.

Исследуемая территория включает два физико-географических района: холмы Миссури и аккумулятивные равнины восточной и центральной частей Северной Дакоты. Для таких участков характерны беспорядочно разбросанные мелкие водоемы и озерца и редкая гидросеть, типичная для аккумулятивных равнин. В районе холмов Миссури наблюдаются большое количество более глубоких озер и водоемов и разобщенная гидросеть. В обоих районах имеются наилучшие во всей Северной Америке места для размножения водоплавающей птицы. На фиг. 1 показана карта, составленная с помощью компьютера, которая регистрирует водоемы на площади, равной 3% кадра ЕРТС. Здесь же показана полоса (1,0—1,4 мкм), заснятая с самолета и полученная с помощью МСС-видео, т. е. с телеэкрана. Поблизости от центра станции расположено озеро Фиш. Хорошо различимы на карте, составленной по данным ЕРТС, большие степные озера: Раунд-Лейк (диаметр около 1,3 км), Барнс и Чейс. Как правило, на карте зафиксированы водные поверхности, превышающие по площади 2 акра. Каждый цифровой

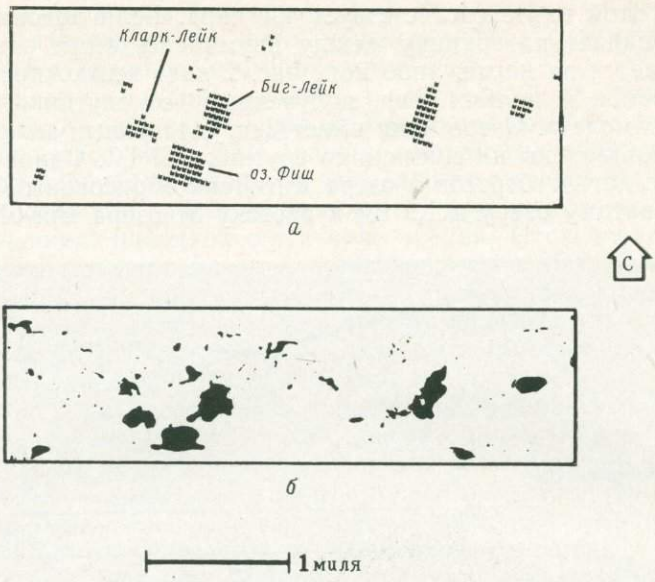
элемент на этой карте соответствует 1,1 акра. Если водоем площадью в 1 акр попадает на границу между двумя соседними отметками, он либо отмечается на карте, либо нет. Фиг. 2 дает возможность сравнить карты водоемов и мелких озер, полученные со спутника, с картами, снятыми с самолета. Озеро Фиш имеет два удлиненных залива, которые точно воспроизведены на снимках со спутника ЕРТС. Однако очертания и некоторые детали берегов и озера Биг-Лейк обрисованы менее точно. К продолговатому озеру в 1,9 км к востоку от озера Биг-Лейк примы-



Фиг. 1. Обзорная цифровая карта водоемов, соответствующая примерно 3% кадра ЕРТС.

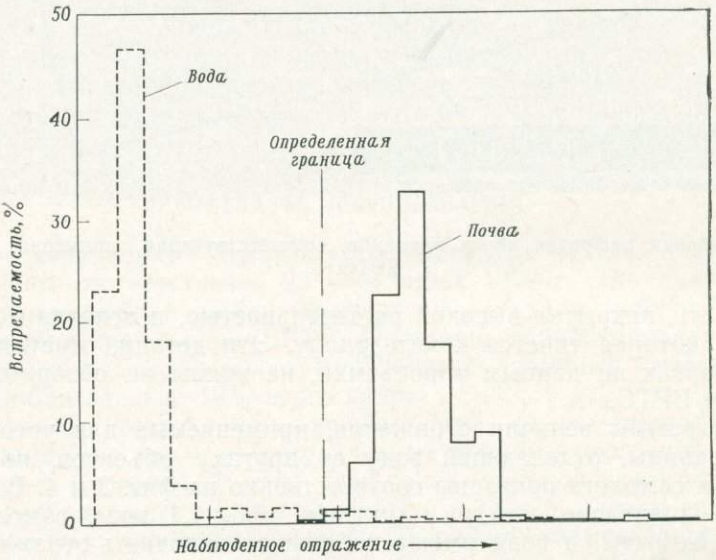
кает область, покрытая высокой растительностью, и цепочка небольших водоемов, которая тянется к юго-западу. Эти детали, отчетливо видимые на картах по данным аэросъемки, не видны на обзорных картах по данным ЕРТС.

Гистограммы величин отражения, применяемые для установления четкой границы, отделяющей воду от других объектов, по данным спутника и самолета показаны соответственно на фиг. 3 и 4. В рассматриваемом диапазоне спектра (спутник 0,8—1,1 мкм, самолет 1,0—1,4 мкм) и почвы, и вода имеют небольшие величины отражения. Однако величины отражения воды меньше, чем почв, так что они могут быть точно отделены одна от другой. Сравнение предварительных карт по данным спутника и аэросъемки с точки зрения сходимости результатов показывает, что границы между водными поверхностями и почвой на обеих картах совпадают достаточно точно. На фиг. 4 приведена гистограмма еще нескольких объектов по данным аэросъемки. В конце июля уровни отражения некоторых типов болотной растительности равны уровню отражения почв. Мелководные водоемы, в которых слой воды не заглушает полностью отражение поверхности дна или подводной растительности, могут дать величины отражения, находящиеся между значениями отражения болотной растительности или почвы и



Фиг. 2. Сравнение фрагмента обзорной карты водоемов и озер в районе Вудуэрта (Северная Дакота) по данным, полученным со спутника и с самолета.

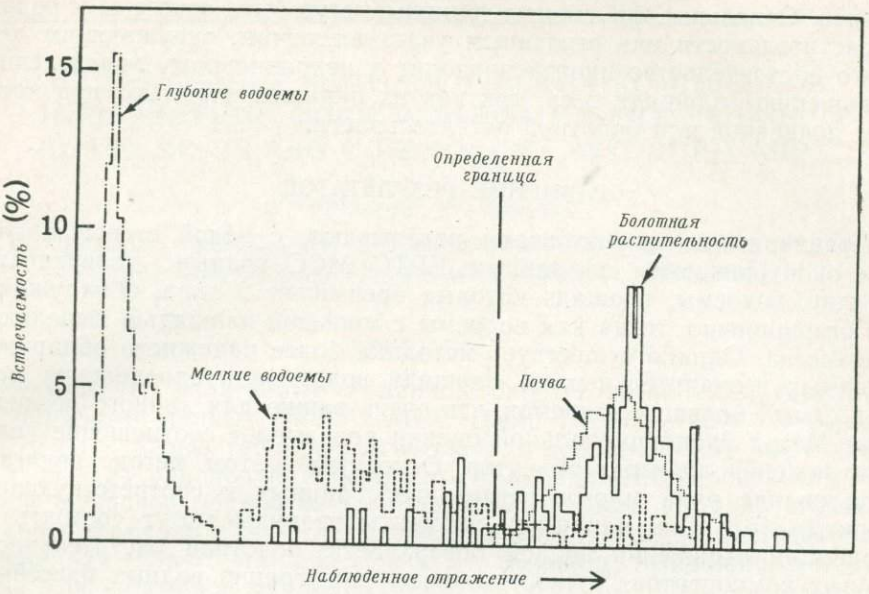
а — водоемы по данным ЕРТС (16 час. 59 мин. по среднегринвичскому времени, 31 июля 1973 г.); *б* — водоемы по данным аэросъемки с высоты 1400 м (13 час. 58 мин. по среднегринвичскому времени, 28 июля 1972 г.).



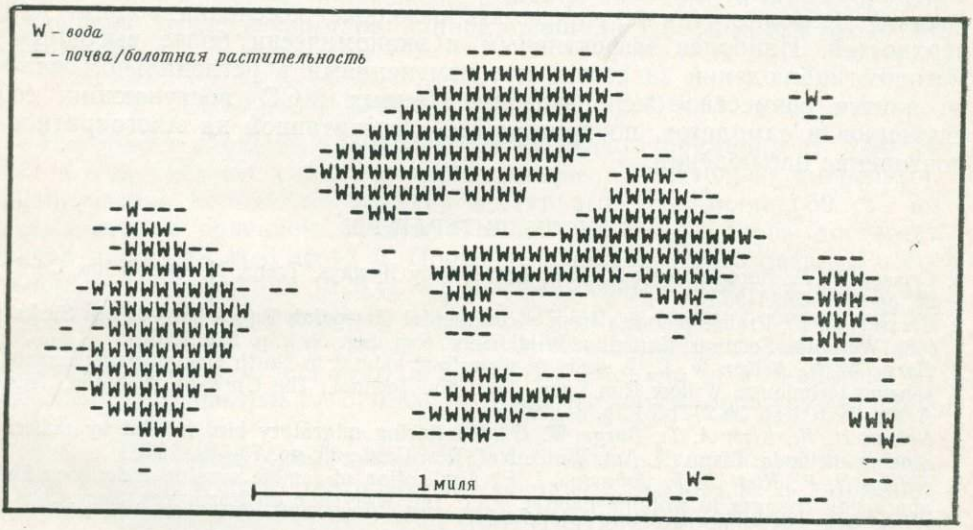
Фиг. 3. Гистограммы величин отражения водоемов и почвы на опытном участке в районе Вудуэрта по данным спутника ЕРТС-1.

Снято в 16 час. 59 мин. по среднегринвичскому времени 31 июля 1972 г.

величинами отражения глубоководных бассейнов. Гистограммы мелководных бассейнов и болотной растительности частично совпадают, так как области мелководья могут рассматриваться как некоторое количество болотной растительности и наоборот. Величины отражения мелководных бассейнов (по данным ЕРТС-1, фиг. 3) близки к величинам отражения почв. Выделение областей мелководья по снимкам, передан-



Фиг. 4. Гистограммы величин отражения на опытном участке в районе Вудуэрта (Северная Дакота) по данным аэросъемки, полученным 28 июля 1972 г. с высоты 1400 м.



Фиг. 5. Пример распределения граничного эффекта на обзорных картах водоемов и озер вблизи Вудуэрта (Северная Дакота) по данным спутника ЕРТС-1, полученным в 16 час. 59 мин., по среднегринвичскому времени 31 июля 1972 г.

ным со спутника, представляет большие трудности из-за малых размеров таких водоемов. Поэтому при анализе данных ЕРТС важно использовать изображения, переданные с самолета.

На фиг. 5 изображен увеличенный участок обзорной карты, составленной по данным ЕРТС. Черточки, отсутствующие на других картах, представляют собой фрагменты границы, соответствующей уровню отражения почв и болотной растительности. Этот граничный эффект особенно отчетливо проступает при рассмотрении результатов съемок со

спутника. Отдельные фрагменты границы могут быть отнесены к болотной растительности или оголенным участкам почвы, окружающим озера. Это обстоятельство иногда приводит к неправильному определению (уменьшению) площади озер, так как их окраины попадают под категорию почвенной или болотной растительности.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предварительные результаты показывают, с какой степенью точности оконтуриваются по данным ЕРТС МСС водные поверхности. Очевидно, водоемы, площадь которых превышает 2 акра, обнаруживаются безошибочно, тогда как водоемы с меньшей площадью выделяются не всегда. Однако существует методика более надежного обнаружения самых незначительных по площади водоемов и определения размеров самых больших водоемов, что очень важно для данного исследования. Метод пропорциональной оценки показывает соотношение величин отражения видимых объектов. Основным в этом методе является использование ряда многоспектральных данных и соответствующего алгоритма [6]. Так, например, элементы границы могут состоять из комбинации отражений водной поверхности, болотной растительности и других компонентов. Точность определения границ водных бассейнов методом пропорциональной оценки значительно выше, чем при использовании метода сигнальных уровней.

Большая точность картирования водоемов (в результате комплексирования метода сигнальных уровней и метода пропорциональной оценки) позволяет также определять сезонные изменения водных поверхностей. Наиболее эффективным и экономически более выгодным методом наблюдений за сезонными изменениями в региональном плане явится совместное использование данных МСС, поступающих со спутников и самолетов, по программе, рассчитанной на многократное повторение наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Crissey W. F.*, Forecasting waterfowl harvests by flyways, Trans. N. Am. Wilds. Conf., 22, pp. 256—268, 1957.
2. *Cressey W. F.*, Prairie potholes from a continental viewpoint, Pages 161—169 in Saskatoon Wetlands Seminar, Canadian Wildl. Serv. Rep. Ser. № 6, p. 262, 1969.
3. *Burge W. G., Brown W. L.*, A study of waterfowl habitat in North Dakota using remote sensing techniques, Willow Run Labs., Inst. Sci. Technol., The Univ. of Michigan, Ann Arbor, Tech. Rep. № 2771-7-F, p. 61, 1971.
4. *Nelson H. K., Klett A. T., Burge W. G.*, Monitoring migratory bird habitat by remote sensing methods, Trans. N. Am. Wildl. Nat. Res. Conf., **35**, pp. 73—84, 1970.
5. *Nelson H. F., Klett A. T., Johnston J. E.*, Application of remote sensing techniques for appraising changes in woldlife habitat, Proc. Int. Workshop on Earth Res. Surv. Syst., II, pp. 263—288, Supt. Doc., U.S.G.P.O., 1971.
6. *Nalepka R. F., Horwitz H. M., Thomson N. S.*, Investigation of multispectral sensing of crops, Willow Run Labs., Inst. Sci. Technol., The Univ. of Michigan, Ann Arbor, Techn. Rep., № 31650-30-T, p. 80, 1971.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ВЫЯВЛЕНИЕ ФОРМ РЕЛЬЕФА НА ЮГО-ЗАПАДЕ ШТАТА КОЛОРАДО С ПОМОЩЬЮ МЕТОДИКИ ADP

У. Мелхорн, С. Синнок

(Лаборатория прикладных дистанционных методов исследования, Университет Пердю, Западный Лафайетт, Индиана)

ВВЕДЕНИЕ

Результаты, излагаемые в данной работе, касаются автоматической обработки данных ERTC-1 MCC (кадр ID 1119-17204, отснятый 19.XI.72 г.) с целью геоморфологического и геологического картирования одного из районов юго-западного Колорадо. Для проведения машинной цифровой обработки снимков ERTC-1 была выбрана площадь размером примерно в 256 км^2, расположенная в краевой части эталонной площади горного массива Сан-Хуан. Площадь, выбранная методом LARS, расположена в районе Дуранго (Колорадо). Первоначально ее выбрали потому, что она была свободна от облачного покрова в момент съемки в противоположность другим частям территории (кадр ID 1029-17195, отснятый 21.VIII.72 г.). Последний анализ был выполнен по сериям снимков, полученным в ноябре без помехи облаков. Сопоставление аэрофотоснимков данной площади со снимками MCC не проводилось.

ОРОГИДРОГРАФИЯ И ГЕОЛОГИЯ РАЙОНА

Изученная площадь располагается на высоте примерно от 2000 до 3000 м над уровнем моря. Климат в районе относительно умеренный. Среднегодовое количество осадков в Дуранго составляет 50 см, но уменьшается с падением высоты. Зимний снежный покров достигает обычно мощности от 3 до 12 м. Почвенный покров и луга развиты в основном не выше уровня 1820 м. Единичные сосны и кусты можжевельника встречаются на высоте от 1800 до 2100 м, а сосны и осины встречаются в изобилии выше отметки 2100 м. В долине реки Анимас произрастают фрукты и зерновые, а на плато Флорида, к юго-востоку от Дуранго, приблизительно с 1900 г. располагаются орошаемые пастбища.

Горы Сан-Хуан, существенно эродированные куполообразные поднятия, находятся на территории юго-западного Колорадо и занимают площадь примерно 26 000 км^2. Они сложены преимущественно вулканогенными породами третичного возраста, но в ядре гор местами обнажаются более древние комплексы пород докембрийского, палеозойского и мезозойского возрастов. Во многих местах в зоне литологического контакта мезозойские породы встречаются в виде наклонных пачек слоев, погружающихся в соседние впадины и образующих серии выраженных в рельефе линейных поднятий и низин, или «гребневидных» водоразделов и долин, расположенных по простиранию пластов. В течение плейстоцена здесь произошла смена климатических условий, способствовавшая образованию крупных долинных ледников. Эти ледники наступали и отступали в течение короткого интервала по крайней мере три раза. Поэтому геоморфологическая история этого изрезанного горами и долинами района очень сложна. Региональная эрозионная по-

верхность (позднетретичного возраста) во многих местах перекрывается валунными глинами и перемытым гравием различной мощности. Исследуемый район в недавнем геологическом прошлом испытывал неоднократное постепенное воздымание, поэтому во многих местах ледниковые отложения и связанные с ними породы неустойчивы, и на современных склонах наблюдаются крупные оползни, грязевые потоки и горные обвалы, которые обычны для всего района Сан-Хуан.

Наиболее полные сведения по геоморфологии и геологии района приводятся в работах Атвуда и Матера [1] и Матера [2].

Расположенные по простиранию пород долины и гребневидные хребты, развитые на твердых, прочных песчаниках и слабых глинистых сланцах, наблюдаются особенно отчетливо восточнее Дуранго. Склоны, образованные песчаниками, погружаются на юго-восток под углом около 20°. Таким образом, некоторые продольные долины на северо-западном склоне гребневидных хребтов во время прохождения спутника ERTC-1 в солнечное время всегда находятся в тени. В исследуемом регионе развиты многочисленные цокольные и пойменные террасы, сложенные ледниково-аллювиальными отложениями. Наиболее типичные примеры таких террас наблюдаются на плато Флорида и в долинах рек Флорида и Анимас. Ледниково-аллювиальные отложения обычно характеризуются высокими отражательными свойствами и легко регистрируются принимающей аппаратурой.

Водоразделы в районе Дуранго сложены песчаниками континентального происхождения, включающими пласты угля довольно высокого качества (теплотворная способность 3500 ккал). Добыча угля производится здесь спорадически, но Запп [3] оценивает разведанные до глубины 900 м запасы битуминозного угля в 38 млн. т, а общие запасы в 1670 млн. т (при коэффициенте извлечения 65%).

Основные стратиграфические и геоморфологические соотношения комплексов горных пород на изученной территории приведены в табл. 1.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Как было сказано выше, цель продолжающихся исследований — использование метода автоматического распознавания образов LARSYS для уточнения уже существующих геологических карт и для составления геоморфологических карт. Для того чтобы картировать геологические объекты любыми дистанционными методами, необходимо допустить следующее:

1. Геологические объекты, проявляющиеся на поверхности, относятся к классам с различными спектральными характеристиками. Литологические разности (песчаники, сланцы и т. п.), которые отражают падающий солнечный свет в дистанционный приемник, часто маскируются тонким покровом почвы, растительностью, водой и результатами деятельности человека. Исходя из того, что литологические поля картируются на основе спектральных данных, полученных дистанционными методами, следует допустить, что многие спектрально различимые особенности поверхности связаны именно с различием в литологии.

2. Литологические типы разделяются по своему составу и текстуре на ограниченное число дискретных категорий, которые машиной или человеком могут быть определены и классифицированы методами распознавания образов. Такое допущение условно, но оно помогает группировать сходные литологические разновидности в классы. Промежуточные разновидности, которые по спектральным характеристикам попадают между двумя произвольно выбранными и принятыми классами,

Таблица 1

Сводная литолого-стратиграфическая колонка с элементами топографии района Дуранго, Колорадо

Геологический возраст	Формация (индекс на карте)	Мощность, м	Литология и геоморфология (топография подстилающих пород)
Четвертичный	— — — — (Qal)	— — —	Отложения нижних террас, валунные глины и наносы вдоль рек Анимас и Флорида
	— — — — (Qg)	— — —	Галечники верхней террасы и предгорной равнины, особенно на плато Флорида
Верхний мел	Угловое несогласие Формация Анимас (Ka) Формация Мак-Дермот (Kmd)	75—120	Переслаивание брекчии андезитов, вулканогенных конгломератов, псаммитовых туфов и глинистых сланцев от красно-бурых до пурпурных. Отложения формации Мак-Дермот слагают хребты
	Сланцы Кертланд (Kk)	360±	Переслаивание зеленоватых сланцев, песчанистых сланцев, песчаников; тонкие прослои известковых сланцев и углей, особенно в пачке песчаников Фермингтон в средней части толщи
	Формация Фрутланд (Kf)	90—150	Континентальные хлоритовые песчаники, сланцы и угольные пласты мощностью до 12 м
	Песчаники Пикчередт-Клиффс (Kpc)	60—90	Светло-серые морские песчаники, образующие обрывы, переслаивающиеся с темно-серыми сланцами
	Сланцы Льюис (Kl)	420—540	Темно-серые до черных известковые, бентонитовые морские сланцы. Слагают широкие долины
	Группа Меса-Верде: Песчаники Клифф-Хауз (Kch)	90—105	Серые морские песчаники, образуют как крутые, так и пологие склоны, переслаивающиеся с известковыми аргиллитами и алевритовыми сланцами
	Группа Меса-Верде: Формация Минифи (Kmf)	90—105	Косослоистые серые и коричневые песчаники, слагающие хребты и уступы рельефа, с прослоями коричнево-черных сланцев и битуминозными пачками углей мощностью 1,2—2,7 м
	Группа Меса-Верде: Песчаники Пойнт-Лукаут (Kpl)	120±	Массивные темно-желтые песчаники, образующие уступы; в нижней части переслаивание песчаников и сланцев
	Сланцы Манкос (Km)	570—660	Темно-серые до черных морские сланцы, образующие долины; песчанистые сланцы и линзы известняков (аналоги (?) формаций Гринхорн и Ниобрара)

Продолжение

Геологический возраст	Формация (индекс на карте)	Мощность, м	Литология и геоморфология (топография подстилающих пород)
Верхний мел	Песчаники Дакота (Kd)	60±	Твердые коричневые песчаники, образующие большие уступы близ Дуранго; переслаивание известковистых черных сланцев, линз угля и конгломератов из песчаников в основании толщи
Верхняя юра	Угловое несогласие ~~ Формация Моррисон (Jm)	300±	Пестроцветные бентонитовые сланцы, аргиллиты и песчаники, образующие как склоны, так и обрывы в районе Дуранго

следует относить к одному из этих классов. Пространственное распределение этих неопределенно классифицируемых разновидностей отражает их естественный литологический состав (так, например, площадь развития песчанистых сланцев, может быть классифицирована как случайное распределение структурных элементов из двух дискретных классов: песчаников и сланцев).

Рассматриваемые классы. На основании данных Заппа [3] было решено разделить литологические разновидности пород района Дуранго на три отдельных типа: песчаники, сланцы и аллювиальные отложения. Песчаники — коренные горные породы, обнажаются на крутых склонах глубоко расчлененных хребтов; сланцы развиты на пологих склонах и вдоль продольных долин; аллювий — отложение террас и пойм. Этих трех вещественных типов как единиц классификации достаточно для того, чтобы охарактеризовать геологическое строение всех эрозионных и аккумулятивных поверхностей изучаемой территории. Поскольку ЕРТС-1 пересекает район Дуранго в 10 час. 30 мин., обращенные на запад пологие склоны и все другие склоны западной экспозиции на снимках ЕРТС-1 затенены. Затененные участки отличаются по своим спектральным свойствам от освещенных солнцем площадей, они рассматриваются как четвертый класс.

Чтобы получить полигон со значениями параметров интересующих нас классов, необходимо произвести графическое сопоставление на дисплее параметров всех участков исследуемой площади. Только серия снимков, полученная посредством ЕРТС-1 21 августа, пригодна для изучения эталонного участка Сан-Хуан. Четыре площади в пределах изучаемого района были выбраны для проведения неконтролируемой классификации (NSCLAS) и последующей обработки на ЭВМ. Параметры этих участков были определены по шкале плотности телевизионного изображения (EDIT) для всего кадра ERTS-1. На четырех выбранных участках встречаются разновидности всех типов горных пород и геоморфологических образований, характерных для изучаемого района. Результирующая NSCLAS обеспечивает надежное визуальное разделение образов затененных и аллювиальных площадей. Геоморфологическая интерпретация затененных площадей позволяет выделить с большей вероятностью крутые склоны, сложенные песчаниками, и долины, сложенные сланцами. Значения параметров были получены для участков, сложенных песчаниками, сланцами, аллювиальными отложениями, и для затененных площадей. Эталонные поля склонов, сложенных песчаниками, и долин, сложенных сланцами, были выделены в от-

дельные подклассы внутри главных литологических классов. Девять групп эталонных участков: четыре — песчаников, три — сланцев, одна — аллювия и одна — затененных площадей — были использованы для эталонной классификации LARSYS с помощью кластер-алгоритма (CLASS).

Таким образом, была классифицирована вся территория целиком. Результирующая карта, выведенная на дисплей, показала более высокое визуальное расчленение участков, сложенных песчаниками и сланцами, чем такое же разделение, полученное методом NSCLAS, по которому были подобраны поля, используемые как эталоны. Достоверность выделения эталонного класса в пределах полигона составляет 63,7%. Однако эти результаты нас недостаточно удовлетворили. Путем уточнения границ эталонных участков, добавления двух подклассов аллювия, одного подкласса сланцев и двух подклассов затененных площадей значительно улучшилась визуальная корреляция дисплей-карты с геологической картой Заппа, что хорошо видно на примере данных по эталонному классу (89,8%). Эта схема классификации на основе четырнадцати подклассов определяет степень точности анализа, который производится в настоящее время.

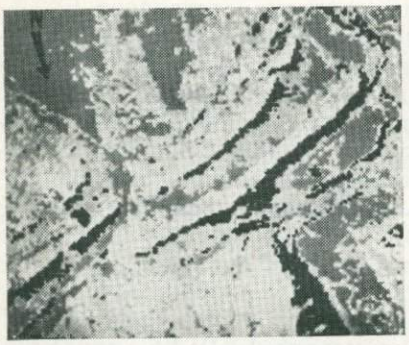
РЕЗУЛЬТАТЫ

Установившаяся практика применения метода LARSYS, пригодного для визуальной демонстрации распознаваемых объектов, включает использование: 1) фотографии телевизионного изображения, закодированного в цвете или по шкале оптической плотности, и 2) печатного изображения, выведенного на дисплей и закодированного цифрами или буквами. Для визуального представления результатов классификации, полученных из эксперимента в районе Дуранго, были выбраны оба метода демонстрации. Фотографические изображения изучаемого района приведены на фиг. 1 и 2.

Физико-географическая карта-схема, показывающая четыре главных класса, изображена на фиг. 1. Выделенным классам, от самых темных к самым светлым, соответствуют последовательно: затененные площади, аллювий, сланцы и песчаники. Три самых светлых класса представляют площади при солнечном освещении, они выводятся на дисплей в виде малоконтрастных оптических плотностей. Самая темная группа, тень, представляется в виде высококонтрастных черных площадей. Демонстрация этих четырех классов на дисплее создает для наблюдателя иллюзию третьего измерения, хорошо знакомую тем, кто работал с вертикальными или слабоперспективными изображениями, полученными посредством дистанционных методов. Этот эффект, следовательно, позволяет почувствовать рельеф изучаемого участка путем избирательного фокусирования на контрастах оптической плотности изображения. Эти контрасты отражают топографические вариации, которые являются поверхностными проявлениями глубинных литологических разновидностей. Для дисплея также пригодно цветное кодирование фотографий, которое имитирует полутоновую топографическую карту (метод USGS).

Геологическая карта района Дуранго, полученная с помощью компьютера, представлена на фиг. 2. На ней показано четыре основных класса, в то время как по геологическим материалам выделяется только три. На основании имеющихся представлений о формах выражения коренных пород в рельефе местности было сделано предположение, что на затененных площадях развиты сланцы. Затененные участки соответствуют пологим склонам, которые располагаются на водоразделах

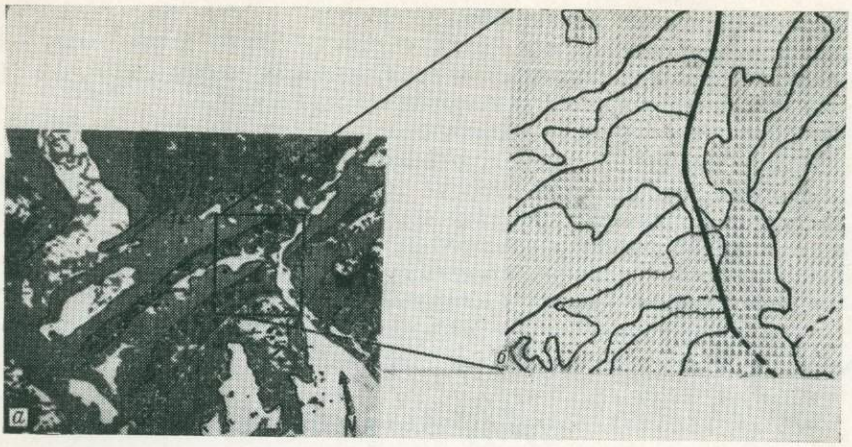
стратиграфически ниже кепрока, сложенного песчаниками. Для района глубоко расчлененных хребтов и продольных долин, развитых на песчаниках и сланцах, можно с уверенностью утверждать, что участки поверхности, расположенные ниже кепрока, соответствуют сланцам. Исходя из этого предположения, мы объединяем сланцы и затененные площади в единый дисплей-класс. Полученная в результате эксперимента карта, закодированная по шкале оптической плотности (фиг. 2, *а*), визуально хорошо соответствует карте Заппа для той же территории. В деталях (фиг. 2, *б*) эти две карты в некоторой степени расходятся. На основе очень ограниченной достоверной геологической информации, не использованной на карте Заппа, мы пришли к выводу, что карта, составленная с помощью компьютера, более достоверна, чем существующая геологическая карта.



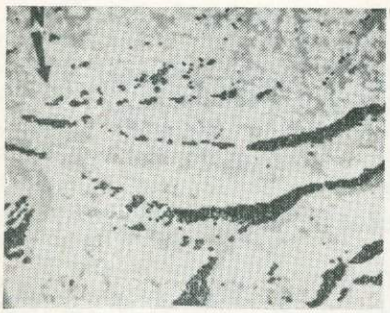
Фиг. 1. Геоморфологическая карта района Дуранго (Колорадо), полученная с помощью компьютера.
Масштаб ≈ 1:150 000.

Такой вывод обоснован двумя фактами. Во-первых, на составленной машинным способом карте видно, что литологические контакты чередующихся песчаников и сланцев северо-восточного простирания круто смещаются в том месте, где река Флорида пересекает хребет. Причина этого явления заключается в смещении пород вдоль тектонического разлома. Породы восточного крыла смещены к югу. На карте Заппа в этом районе разлом не показан, но в ослабленной зоне, например в зоне разлома, обязательно возникают благоприятные условия для пересечения хребтов, сложенных прочными породами, рекой (в данном случае Флоридой). Следует подчеркнуть, что этот разлом выявлен скорее по стратиграфическим данным методом автоматического распознавания образцов (LARSYS), чем на основе визуального выделения линеамента по неклассифицированному черно-белому или цветному изображению. Во-вторых, наблюдается очень высокая корреляция между картой, полученной с помощью ЭЦВМ, и картой остаточного рельефа [1]. Атвуд показывает остатки третичной эрозионной поверхности, которые наблюдаются к востоку от Дуранго, на погружающемся склоне, сложенном песчаниками формации Пикчеред-Клифф. Границы останца этого «древнего пенеплена» удивительно похожи на контур распространения пород формации Пикчеред-Клифф, который очерчен с помощью компьютера. Эти два довода, первый из которых основан на геологическом заключении, второй — на корреляции с предварительно закартированной территорией, указывают на высокую степень точности метода и пригодность экспериментальной карты для геологических исследований.

Для того чтобы определить применимость такой оценки классификации к региональным площадям, была произведена классификация участка площадью в 500 км^2 с центром, расположенным в 56 км к северо-востоку от Дуранго, на основе тех же статистических расчетов, которые были получены по эталонному экспериментальному полигону, расположенному в 2—5 милях восточнее Дуранго. Эта новая эталонная площадь была выбрана по следующим причинам: 1) литологический состав пород, слагающих эту площадь, подобен составу пород на ранее изученной площади; 2) высоты над уровнем моря и, вероятно, зависящий от них растительный покров, достаточно разнообразны и



Фиг. 2. Геологические карты района Дуранго, полученные с помощью ЭЦВМ.
Черные жирные линии, показывающие местоположение литологических контактов, нанесены на фотографии от руки.
а — фотоизображение, закодированное по шкале оптической плотности. Белое соответствует аллювию, серое — сланцам, черное — песчаникам. Масштаб 1 : 150 000; *б* — буквенно-цифровое изображение, выведенное на дисплей: *А* — аллювий, косые штрихи — сланцы; точки — песчаники. Изображение уменьшено путем фотографирования оригинала. Масштаб ≈ 1:24 000.



Фиг. 3. Геоморфологическая карта второго полигона, расположенного в 30 милях к востоку от исследуемого района Дуранго.
Масштаб ≈ 1:150 000.



Фиг. 4. Геологическая карта второго полигона.

3) угол отражения солнечных лучей на сильно расчлененных хребтах различен. Изображения этой площади, выведенные на дисплей, представлены на фиг. 3 и 4. Физико-географическая и геологическая карты контрольного района имеют геологический смысл, но в нашем распоряжении нет подтверждения полученных результатов наземной проверкой. Очевидно, любое заключение о достоверности и точности карт, построенных с помощью компьютера, должно быть обосновано полевыми геологическими исследованиями и аэрофотосъемкой полигона.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

По нашему мнению, описанный экспериментальный метод может иметь интересное применение для усовершенствования и расширения возможностей геологического картирования. Степень усовершенствования зависит от характера местности, площадного распределения форм рельефа и целевого назначения карты. Кроме того, возможно:

1) многократное использование одного и того же метода классификации для составления дополняющих друг друга типов карт (например, геоморфологическая и геологическая карты), которые могут быть получены из тех же статистических данных;

2) построение карт различного масштаба, от 1 : 24 000 до 1 : 1 000 000, полученных методом LARSYS на дисплее;

3) достижение высокой степени точности при составлении карт;

4) применение статистических данных, полученных на «типовых разрезах» ограниченного протяжения, в региональных масштабах;

5) компактное хранение данных в виде магнитных лент: например, статистические данные изучения района Дуранго, необходимые для демонстрации карт, представленных в данном докладе, занимают примерно 4,5-метровый отрезок магнитной ленты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Atwood W. W., Mather K. F.*, Physiography and Quaternary geology of the San Juan Mountains, Colorado, U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 166, p. 176, 1932.
2. *Mather K. F.*, Geomorphology of the San Juan mountains, New Mexico Geol. Soc. Guidebook, 8th Field Conf., Southwestern San Juan Mountains, Colorado, pp. 102—108, 1957.
3. *Zapp A. D.*, Geology and coal resources of the Surango area, La Plata and Montezuma counties, Colorado, U. S. Geol. Survey, Oil and Gas Invest. Preliminary Map 109, 1949.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ ЕРТС С ПОМОЩЬЮ ЭЦВМ

С. Рифман

(Группа системы TRW, Редондо-Бич, Калифорния)

ВВЕДЕНИЕ

Получение точных снимков ЕРТС требует применения способов коррекции пространственных искажений сводных снимков, а также фотометрической коррекции плотности путем использования данных калиброванного датчика. При выполнении соответствующей коррекции снимков необходимо учесть ряд источников ошибок, свойственных двум типам приемных систем, находящимся на борту ЕРТС: трем возвратно-лучевым видиконам (RBV) и мультиспектральному сканатору (MCC). Необходимо также компенсировать ошибки (внешние по отношению к приемным устройствам), связанные с положением космического корабля в пространстве, точностью расчета эфемерид и кривизной земной поверхности.

Проблема получения точно откорректированных снимков включает в себя, во-первых, моделирование источников ошибок, которые должны быть компенсированы, и развитие технических приемов усовершенствования коррекции; во-вторых, применение алгоритма цифровой обработки, пригодного для получения откорректированных изображений. В этом сообщении особое значение придается второй проблеме (из-за удобства и точности манипуляций с изображением в цифровой форме) и лишь частично рассматриваются некоторые технические приемы и решения, связанные с получением откорректированных снимков.

Хорошо известные преимущества методов цифровой обработки (в отношении точности и стабильности) сами по себе приводят к задаче

получения точных цифровых изображений, которые уже используются в настоящее время и более широко будут использоваться в будущем (например, для сопоставления изображений методом дискриминантного анализа). Прогресс развития электронно-вычислительных цифровых систем [2] в последнее время связан с прогрессом алгоритмизации, который дал возможность широко использовать цифровую обработку изображений при умеренных затратах машинного времени. Приводимый ниже анализ источников ошибок, примеры улучшения качества снимков ЕРТС-1 МСС путем только цифровой обработки по системе TRW представлены здесь вместе с информацией о соответствующих достоинствах различных алгоритмов, используемых для получения снимка. Рассмотрено также использование этих алгоритмов для обработки изображений с помощью миникомпьютера.

ИСТОЧНИКИ ОШИБОК МСС

Потребители точно откорректированных снимков ЕРТС обычно требуют, чтобы снимки были выполнены в прямоугольной системе координат, т. е. чтобы линейное расстояние на земной поверхности было верно представлено на снимке, свободном от ошибок, возникающих как внутри точности приемных систем, так и от положения космического корабля в пространстве, точности расчета эфемерид скорости вращения и от кривизны земной поверхности.

На фиг. 1 показана схема приемного устройства[1], установленного на борту ЕРТС-1 [1]. Четырехканальный (0,5+1,1) приемник сканирует дорожками (каждая из 6 линий) полосу зеленой поверхности шириной 185 км посредством колеблющегося плоского зеркала, которое позволяет получить изображение одновременно для всех четырех зон спектра. При этом регистрируются значения интенсивности света непосредственно для каждой зоны. Мгновенное поле зрения одного приемного элемента равно примерно 79 м^2 земной поверхности при номинальной высоте спутника.

Каждый сводный снимок МСС состоит из 2340 отдельных линий (сканируемых группами по шесть линий одновременно), получаемых примерно за 28,6 с, составляющих время записи. Время сканирования обратного хода зеркала составляет примерно 73,42 мс (на 6 линий сканирования), а интервал между импульсами составляет 9,95 мкс, так что расстояние между центрами соответствующих импульсов смежных участков, расположенных вдоль линии сканирования, составляет примерно 57 м (около 30% перекрытия смежных участков).

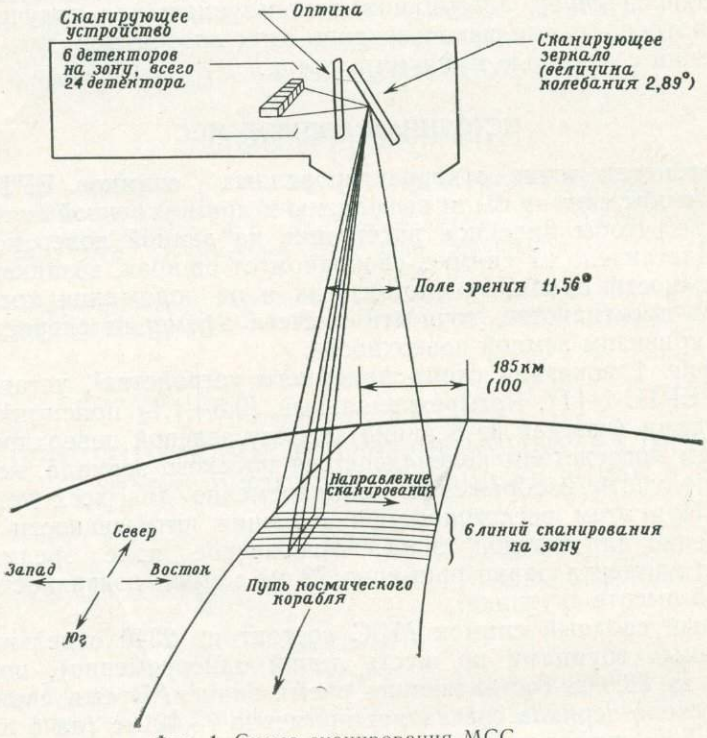
Можно показать, как в разной степени сказывается на пространственном искажении сводного снимка ряд ошибок, в основе которых лежат следующие причины: (1) нелинейность сканирования, вариации начального времени сканирования, повторяемость и т. д.; (2) изменения пространственного положения космического корабля за время записи; (3) изменение высоты космического корабля за время съемки; (4) кривизна земной поверхности как функция географической широты; (5) вращение Земли как функция географической широты.

Ошибки, связанные с приемным устройством, составляют ±26 м [1] и таким образом могут не приниматься во внимание. Данные об

[1] Из-за раннего прекращения сбора данных с помощью системы ЕРТС-1 RBV в данной работе не рассматриваются источники ошибок и алгоритмы коррекции для таких приемников. Однако замечено, что многие алгоритмы, разработанные для приемников МСС, подобны алгоритмам для приемников RBV, поэтому они были включены в математическое обеспечение системы RBV.

изменении длины линий сканирования корректируются с целью компенсации влияния незначительных вариаций числа элементов сводного снимка на сканирующую группу. Используя соответствующий алгоритм обработки, эти ошибки можно откорректировать. Такой алгоритм преобразования описан ниже.

Изменения в положении корабля за время сканирования вызывают непараллельность дорожек (каждая дорожка состоит из 6 линий) относительно друг друга. Этот эффект проявляется в нелинейности искажения масштаба на сводном снимке. Кривизна земной поверхности вы-



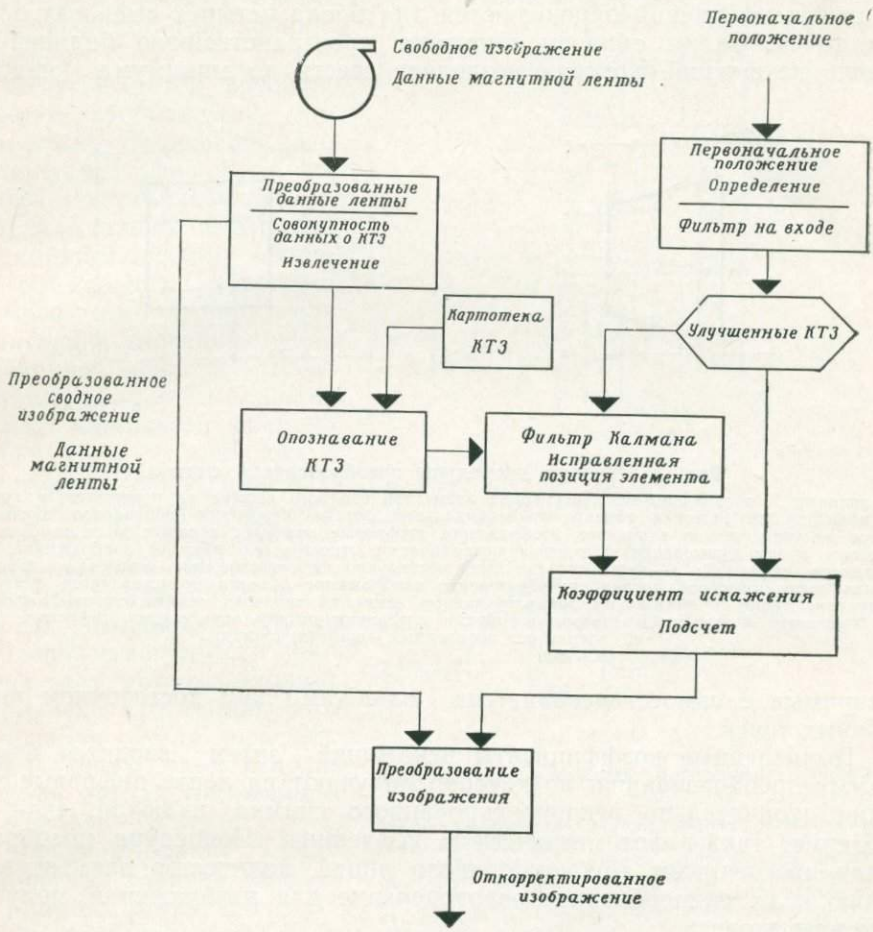
Фиг. 1. Схема сканирования МСС.

зывает искажение масштаба в направлении сканирования. Наконец, вращение Земли создает угловое искажение около 3° (на широте 35—40°), особенно в направлении сканирования. Основными источниками ошибок служат земное вращение и несоответствие числа линий сканирования (стандарт — 2340 линий) и числа элементов в сканирующей группе (3230) для площади съемки 185 км^2.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА СНИМКОВ

Улучшение качества снимков МСС по комплексу программ, разработанных недавно группой TRW, заключается в коррекции ошибок, вызванных источниками (2)—(5), путем использования данных специальных программ, записанных на лентах BIAT или DIAT. Также производится коррекция очевидных ошибок, ошибок на разницу между центрами кадров (0° положения сканирующего зеркала) из-за изменения высоты космического корабля. В изображение были включены контрольные точки на земной поверхности (КТЗ), используемые для коррекции геометрических искажений снимка. Эти точки принадлежат

объектам, хорошо опознаваемым на снимках; их параметры тщательно промерены. Однако из-за задержки с получением требуемых сведений (данные о сводном снимке, записанные на ленту, данные программ и сами сводные изображения) оказалось невозможным включить эти уточнения в первоначальную группу обработанных снимков. Была про-



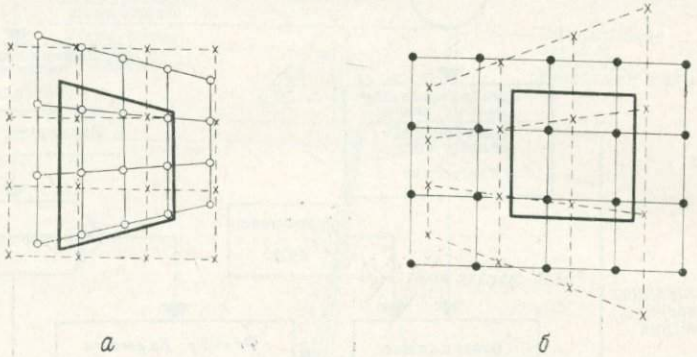
Фиг. 2. Блок-схема математического обеспечения процедуры точной коррекции.

верена возможность использования данных КТЗ на других объектах, для которых не были подготовлены программы.

Математическое обеспечение, разработанное для такой коррекции снимков ЕРТС-1, показано на функциональной блок-диаграмме процесса (фиг. 2). Информация о сводном снимке преобразуется таким образом, чтобы получить единую ленту с раздельными рядами, включающими данные по каждой зоне спектра. Затем выделяют и исследуют окружающие КТЗ области, называемые «соседями», и точно определяют на снимке участки КТЗ путем использования картотеки КТЗ. Данные о местоположении КТЗ реализуются фильтром Калмана для уточнения параметров положения космического корабля.

Используя данные об уточненном положении космического корабля, вычисляют коэффициенты искажений, которые в совокупности позволяют преобразить сводный снимок и получить откорректированное

изображение, выраженное в линейных координатах — м/м. Подсчет этих коэффициентов выполняется при картировании небольшого числа участков изображений, называемых опорными точками, в окончательной системе координат м/м с учетом ошибок сканирования и ошибок, связанных с изменением положения космического корабля за время записи, кривизной земной поверхности и вращением Земли. Затем коэффициенты искажений определяются для блока четырех смежных опорных точек. Таким образом получают пространственную билинейную модель искажений, которая позволяет свести до минимума ошибки,



Фиг. 3. Принцип процедуры преобразования снимка.

а — знаками X обозначено местоположение элементов сводного снимка по отношению к которому показано изображение объекта трапецеидальной формы. Кружками обозначено закартированное местоположение элементов изображения, цифровые значения которых должны быть определены путем применения алгоритма интерполяции относительно величин изображения, обозначенного знаком X; *б* — черными точками обозначено местоположение элементов сводного снимка после цифровой коррекции; улучшенное изображение объекта представляется истинным квадратом. Знаки X обозначают закартированные элементы сводного снимка, который вводится для коррекции путем использования алгоритма интерполяции для определения цифровых значений элементов, показанных черными точками.

сравнимые с самосогласованными ошибками при достаточном числе опорных точек.

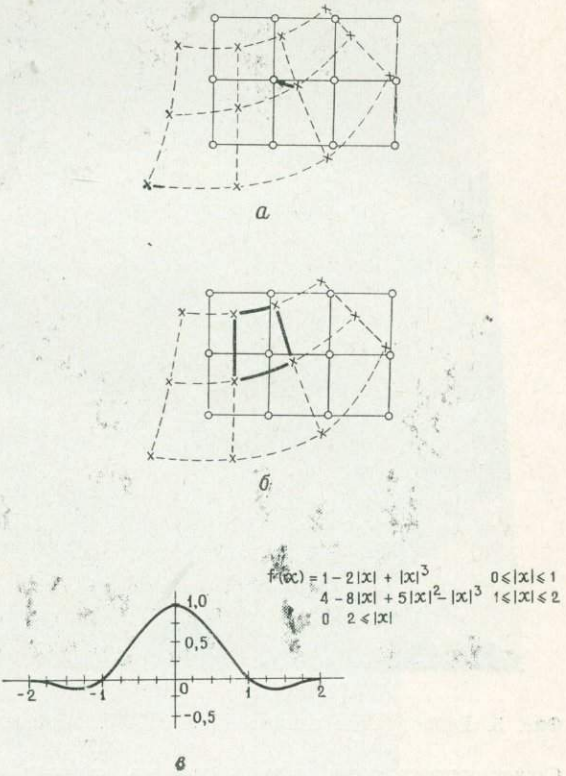
Вычисленные коэффициенты искажений затем вводятся в программу преобразования, по которой получают на ленте цифровые значения окончательно откорректированного снимка, включая, если необходимо, также фотометрическую коррекцию. Процедура преобразования обеспечивает требуемое число линий, количество элементов на линию и их единообразное распределение для изображения, полученного на выходе.

Чтобы лучше понять процедуру преобразования снимка, обратимся к фиг. 3. Существенно обобщенное изображение (множество X) на фиг. 3, *а* трансформируется путем использования алгоритма геометрической коррекции, показанной на схеме фиг. 2, до координатной системы откорректированного изображения, показанного жирными точками на фиг. 3, *б*. Далее определяются новые значения в позициях, показанных жирными точками, в соответствии с заданным объемом позиций X. Это и есть процедура интерполяции.

Существует несколько методов интерполяции. Одни обеспечивают регулярное расстояние между линиями и элементами откорректированного изображения, получаемого на выходе, другие дают откорректированное изображение с неравномерным распределением линий и элементов. Простейший способ заключается в выборе «ближайшего соседа», как показано на фиг. 4, *а*. При таком подходе параметры элемента (иногда называемого узлом решетки) в неправильной решетке корректируемого изображения и параметры ближайшего элемента используются для оценки положения элементов в изображении с регулярной

решеткой. Ясно, что значения интенсивности, полученные при такой интерполяции, соответствуют действительным значениям с точностью порядка $\pm 1/2$ шага нормальной решетки. Однако требования к точности вычислений при этом методе относительно низкие, так как для определения величин преобразования позиции требуются данные только для одной точки. Такие результаты можно получить в относительно короткое машинное время.

Другой метод преобразования изображений, называемый билинейной интерполяцией (фиг. 4, *б*), использует двухлинейную комбинацию данных по четырем ближайшим узлам неправильной решетки корректируемого изображения для вычисления значений преобразования позиции точки. Этот метод требует больших затрат машинного времени для расчета и приводит к некоторому понижению разрешения получаемого изображения, обусловленному сглаживающей природой билинейной интерполяции. С другой стороны, в случае большой изменчивости контуров этот метод позволяет устранить нестабильность положения узла решетки, возникающую при использовании метода «ближайшего соседа».



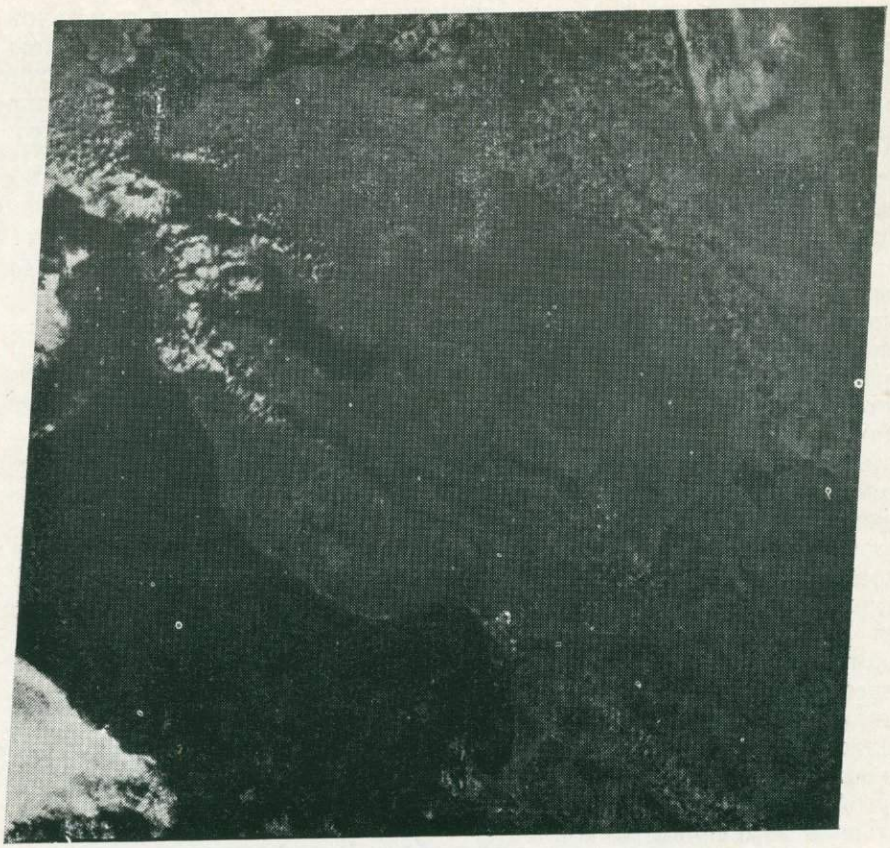
Фиг. 4. Три возможных алгоритма преобразования.

Кружками показано местоположение элементов откорректированного снимка, полученного на выходе. Знаками X обозначены элементы неправильной решетки (в откорректированном изображении), полученные путем прямой коррекции искажений введенного сводного снимка. Кружок со стрелкой обозначает типичный элемент, параметры которого определяются путем интерполяции.

Преобразование типа кубической свертки является приближением к идеальному преобразованию типа $\sin x/x$. Если изображение (снимок) характеризуется ограниченной зоной в области пространственных частот, то восстановление дискретных данных имеет форму

$$I(x_i) = \Sigma I(x_K) f(x_i - x_K),$$

где $f(x)$ имеет форму $\sin x/x$, а I есть функция преобразования. В случае совпадения кубического полинома с f (при соблюдении условий непрерывности, ограниченности и т. д.) эта функция является единственной в своем роде. Такая функция показана на фиг. 4, *в* для значений $x=2$. Здесь для преобразования данных по одной точке используется 16 параметров. Поскольку метод свертки более всего соответствует идеальному алгоритму преобразования, ожидается, что будут получены наиболее удовлетворительные результаты относительно разрешающей способности и точности преобразования по сравнению с методами «ближайшего соседа» или билинейной интерполяции. Иными словами, наклон и величина свойств непрерывности при кубической свертке превос-



Фиг. 5. Репродукция снимка 1057-18172-7, представляющего часть отпечатка сводного снимка.

Снимок откорректирован относительно числа элементов на линии и числа линий, а также относительно угла вращения Земли (скос снимка).

ходят алгоритмы билинейной интерполяции и интерполяции по «ближайшему соседу» благодаря более обобщенной природе данных, используемых для определения преобразованного местоположения точки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первые результаты процесса исправления изображения, описанные выше, были получены для снимка 1057-18712-7 (заливы Сан-Франциско и Монтерей) на основе применения алгоритма преобразования по методу «ближайшего соседа» и билинейной интерполяции. Алгоритм свертки был разработан еще до эксперимента и затем уточнен в соответствии с задачами ЕРТС. Однако снимки ЕРТС были обработаны с помощью этого алгоритма слишком поздно, чтобы эти данные можно было включить в настоящую работу.

На фиг. 5 показано исходное изображение, репродуцированное со сводного снимка в виде транспаранта, который был получен в НАСА. Необходимо отметить, что на этом снимке откорректированы ошибки несоответствия числа линий и элементов на линию в изображении, а также ошибки за счет вращения Земли. Фиг. 6 показывает де-



Фиг. 6. Реконструкция полосы сводного снимка.

Фрагмент взят из верхнего левого угла фиг. 5 и показывает залив Сан-Пабло в центре верхней части и часть залива Сан-Франциско, расположенную в центре изображения, справа частично скрытую облачностью.

таль верхнего левого угла изображения[1], реконструированную[2] по данным магнитной ленты о сводном необработанном снимке, представленном НАСА. Изображенный район имеет площадь 45×120 км.

[1] Ввиду того что настоящая работа касается проблемы улучшения геометрии снимков, контрастность фотографий слегка усилена так, чтобы детали снимков стали более ясными.

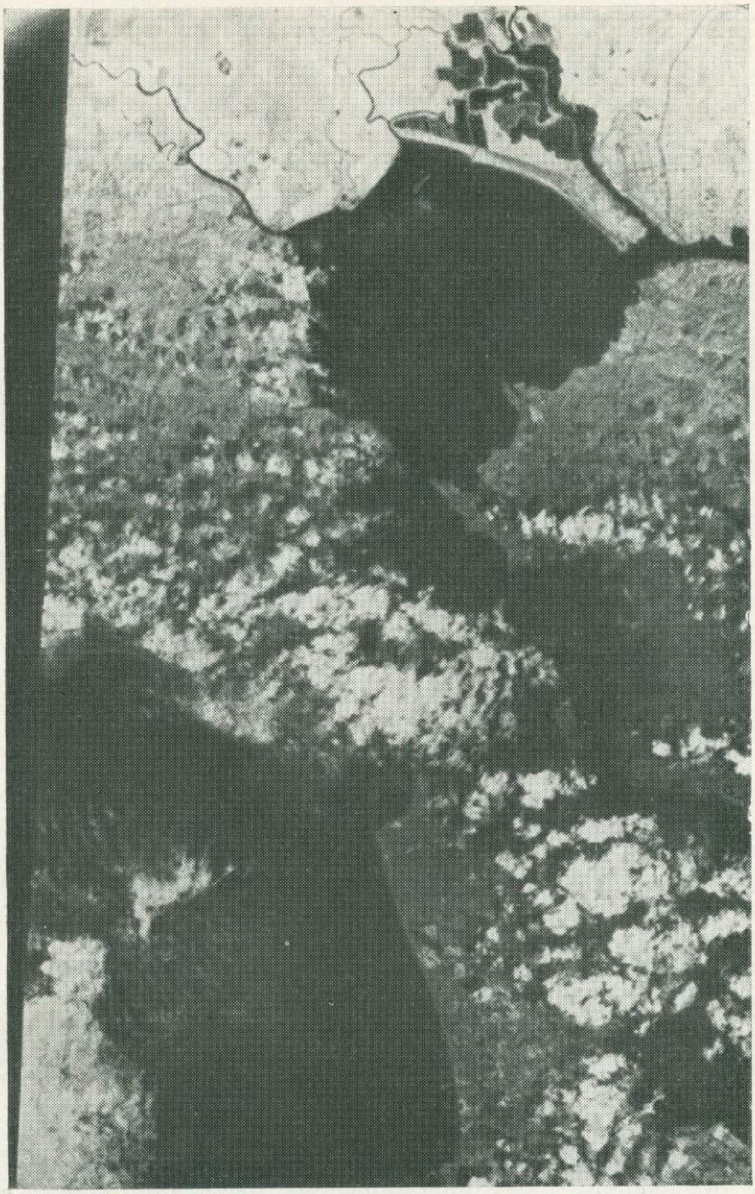
[2] Реконструированные снимки были получены в лаборатории обработки снимков отдела ракетной техники с откорректированных данных магнитной ленты непосредственно фотографически на фототелеграфном аппарате, обладающем высоким разрешением. Светлый участок в левом верхнем углу снимка является результатом процесса реконструкции, а не коррекции цифровых данных снимка.



Фиг. 7. Реконструкция части снимка, помещенного на фиг. 6, после исправления путем интерполяции до «ближайшего соседа».

Следует обратить внимание на один элемент офсета на левом краю улучшенного снимка.

На фиг. 7 приводится улучшенное путем использования алгоритма «ближайшего соседа» изображение части снимка фиг. 6. Площадь размером 46,25×73,9 км выровнена параллельно курсу корабля. Обратите внимание на приращение элементов к линиям сканирования, наблюдаемое по левому краю снимка. Оно связано с последовательным увеличением числа элементов в результате интерполяции до «ближайшего соседа». Тщательное изучение снимка обнаруживает большое число площадей, для которых характерно отклонение положения элементов снимка, особенно очевидное для таких контрастных участков, как граница



Фиг. 8. Реконструкция части снимка, помещенного на фиг. 6, после улучшения снимка по способу билинейной интерполяции.

Заметен более гладкий вид левого края улучшенного снимка по сравнению с фиг. 7.

воды и суши. В частности, обратите внимание на полосу Сан-Антонио-Крик, начинающуюся от запад-северо-западного угла залива Сан-Пабло, расположенного вверху средней части фиг. 7 (залив Сан-Франциско находится в нижней правой части снимка, но он скрыт облачностью).

На фиг. 8 показана та же картина, что и на фиг. 7, но для преобразования использован алгоритм билинейной интерполяции вместо алгоритма интерполяции до «ближайшего соседа». Обратите внимание на более контрастную прямую линию на левом краю снимка по срав-

нению с фиг. 7, а также на то, что полоса Сан-Антонио-Крик значительно лучше по качеству изображения. С другой стороны, при сравнении с фиг. 7 заметно незначительное ухудшение разрешения в рисунке комплекса дорог (включая межевой знак 80) к северу от пролива Каркинес, восточнее острова Маре и реки Напа. Предполагается, что это ухудшение разрешения связывается со сглаживающим эффектом билинейной интерполяции при отсутствии интерполяции до «ближайшего соседа».

Здесь следует подчеркнуть, что для улучшения снимков, вводимых в компьютер в цифровой форме, используют весь арсенал вычислительных методов. В противоположность этому сводный снимок, переданный нам Отделом обработки данных НАСА (фиг. 5), получен путем обращения цифровых данных в аналоговые и затем считан с помощью электронно-лучевого самописца и записан на выходе в виде фильма.

Полезно обратить внимание на затраты времени, требуемые для процедуры улучшения снимка. Снимки, показанные на фиг. 7 и 8, получены посредством машины CDC 6400. Время, необходимое для обработки снимка, исключая операцию обращения, составляет менее 10 с. Время преобразования путем билинейной интерполяции, включая обработку данных КТЗ, составляет приблизительно 52 с из времени CPU для 10^6 элементов. Кубическая свертка требует приблизительно 110 с. Если использовать миникомпьютер PDP-11/45, то кубическая свертка потребует около 60 с, а билинейная интерполяция — 28 с из времени CPU на 10^6(элементов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены первые результаты исследований по улучшению качества снимков ERTC с помощью цифровой обработки. Для получения точно откорректированного снимка применены два алгоритма интерполяции. Показано, что в результате процедуры преобразования появляются незначительные ошибки (менее 60 м) при условии умеренных требований CPU. Интерполяция по методу «ближайший сосед» дает отклонения $\pm 1/2$ ячейки (по горизонтали и вертикали) и наиболее приемлема для снимков высокой контрастности. С другой стороны, билинейная интерполяция позволяет сгладить отдельные элементы офсета, но по стоимости несколько превышает время CPU и дает некоторое ухудшение разрешающей характеристики изображения. Ожидается, что кубическая свертка, использованная в алгоритме преобразования снимков, будет сочетать лучшие свойства алгоритма «ближайший сосед» и билинейной интерполяции при незначительных добавлениях к требованиям CPU, превышающих требования, предъявленные к билинейной интерполяции. Можно полагать, что алгоритмы преобразования снимков с целью улучшения их качества достигли в общем того уровня, который позволит обработать все снимки ERTC путем использования только этих цифровых методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Earth Resources Technology Satellite Data Users Handbook, General Electric Document № 71SD4249 (Sept. 15, 1971; Revised Nov. 17, 1972).
2. *Nagy G.*, Digital Image-Processing Activities in Remote Sensing for Earch Resources, Proc. IEEE, **60**, pp. 1177—1200, Oct. 1972.

МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СОЛНЕЧНЫМ И АТМОСФЕРНЫМ ВЛИЯНИЕМ, НА СНИМКАХ ЕРТС

Р. Роджерс, К. Пикок

(Отдел разработки аэрокосмических систем Бендикс, Анн-Арбор, Мичиган)

ВВЕДЕНИЕ

Чтобы вывести абсолютные коэффициенты отражения объектов, при сравнительном анализе данных ЕРТС, необходимы измерения атмосферных параметров и понимание характера их влияния на эти данные. Эксперимент ЕРТС-1 PR303 предназначен для опробования методов определения и уменьшения солнечного и атмосферного влияний, которые понижают точность радиометрического воспроизведения данных ЕРТС. В статье описана методика использования аппаратуры по измерению интенсивности излучения (RPMI) для определения величины лучеиспускания объекта H, коэффициента прозрачности атмосферы для единицы воздушной массы τ и излучения неба, наблюдаемого в зоне спутника $L_{атм}$. Исследуются методы определения этих параметров и их применение к данным ЕРТС для выведения коэффициента отражения объекта.

Общее излучение L, регистрируемое ЕРТС с отражающего объекта ρ, находится с этими параметрами в следующем соотношении:

$$L = \frac{\rho H \tau}{\pi} + L_{атм} \tag{1}$$

для космического корабля, сориентированного вертикально.

Коэффициент отражения объекта H состоит из следующих элементов:

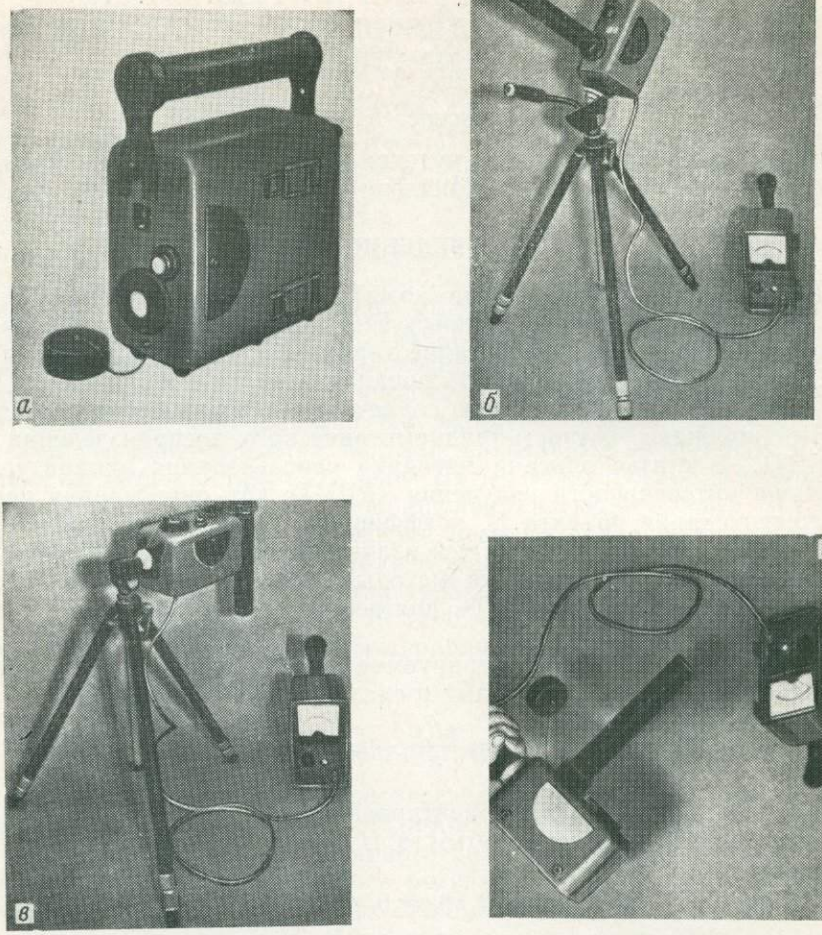
$$H = H_0 \tau^m \cos\theta + H_{неба}, \tag{2}$$

где H_0 — солнечное излучение вне атмосферы; m — воздушная масса атмосферы, выраженная величиной воздушной массы в зените; θ — угол солнечного зенита и $H_{неба}$ — излучение неба. Чтобы получить спектральные коэффициенты отражения объекта по данным ЕРТС, исследователю земных ресурсов необходимо знать величины H, τ и $L_{атм}$.

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ (RPMI)

Аппаратура RPMI, разработанная специально для этого эксперимента и показанная на фиг. 1, позволяет получить радиометрические измерения, необходимые для определения солнечных и атмосферных параметров, оказывающих влияние на измерение излучения со спутника ЕРТС.

RPMI — компактный аппарат в жестком кожухе, точно прокалиброванный для измерений рассеянного и отраженного излучений в любой полосе мультиспектрального сканирующего устройства. Установленная на аппарате трубчатая раздвижная ручка позволяет быстро производить изменение режима работы прибора от широкоугольных измерений общего излучения до направленных (6,0°) измерений излучения неба и наземных объектов. Эти измерения позволяют определять коэффициенты отражения исследуемого участка поверхности, а также вычислять дополнительные параметры, такие, как лучепропускание



Фиг. 1. Прибор для измерения интенсивности света.

а — RPMI в собранном виде. *б* — *общее излучение (H)* — поле зрения 2π·ср для измерения вертикально падающего излучения в спектральных зонах МСС. Нивелир помогает производить такое измерение. *Излучение атмосферы* ($H_{\text{неба}}$) — затемнение солнца для измерения общего излучения без солнечного компонента для каждой зоны МСС. Измеряется и угол между зенитом и солнцем, путем считывания показаний отражения солнца на солнечном диске. *в* — излучение в узких телесных углах неба. Ручка служит в качестве бленды, что обеспечивает прямое измерение в поле зрения 6°. Таким же образом прибор используется для измерения прямого лученспускания.

г — отраженное излучение. Прибор используется с небольшими калибровочными панелями для получения непосредственного измерения величины излучения опытного объекта. Коэффициент отражения выводится из отношения отраженного излучения и общего излучения.

между космическим аппаратом и землей и побочное излучение (побочное отражение).

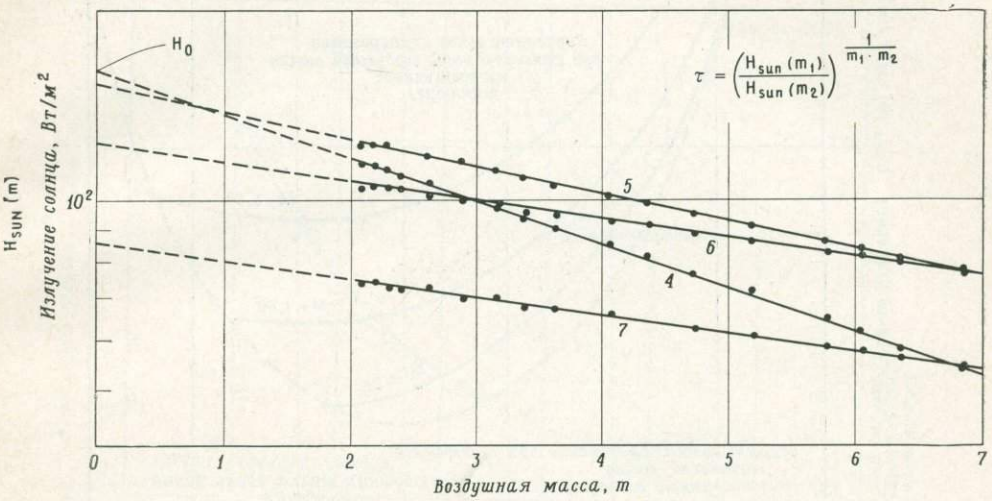
Двенадцать режимов работы (масштабов измерений) прибора обеспечивают измерение общего излучения в пределах от 0,001 до 300 Вт/м^2 и направленного излучения от 0,1 до $3 \cdot 10^4$ Вт/(ср·м^2). Абсолютная калибровка прибора составляет 5%, относительная калибровка от зоны к зоне — 2,0%.

ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Как показано на фиг. 1, RPMI используется в сочетании с ЕРТС для проведения прямых измерений в четырех зонах мультиспектрального сканирующего устройства (МСС). Прибор измеряет: 1) общее

излучение H; 2) излучение атмосферы $H_{\text{неба}}$ (путем затемнения солнца и считывания общего излучения минус прямое солнечное излучение; 3) излучение неба в узком телесном угле $L_{\text{изм}}$ (ϕ) и 4) прямое солнечное излучение $H_{\text{солнца}}$ (m). На основе этих параметров определяются коэффициент лучепропускания τ и побочное излучение $L_{\text{атм}}$, а затем вычисляется коэффициент отражения объекта ρ с помощью уравнений (1) и (2) для каждой спектральной зоны.

Общее излучение H измеряется, как показано на фиг. 1, непосредственно в каждой зоне. Повышенную точность H можно получить путем измерения прямого солнечного излучения $H_{\text{солнца}}$ (m) и излучения неба



Фиг. 2. Графики атмосферного поглощения.

$H_{\text{неба}}$ (затемненное солнце) в отдельности и вычисления общего излучения по формуле

$$H = H_{\text{солнца}}(m)\cos\theta + H_{\text{неба}}. \qquad (3)$$

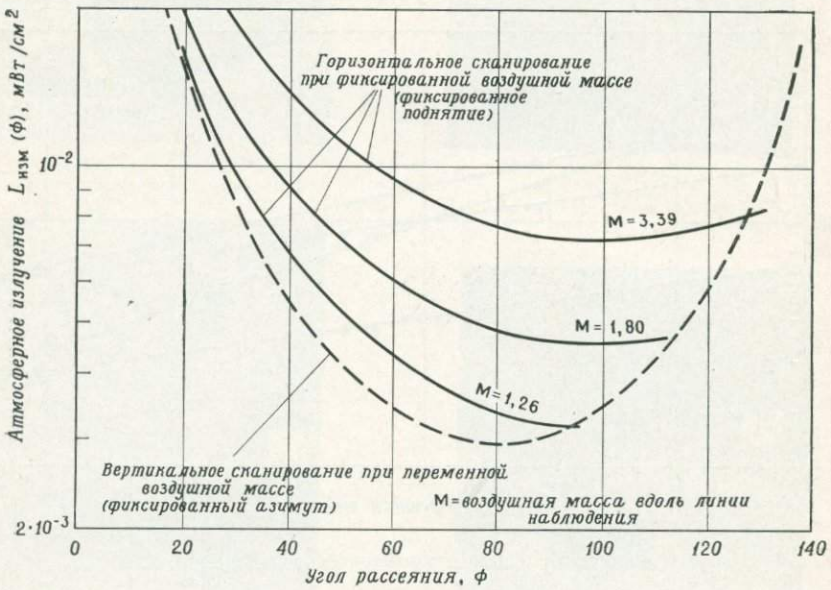
Угол восхождения солнца считывается с боковой шкалы RPMI после нивелирования прибора.

Коэффициент прозрачности τ определяется путем вычерчивания кривой «затухания», как показано на фиг. 2. Величина прямого солнечного излучения наносится на логарифмическую шкалу как функция от воздушной массы. Точки на кривых дают по вертикальной оси величину солнечного излучения H_0 за пределами атмосферы в каждой зоне мультиспектрального сканирующего устройства. Коэффициент прозрачности вычисляется по кривым с помощью уравнения на фиг. 2. Измерение H_0 можно использовать для повторной калибровки прибора без применения дополнительных устройств в любой точке земного шара.

Если величина H_0 известна из прошлых измерений, то τ высчитывается по точечному измерению $H_{\text{солнца}}$ (m). Можно внести поправку на различные высотные углы солнца и космического аппарата. Расчеты коэффициента прозрачности предполагают, что атмосферное состояние на траектории от солнца к объекту такое же, как и на траектории от объекта к спутнику. В настоящее время проводятся эксперименты для определения точности метода точечных измерений.

Побочное излучение $L_{\text{атм}}$, регистрируемое на космическом аппарате, возникает вследствие аэрозольного рассеяния атмосферы и рассеяния Релея. Так как величину нельзя измерить непосредственно, она

выводится из наземных измерений обратного рассеяния. Простейшим методом является измерение излучения неба $L_{изм}$ (ϕ), рассеянного под углом ϕ (как на фиг. 3Б), если ϕ равен ϕ' — углу, под которым излучение рассеивается по направлению к космическому аппарату. Затем производится коррекция полученных величин на различие воздушных масс между направлением наблюдения и направлением к космическому аппарату. Так как этот метод применим только при $\phi > 45°$, проводится атмосферное моделирование для расчета (экстраполяции) нужного угла из возможных углов измерения.



Фиг. 3А. Измерение атмосферы в четвертой спектральной зоне.

На фиг. 3А даны величины измерений излучения атмосферы как функции от угла рассеяния ϕ и воздушной массы. Каждая из сплошных линий была получена путем нацеливания RPMI на солнце и последующего поворота прибора по азимуту. Измерения производились при интервалах поворота 20° при определенном угле возвышения. Пунктирная линия была получена путем измерения показаний при различных углах возвышения солнца для нулевого азимута. Угол рассеяния ϕ находится из уравнения

$$\cos\phi = \sin\theta \sin\beta \cos\alpha + \cos\theta \cos\beta, \qquad (4)$$

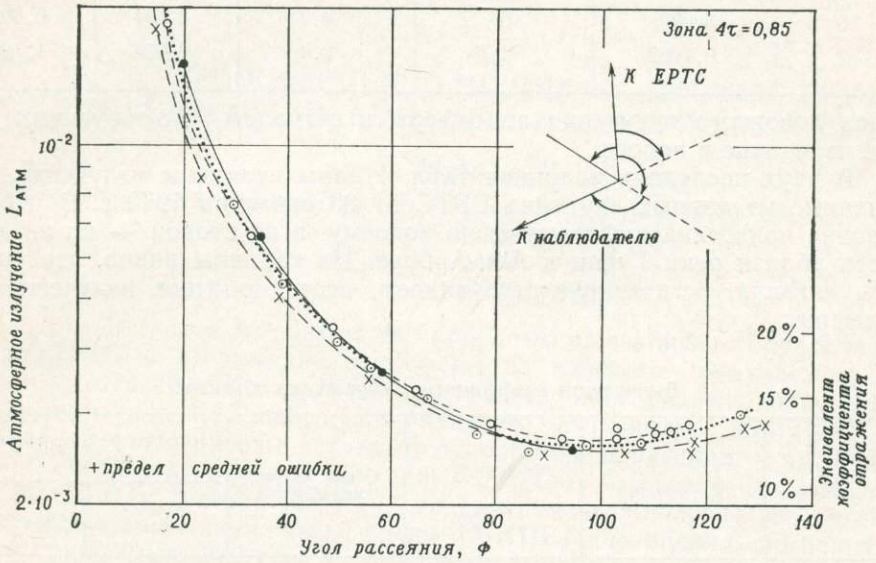
где θ — угол солнечного зенита, β — угол зенита наблюдения и α — азимутальный угол от солнца. На фиг. 3А приведены величины воздушных масс по направлению наблюдения. Величина воздушной массы непрерывно изменяется вдоль пунктирной кривой.

Атмосферное рассеяние вдоль линии наблюдения должно быть пропорционально $(1-\tau^m)$, где τ — пропускание атмосферы для единицы воздушной массы, а τ^m — прозрачность воздушных масс m. Таким образом, если измерение излучения $L_{изм}$ проводится под углом рассеяния, равным углу рассеяния вблизи ЕРТС, побочное излучение, регистрируемое ЕРТС, выводится из уравнения

$$L_{атм} = L_{изм}\left[\frac{1-\tau}{1-\tau^m}\right] \qquad (5)$$

в предположении, что линия наблюдения проходит вертикально через однородную воздушную массу. Это уравнение использовалось Дантли, Эджертоном и др.

Справедливость этой формулы была проверена путем умножения данных на фиг. 3А на величину τ из уравнения (5), полученную на кривой затухания. Результаты показаны на фиг. 3Б. Отклонение величины излучения под любым углом составляет $\pm 5\%$ и находится в пределах погрешностей измерения. Эти данные можно использовать для выведе-



Фиг. 3Б. Данные рассеяния, скорректированные для воздушной массы.

ния атмосферного излучения, наблюдаемого со спутника ЕРТС, путем определения нужного угла рассеяния. Это исследование продолжается, чтобы определить повторяемость кривых и точность величины $L_{атм}$ при измерениях только под одним или двумя углами.

ПРИМЕР КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ ЕРТС

С момента завершения измерений RPMI местные погодные условия не позволяли производить исследования атмосферы во время прохождения спутника ЕРТС. Таким образом, настоящее сравнение атмосферных данных от 12 февраля 1973 г. с данными ЕРТС от 28 сентября 1972 г. демонстрирует лишь величину коррекций и не претендует на точность анализа.

Величины побочного излучения атмосферы ЕРТС были выведены из данных, полученных над Бендиксом в Анн-Арборе, Мичиган, 12 февраля 1973 г. С помощью операций, описанных выше, величины измерений излучения неба RPMI $L_{изм}$ были скорректированы для единицы воздушной массы, и эти скорректированные значения для каждой из четырех зон МСС нанесены на график как функции угла рассеяния. На табл. 1 показаны величины $L_{атм}$, высчитанные для зон 4—7, при угле рассеяния по направлению к ЕРТС 131° (угол солнечного зенита 49°). Эти величины были преобразованы в битовые эквиваленты, основанные на 7-битном уровне для зон 4, 5 и 6 и 6-битном уровне для зоны 7. В таблице также показано процентное отношение сиг-

Таблица 1

Интенсивность излучения атмосферы

Зона	$L_{атм}$, (мВт/(ср·см²)	Эквивалент, биты	% общей величины	Данные ЕРТС, мВт/(ср·см²)	
				водоем Бартона	берег реки
4	0,274	14	11	0,476	0,508
5	0,118	7,5	5,9	0,242	0,276
6	0,082	6	4,7	0,141	0,402
7	0,1062	1,5	2,4	0,234	1,10

налов побочного излучения атмосферы к сигналам, фиксирующим общее излучение в полосе.

В двух последних колонках табл. 1 даны величины излучения, полученные из данных спутника ЕРТС от 28 сентября 1972 г. В первой колонке приведена информация по водоему, а во второй — по низменности вблизи реки Гурон в Анн-Арборе. Из таблицы видно, что более 50% сигнала, регистрирующего водоем, несет побочное излучение атмосферы.

Таблица 2

Вычисление коэффициента отражения объектов

Зона	H_0, мВт/см²	τ	Общее излучение, мВт/см²	Коэффициент отражения объекта, %	
				водоем Бартона	берег реки
4	15,05	0,81	8,41	9,3	10,8
5	13,98	0,863	8,14	5,5	7,5
6	12,00	0,909	7,38	2,8	15
7	8,57	0,913	5,02	0,9	6,8

В табл. 2 суммируются дополнительные данные, необходимые для определения коэффициента отражения объекта. Величины H_0 и τ выведены из кривой затухания способом, описанным в разделе 3, по данным от 12 февраля 1973 г. Общее излучение H выводится из уравнения (2) с помощью величины, полученной для излучения неба $H_{неба}$. Затем эти данные были использованы для выведения коэффициента отражения объекта из уравнения (1). Полученные результаты теперь являются абсолютными величинами, свободными от погрешностей, вносимых солнечным и атмосферным излучениями. Примеры регистрации двух различных объектов — небольшого озера и низменного берега реки — приведены в табл. 2.

ВЫВОДЫ

Солнечные и атмосферные параметры намного ухудшают качество радиометрического воспроизведения данных, полученных со спутника ЕРТС. Без прямого измерения атмосферного лучепропускания, рассеяния объекта и атмосферного излучения невозможно определение абсолютной величины излучения объекта. Предварительные результаты показывают, что RPMI представляет простой и дешевый способ необходи-

мой радиометрической коррекции данных ЕРТС для обеспечения их точной однозначной интерпретации. Эксперимент ЕРТС-1 определит наилучший способ использования RPMI для получения необходимых солнечных и атмосферных параметров и дает возможность использовать результаты измерений RPMI в качестве стандарта для оценки альтернативных методов коррекции. Существует надежда, что результаты этого исследования помогут НАСА найти и соединить наиболее эффективные методы и приборы для обеспечения радиометрической коррекции данных ЕРТС, собираемых по всей планете.

АТМОСФЕРНЫЕ ВЛИЯНИЯ НА ДАННЫЕ ЕРТС-1 И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

У. Малила, Р. Налепка

(Мичиганский институт по изучению окружающей среды, Анн-Арбор, Мичиган)

ВВЕДЕНИЕ

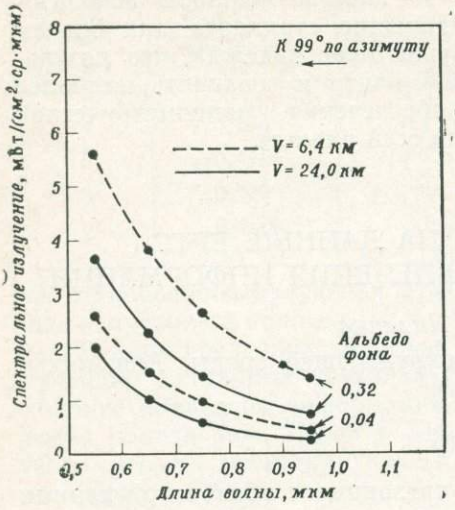
В статье затронуты две проблемы, связанные с обработкой данных ЕРТС-1: 1) влияние атмосферы на качество получаемого снимка и 2) относительно грубая пространственная разрешающая способность мультиспектрального сканирующего устройства ЕРТС (МСС). В первой части работы исследуется проблема понимания и предсказания атмосферных влияний на данные ЕРТС-1, во второй части — методы обработки данных ЕРТС-1, предлагаемые Мичиганским институтом по изучению окружающей среды (МИИС) для оценки соотношений неразрешаемых объектов в отдельных элементах разрешения. Работа является частью исследований по программе МСС-136 «Повышение качества изображения и современные методы извлечения информации».

АТМОСФЕРНЫЕ ВЛИЯНИЯ

К настоящему времени все исследователи, занимающиеся обработкой снимков ЕРТС, должны отдавать себе отчет в том, что атмосфера сильно влияет на эти данные. Например, меньшая контрастность на изображениях в зоне 4 по сравнению с зоной 5 частично обусловлена бо́льшим влиянием атмосферы на более коротковолновый диапазон. Различия в атмосферных условиях в пределах поля зрения аппаратуры или между полями могут изменить спектр принимаемых частот и тем самым затруднить интерпретацию изображения в процессе опознавания и извлечения другой информации с помощью компьютеров.

Основные компоненты излучения L, принимаемые сканирующим устройством, задаются следующим упрощенным уравнением: $L=\frac{\rho}{\pi}ET+L_p$, где ρ — коэффициент рассеянного отражения объекта; E — суммарное (направленное и рассеянное) солнечное облучение объекта; T — коэффициент прозрачности атмосферы и L_p — побочное излучение (т. е. постороннее излучение, не исходящее непосредственно от поверхности наблюдаемого объекта). Все эти величины зависят от длины волны, угла зрения, геометрии лучеиспускания и состояния атмосферы. В качестве предварительной стадии было произведено теоретическое и экспериментальное исследование данных, полученных 25 августа 1972 г. с помощью спутника ЕРТС и средств авиации для территории, соответствующей кадру ЕРТС 1033-15580.

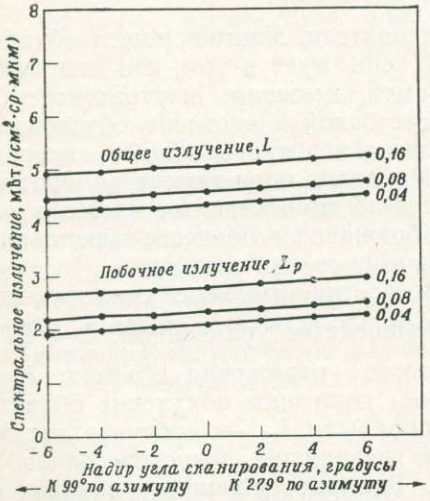
Теоретическое обоснование. Для определения величины атмосферных влияний при различных условиях и предсказания изменений, зависящих от нескольких параметров, была использована модель радиационной передачи, разработанная в Мичиганском институте [2]. Фиг. 1 иллюстрирует зависимость спектрального побочного излучения от длины волны при относительно хорошей видимости (видимость в наземных условиях $V=24$ км) и при плохой видимости ($V=6{,}4$ км). Можно сделать три вывода: 1) интенсивность побочного излучения увеличивается при работе на более коротких волнах, 2) побочное излучение испытывает сильное влияние от альбедо фона, окружающего объект, и 3) побочное излучение усиливается в случае плохой видимости.



Фиг. 1. Зависимость побочного излучения от зоны спектра.

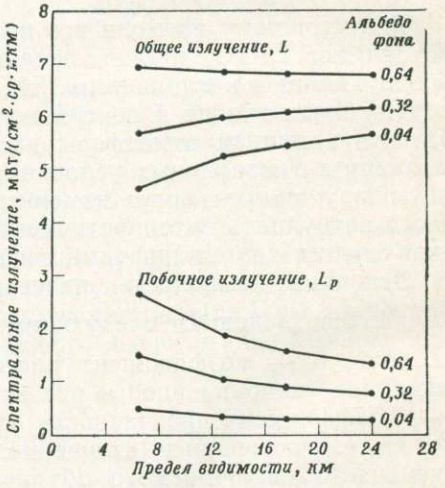
Надир угла сканирования —4° (←к 99° по азимуту); угол солнечного азимута 137°; угол солнечного зенита 39°.

Угол сканирования (от надира до крайней точки) — еще один важный параметр. Значительное «влияние угла сканирования» часто наблюдалось при обработке данных МСС, полученных с борта самолета, когда углы сканирования гораздо больше $\pm 6°$, т. е. больше чем при съемке со спутника ЕРТС. Такое влияние обусловлено как атмосферными явлениями, так и двунаправленным излучением поверхности. Можно предположить, что вызванное им искажение данных ЕРТС-1 незначительно, однако расчет изменения общей радиации атмосферы (фиг. 2) показывает, что оно составляет 8% от минимального



Фиг. 2. Зависимость излучения, принятого спутником, от угла сканирования.

Длина волны 0,55 мкм; коэффициент отражения объекта 0,08; угол солнечного азимута 137°; угол солнечного зенита 39,2°; предел видимости 24 км.

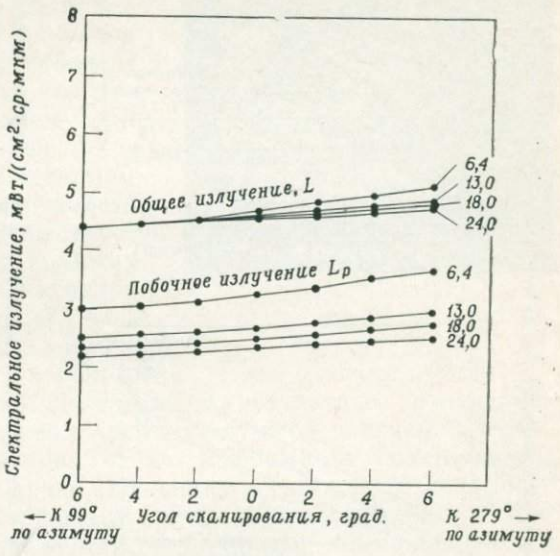


Фиг. 3. Зависимость излучения, принятого спутником, от предела видимости.

Длина волны 0,96 мкм; коэффициент отражения объекта 0,32; надир угла сканирования 4° (←к 99° по азимуту); угол солнечного азимута 137°; угол солнечного зенита 39,20°.

значения радиации для 8%-ного диффузного отражателя в условиях ясной атмосферы в спектральной зоне 0,55 мкм. Процентное отношение величин побочного излучения еще больше зависит от альбедо фона. Влияние угла сканирования уменьшается при работе на более длинных волнах и становится ничтожным при длине волны 0,95 мкм.

Однако, как показано на фиг. 3, при работе на волне 0,95 мкм при рефлекторе с коэффициентом отражения 32% наблюдается значительное побочное излучение. Эта диаграмма иллюстрирует прямую зависимость общего и побочного излучения от пределов видимости (предел видимости используется в качестве достаточно удобного параметра для идентификации стандартных профилей аэрозольности атмосферы, применяемых при вычислениях, но можно использовать и более точные профили, если они известны). Необходимо заметить, что общее излучение, принятое от объекта на темном фоне, уменьшается с увеличением дымки (короткое V) и увеличивается при более ярком фоне.



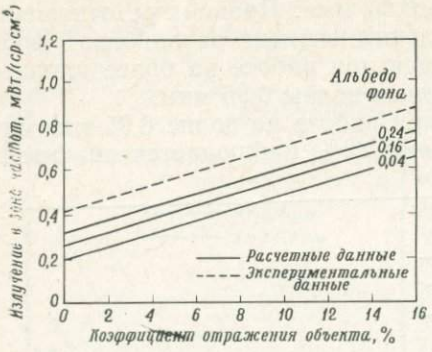
Фиг. 4. Совокупное влияние угла сканирования и пределов видимости на излучение, принятое спутником.

Длина волны 0,55 мкм; коэффициент отражения объекта 0,08; угол солнечного азимута 137°; угол солнечного зенита 39°; альбедо фона 0,08.

Величина суммарных влияний угла сканирования и предела видимости на спектральное побочное излучение в зоне 0,55 мкм для объекта и фона с коэффициентом отражения 8% показано на фиг. 4. Наглядно показано увеличение влияния угла сканирования при малых пределах видимости, где побочное излучение представляет значительную часть от общего излучения.

Экспериментальные исследования. 25 августа синхронно с прохождением спутника ЕРТС посредством мультиспектрального сканатора МИИС, установленного на борту самолета, который совершил ряд залетов на различной высоте, была получена серия данных. Сигналы от больших участков поверхности, зафиксированные аппаратурой, установленной на самолете и спутнике ЕРТС, сравнивались с сигналами от отражающих панелей, которые были размещены вдоль трассы полета. Затем выводилась эквивалентная величина коэффициента отражения этих участков, названных вторичными стандартами. Далее, по данным ЕРТС были получены средние значения коэффициента отражения для каждого вторичного стандарта и преобразованы в величины излучения (максимальные величины излучения были записаны в виде уровней магнитной ленты 127, 127, 127 и 63 для зон 4, 5, 6 и 7 соответственно).

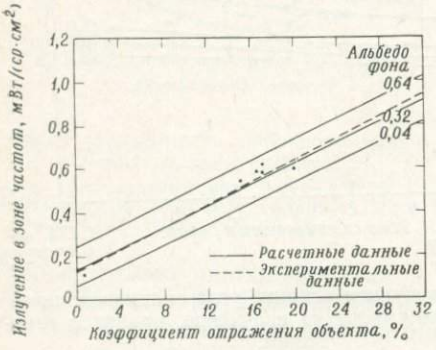
Графики зависимости излучения, принятого ЕРТС, от коэффициента отражения объекта для четырех зон ЕРТС представлены на фиг. 5—8. Пунктирные линии показывают экспериментальные зависимости относительно расчетных значений вторичных стандартов. Три почти



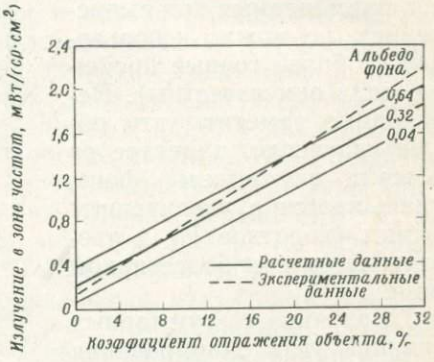
Фиг. 5. Сравнение эмпирических и теоретических данных об излучении для зоны 4 МСС ЕРТС-1 (0,5—0,6 мкм).



Фиг. 6. Сравнение эмпирических и теоретических данных об излучении для зоны 5 МСС ЕРТС-1 (0,6—0,7 мкм).



Фиг. 7. Сравнение эмпирических и теоретических данных об излучении для зоны 6 МСС ЕРТС-1 (0,7—0,8 мкм).



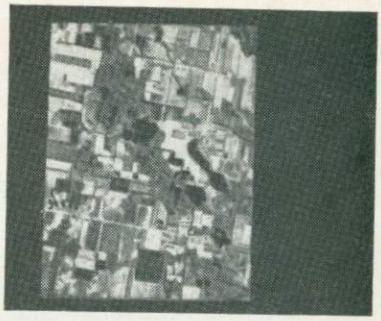
Фиг. 8. Сравнение эмпирических и теоретических данных об излучении для зоны 7 МСС ЕРТС-1 (0,8—1,1 мкм).

параллельные линии соответствуют данным, полученным с модели передачи излучения для различных альбедо фона.

Наклоны расчетных и экспериментальных линий соответствий хорошо совпадают, но величины в зонах 4 и 5 различаются для умеренных альбедо фона (особенно в 4-й зоне). Причины этих различий пока не известны. Существует несколько предположений: 1) теоретические значения величины излучения были получены путем простого умножения значений величины излучения в центре спектральной зоны на коэффициенты 0,1; 0,1; 0,1 и 0,3 для приближенного расчета зоны пропускания частот МСС ЕРТС; в дальнейшем необходимы более полные и точные подсчеты; 2) коэффициенты отражения вторичных стандартов на графиках экспериментального исследования слишком низки; более высокие величины уменьшат расхождения; 3) модель передач излучения неточна, хотя расчетные данные излучения неба совпадают с измерениями и с точными уравнениями Рейли для чистой атмосферы; 4) единица качества атмосферного состояния недостаточно точно передает объективные условия; 5) возможно, что калибровка частот МСС ЕРТС смещена вследствие неправильного понимания технологии калибровки. Необходимо дальнейшее изучение этого вопроса, однако сильное влияние атмосферы на данные ЕРТС можно считать доказанным.

ВЫВЕДЕНИЕ СООТНОШЕНИЙ

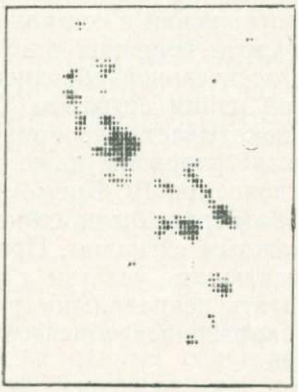
Вторым аспектом исследования ММС-136 является оценка современных методов извлечения информации из данных мультиспектрального сканирования ЕРТС (методы были разработаны в МИИС). Один из методов затрагивает проблему точного ассоциативного определения характерных особенностей площадей посредством сканирующих устройств с ограниченным пространственным разрешением, например мультиспектрального сканирующего устройства, установленного на спутнике ЕРТС-1. Ясно, что это условие создает серьезную проблему при регистрации характерных деталей местности, которые по размеру меньше, чем мгновенное поле зрения сканирующего устройства. Кроме того, существует проблема обнаружения и более крупных деталей, так как многие из сигналов мультиспектрального сканирующего устройства ЕРТС (и соответственно элементы разрешения изображения) перекрывают границы между соседними деталями. В результате излучение, представленное единичным сигналом, является суммой излучений, отраженных от двух или более объектов. Так как информация, содержащаяся в этих сигнала, не характерна ни для одного из объектов, то имеется вероятность ошибочной классификации. Таким образом, район может быть отнесен к несоответствующему классу. Например, по крайней мере



Фиг. 9.



Фиг. 10. Процесс распознавания водоемов на эталонной площади.



Фиг. 11. Результаты пропорциональной оценки водоемов на эталонной площади (интенсивность символов указывает на относительную величину водоемов в каждом разрешаемом элементе).

25% сигналов, полученных с квадратного участка площадью 20 гектаров, не могут быть использованы из-за перекрытия его границ.

В МИИС разработан метод обработки данных [1] для оценки соотношений характерных особенностей местности, регистрируемых одним сигналом, путем получения информации на нескольких спектральных диапазонах. Это обеспечивает более точное определение характер-

ных признаков местности; чем больше число используемых спектральных диапазонов, тем больше объектов можно зарегистрировать. Ниже приводится описание и оценка результатов, полученных при использовании указанного метода для обработки данных мультиспектрального сканирующего устройства ЕРТС-1 МСС.

Результаты испытания. В данном эксперименте обрабатывалась некоторая часть информации ЕРТС по юго-западной части штата Мичиган, полученной 25 августа. Черно-белая фотография этого района показана на фиг. 9. Характерной особенностью района является наличие большого числа озер и других водоемов различной площади, окруженных деревьями и сельскохозяйственными угодьями, многие из которых находятся под паром.

Задача поставленного эксперимента заключалась в определении площади озер и других водоемов. Полученные данные обрабатывались посредством обычного алгоритма опознавания в сочетании с алгоритмом оценки соотношений.

Сначала извлекались сигналы, содержащие информацию об основных типах поверхности (вода, деревья, почва) и устанавливались общие признаки для каждой из этих поверхностей. Признаки выявлялись обоими алгоритмами по данным ЕРТС-1, полученным в зонах 4, 5 и 7, так как шестая зона для поставленной цели оказалась непригодной.

По алгоритму распознавания каждый сигнал приписывался только одному классу поверхности. В результате была составлена карта районирования территории, показанная на фиг. 10; жесткость отбраковки была такова, что 99,9% сигналов, характерных для тех или иных признаков, легко распознается. Одиннадцать озер на общей площади в 451 900 м² было идентифицировано, в результате чего площадь в 4503 м² (79 м×57 м) оказалась единицей разрешения, соответствующей одному сигналу.

Затем тот же набор данных обрабатывался с помощью алгоритма оценки соотношений и составлялась карта озер, приведенная на фиг. 11. На этой карте величина плотности для каждого символа пропорциональна относительной обводненности элементарной площади, зарегистрированной одним сигналом. Сравнение этой карты с наземной фотографией показывает, что контуры озер воспроизведены точно. Более того, зарегистрированы даже небольшие озера и водоемы. Общее количество водоемов 19. Кроме карты, которая иллюстрирует лишь соотношения размеров, были точно вычислены водные площади, регистрируемые каждым сигналом. При изучении полученных результатов было решено исключать участки с небольшой водной поверхностью, чтобы предотвратить неправильное распознавание. В результате изучения перечня обнаруженных объектов общая площадь озер оказалась равной 965 800 м².

Таблица 1

	Данные наземных наблюдений	Данные метода распознавания	Данные метода пропорциональной оценки
Количество водоемов	20	11	19
Общая площадь, м²	1 004 200	451 900	965 800

Наконец, с помощью аэрофотографии были определены количество и действительная площадь водных пространств на местности. Общая площадь 20 озер и водоемов составила 1 004 000 м². Результаты, полу-

ченные для сравнения, представлены в табл. 1. Они свидетельствуют, что метод пропорциональной оценки дает более точные результаты, чем обычные методы обработки данных.

ВЫВОДЫ

Показано прямое влияние атмосферных явлений на данные ЕРТС, хотя сила влияния этих явлений на данные не установлена. Очевидно, что они ухудшают качество информации. Различия в атмосферных и локальных параметрах как внутри, так и между радиационными полями приобретают особое значение. Проводилось исследование методов уменьшения влияния этих явлений.

Была продемонстрирована возможность точной оценки площадей по обработанным данным ЕРТС-1 с помощью усовершенствованного метода извлечения информации. При распознавании участков земной поверхности с озерами и водоемами на эталонной площади 55% ошибок, допущенных при использовании обычного метода распознавания, было сведено до 3% благодаря методу пропорциональной оценки. Хотя уровень качества без дальнейшего усовершенствования этого метода будет не всегда удовлетворительным, данный метод, несомненно, полезен для исследований во многих областях науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Horwitz H., Nalepka R., Morgenstern J.,* Estimating the Proportions Within a Single Resolution Element of a Multispectral Scanner, Proc. of 7th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environ., Willow Run Labs., The Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1971.
2. *Turner R., Malila W., Nalepka R.,* Importance of Atmospheric Scattering in Remote Sensing, Proc. of 7th Intern. Symp. on Remote Sensing of Envir., Willow Run Labs, The Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1971.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МАСКИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ RBV ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ОСТАТОЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ

Д. Росс

(Международная система видеосвязи, Маунтин-Вью, Калифорния)

ВВЕДЕНИЕ

При сравнении результатов обработки эквивалентных массивов данных, полученных посредством RBV[1], и данных спектральных зон МСС были замечены отклонения значений плотности участков на изображениях RBV-1, -2, -3 по отношению к плотности тех же участков, зарегистрированных с помощью МСС -4, -5 и -6. Анализ значительного числа изображений RBV подтвердил, что большинство дефектов плотности для определенных спектральных зон RBV от кадра к кадру имеют то же самое местоположение, размер и плотность распределения.

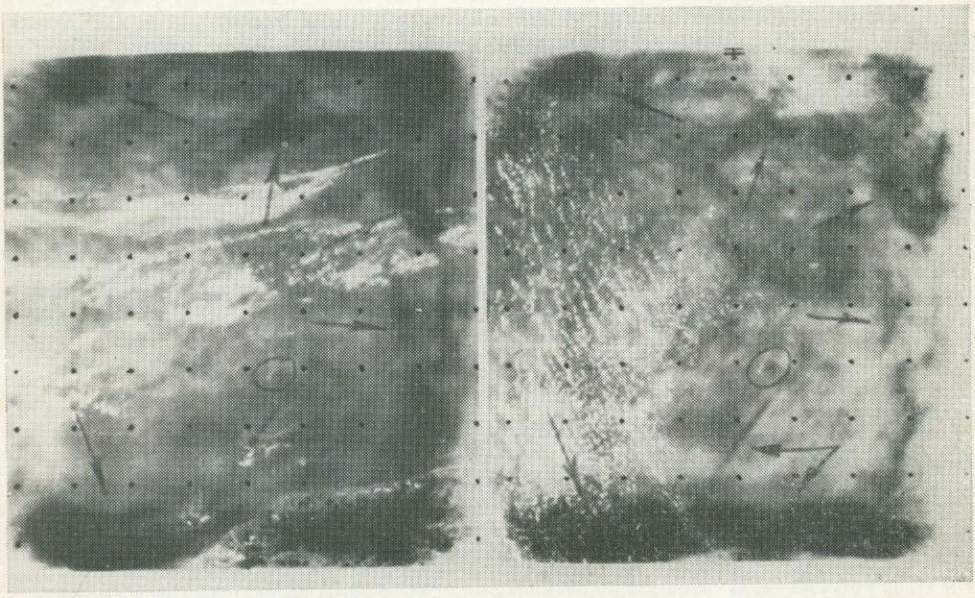
Прежде чем произвести сравнение изображений RBV с их дубликатами, полученными посредством МСС, необходимо скомпенсировать стационарно повторяющиеся дефекты плотности. Наипростейшим методом, находящимся в распоряжении исследователей, является фото-

[1] RBV (Returned Beam Vidicon) — система, использующая возвратно-лучевой видикон. — *Прим. перев.*

графическое маскирование. Оно заключается в получении контратипа выбранного изображения (снимка). В этом случае негативная маска имеет такое распределение плотности, что при точном совмещении маски с первоначальным позитивным изображением полностью перекрывают нежелательные участки плотности оригинального изображения. При воспроизведении такой комбинации получается новое изображение, где нежелательные различия плотности (дефекты) исключены.

СУЩНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Местоположение каждого видикона, установленного на ERTC-1, регистрируется во время настройки для радиометрической связи, так как фотопроводящие поверхности (мишени) видиконов имеют различную чувствительность от точки к точке. Сигналы от видикона снимаются на матрицу размером 18×18 элементов; затем данные от 364 точек используются для обеспечения программы коррекции радиометрических



Фиг. 1. Изображения RBV-1, полученные со спутника ERTC-1 и иллюстрирующие стационарные остаточные дефекты плотности темного фона.
Слева — снимок E-1004-08021-1 от 27 июня 1972 г., *справа* — снимок E-1007-15160-1 от 30 июня 1972 г.

сигналов с тем, чтобы уменьшить искажения темного фона вследствие неизбежного временного интервала между моментом принятия сигнала и воспроизведением изображения. Оказалось, что для изображений (снимков) RBV, использованных в настоящем эксперименте, матрица размером 18×18 элементов не обеспечивает достаточного количества точек корреляции для удовлетворительного сглаживания значительных искажений темного фона, и местами величина искажений более 10%. Точечные измерения плотности участков изображения RBV не могут быть уверенно сопоставлены со спектральным коэффициентом отражения тех же участков изображений MSS, зарегистрированных в эквивалентной спектральной зоне.

Снимки различных участков поверхности, полученные с промежутком в несколько дней посредством RBV-1, установленного на спутнике

ЕРТС-1, представлены на фиг. 1. Снимки были отпечатаны на высококонтрастной бумаге, чтобы выделить и показать соответствие разновременных стационарных искажений темного фона в камере RBV-1. Подобные искажения были обнаружены на изображениях RBV-2 и RBV-3. Для трех спектральных зон RBV на изображениях масштаба 1 : 1 000 000 градуированные различия плотности встречаются в виде круглых или эллиптических пятен размером от нескольких миллиметров до 15—20 мм. На некоторых участках этих изображений была также обнаружена линейная перекрестная штриховка под углом 45°. Линии градуированной плотности имеют ширину 1—2 мм и длину до 60 мм. Данное явление, видимо, связано с матрицей 18×18, но повторяется и при матрице 36×36.

МАСКИРОВАНИЕ

Был взят диапозитив (Е-1007-15160-1) размером 24 мм, представляющий однородно отражающую, относительно свободную от облаков поверхность океана, что подтверждено изучением снимка МСС-4. На снимке, полученном посредством RBV-1, обнаружены повторяющиеся остаточные искажения, о которых говорилось выше; это изображение было взято для проведения корректировочного маскирования следующим образом.

Все изображения ЕРТС-1 воспроизводились при коэффициенте контрастности 1,0[1] в пределах жестких допусков, поэтому маскирование было произведено также при коэффициенте контрастности 1,0. Для этой цели была выбрана пленка «Kodak Commercial» на полиэфирной подложке. На пленке контактным методом экспонировались изображение и градуированная шкала плотности с коэффициентом контрастности 1,0. Затем пленка обрабатывалась в проявителе D-19.

Плотность всех воспроизведенных изображений ЕРТС-1, так же как и величина контрастности, поддерживалась в определенных пределах. Величина плотности устанавливалась таким образом, чтобы наиболее яркие объекты, например облака, воспроизводились на позитиве с плотностью 0,40±0,12. До тех пор пока изображение линейно связано с воспроизводящим материалом пленки, величина плотности его остается в пределах допуска, а коэффициент контрастности как в маске, так и в исходном изображении, равен 1,0. Одна маска может быть использована для коррекции нескольких снимков, полученных в одной спектральной зоне.

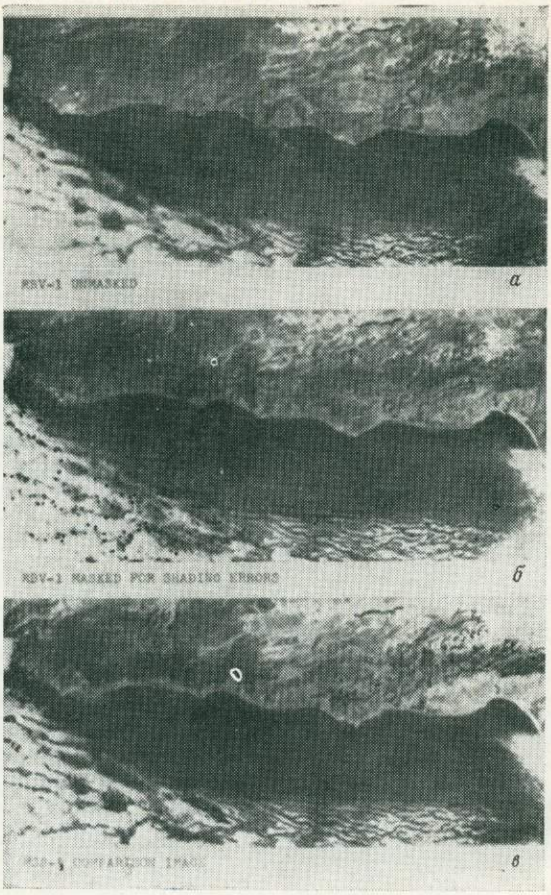
С позитивного оригинала RBV-1 был отпечатан ряд негативных масок. Все маски были обработаны до получения коэффициента контрастности 1,0. Негативная маска, наиболее полно компенсировавшая плотности в сопряженном с ней позитивном оригинале, была отобрана для коррекции стационарных погрешностей изображений RBV-1 всех других кадров.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Снимок, полученный посредством RBV-1 (ЕРТС-1), Е-1002-18140, от 25.VI.72 г. был сопряжен с негативной маской, полученной и отобранной указанным выше способом. Фрагменты этого снимка до и по-

[1] Это не совсем точно. Воспроизведение темных участков большей части обработанных изображений (на диапозитиве) получается при коэффициенте контрастности менее 1,0 там, где объект был зарегистрирован датчиком при чувствительности 20% максимальной. Например при чувствительности датчика 2% на выходе коэффициент контрастности составляет 0,75. Плотности маски, соответствующие самым темным участкам позитива с меньшим коэффициентом контрастности, также имеют меньший коэффициент контрастности и являются почти идеальным сочетанием для компенсации плотности, полученной в результате погрешностей видикона.

сле маскирования показаны на фиг. 2 в сравнении со снимком MCC-4, полученным в эквивалентной спектральной зоне. Результатом этой операции явилось несомненное сглаживание остаточных радиометрических искажений RBV, что позволило сравнивать при анализе плотности



Фиг. 2. Сравнение изображений RBV и MCC, полученных в эквивалентной спектральной зоне со спутника ЕРТС-1 25 июня 1972 г. (E-1002-18140).

А — RBV-1, изображение немаскированное; *Б* — RBV-1, изображение, маскированное с целью уменьшения дефектов темного фона; *В* — изображение MCC-4, взятое для сравнения.

изображений RBV-1 и MCC-4. Темные пятна на поверхности океана в нижнем левом углу маскированного снимка — это негативное изображение облаков, зафиксированных на снимке, с которого снималась маска. Существуют некоторые масштабные различия между пространственной решеткой маски и маскированного изображения, но они не проявляются в других снимках RBV-1, подвергнутых соответствующей обработке. (Подобная процедура применялась при изготовлении радиометрических корреляционных масок для изображений RBV-2 и -3.)

Величину, на которую было уменьшено остаточное затемнение изображения RBV-1, трудно определить точно, если сравнивать это изображение с изображением MCC-4. Так как спектральная зона RBV-1 перекрывает область голубых волн больше, чем зона MCC-4, можно предположить, что некоторые различия вызваны атмосферным

влиянием, наиболее отчетливо проявляющимся в условиях однородного фона, например воды.

Однако о степени коррекции, достигаемой с помощью маски, можно судить путем измерения диапазона плотности между самыми светлыми и самыми темными участками. Диапазон составляет примерно 0,60 единицы плотности, что соответствует отношению 4 : 1 в пропускании частот. Вариации плотности, замеренные в сопряженной комбинации маски и оригинала, с которого маска была изготовлена, не превышают ±0,03. Максимальная пространственная неоднородность плотностей в третьей генерации 24-см снимков ЕРТС, составляет около 0,10. Суммарная локальная погрешность между маской и изображением в худшем случае составляет ±0,13 или 1,35 : 1, что является значительным достижением по сравнению с первоначальной погрешностью 4 : 1.

ВЫВОДЫ

В результате сделан вывод, что коррекционная матрица RBV 18×18 элементов не уничтожает полностью погрешности радиометрической связи в общей массе воспроизводимых изображений, где плотности обусловлены светимостью объектов, наблюдаемой с местоположения датчика. Это ведет к ухудшению полезной отдачи воспринимающей системы, превосходной в других отношениях. Маскирование является относительно простым способом коррекции остаточных радиометрических погрешностей RBV, который можно использовать при изготовлении увеличенных 24-см снимков с соответствующими масками на экспонируемой пластине. Изображения RBV, полученные над совершенно спокойной неискаженной волнами и свободной от облаков и солнечных бликов поверхностью океана, представляют эталонные изображения, с которых изготовляются коррекционные маски для дальнейшей повседневной работы.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ И СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Д. Голд, Р. Паризек, С. Александер. Анализ и применение данных ЕРТС-1 для регионального геологического картирования 7

Ю. Исаксен, Р. Факундини, С. Форстер. Оценка применимости снимков ЕРТС-1 для исследования разнообразных геологических комплексов штата Нью-Йорк 18

М. Йенсен. Геологическое строение штатов Юта и Невада по снимкам ЕРТС-1 24

Э. Латрам, И. Таюр, У. Паттон мл., У. Фишер. Предварительные результаты применения снимков ЕРТС-1 для изучения геологии Аляски 29

Б. Блоджет, А. Андерсон. Сравнение снимков южного Марокко, сделанных со спутников «Джемини» и ЕРТС 35

К. Кавелье, Ж.-И. Сканвик, Г. Викстин, А. Цизерман. Возможность использования снимков ЕРТС-1 при изучении геологических и структурных особенностей осадочного бассейна (Парижский бассейн, Франция) 40

Р. Уильямс мл., А. Бёдварссон, С. Фридрикссон, И. Торстейнссон, Г. Палмасон, С. Рист, Х. Сигтрюггссон, С. Тораринссон. Дистанционное распознавание геолого-географических объектов на территории Исландии со спутника (предварительные результаты анализа снимков МСС) 48

А. Грегори. Предварительная оценка применения снимков ЕРТС-1 для изучения геологии отдельных районов Канадской Арктики 54

А. Гёц, Ф. Биллингсли, Д. Элстон, И. Лучитта, Ю. Шумейкер. Предварительные геологические исследования в районе плато Колорадо с использованием улучшенных снимков ЕРТС 65

Л. Роуэн, П. Уэтлауфер. Структурно-геологический анализ территории Невады с помощью снимков ЕРТС-1 (предварительное сообщение) 73

М. Вильжоан, Р. Вильжоан. Использование снимков ЕРТС-1 в качестве вспомогательного средства для геотектонического районирования Южно-Африканского кристаллического щита 80

И. Бодехтель, Б. Ламмерер. Новые данные по тектонике Альп и Апеннин, полученные с помощью спутника ЕРТС-1 87

Р. Стеффенсен. Структурные линеаменты полуострова Гаспе по данным снимков ЕРТС-1 91

Ч. Уитингтон. Выявление линеаментов в отложениях Прибрежной равнины по данным снимков ЕРТС-1 101

Р. Хоппин. Интерпретация структур на снимках, сделанных со спутника ЕРТС-1, в районе Биг-Хорн, штаты Вайоминг и Монтана 104

Р. Вейдман, Д. Олт, Р. Флуд мл., К. Холи, Л. Уоквиц, Р. Берг, У. Джонс. Изучение снимков ЕРТС-1 для выявления линеаментов и для фотогеологического картирования в штате Монтана (предварительное сообщение) 110

Р. Пиз, К. Джонсон. Новый линеамент — разлом в Южной Калифорнии . . 116

Ч. Уир, Ф. Уоббер, О. Расселл, Р. Амато. Картирование разрывов и учет открытых горных разработок на Среднем Западе США с помощью снимков, полученных спутником ЕРТС-1 121

А. Фонтанель, Ж. Гийемо, М. Гюи. Первые результаты использования данных спутников ЕРТС-1 по юго-восточной Франции: геологическое строение, седиментология, загрязнение моря 128

ПОИСКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Р. Винсент. Изучение месторождений железных руд района Атлантик-Сити (штат Вайоминг) с помощью карт соотношений отражения света в разных диапазонах спектра 145

Р. Шмидт. Использование снимков, сделанных со спутника ЕРТС-1 при поисках месторождений медно-порфировых руд в Пакистане (Белуджистан) . . . 151
Е. Рич. Связь геологических структур, определенных по снимкам ЕРТС-1, с известными промышленными рудными месторождениями 156
И. Бехтолд, М. Лиджет, Дж. Чайлдс. Региональный тектонический контроль третичной минерализации и современных разломов в южной части Провинции бассейнов и хребтов по данным спутника ЕРТС-1 161
Д. Сондерс, Г. Томас. Оценка рентабельности использования снимков ЕРТС-А при поисках нефти и других полезных ископаемых 168

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ И ВУЛКАНИЗМА

П. Уорд, Дж. Итон, Э. Эндо, Д. Харлоу, Д. Маркес, Р. Аллен. Создание, проверка и оценка опытной системы наблюдения за вулканами 176
М. Абдель-Гавад, Дж. Сильверстейн. Применение снимков ЕРТС при изучении землетрясений и разведке полезных ископаемых в Калифорнии 183
Л. Гедни, Дж. Ван-Уормер. О некоторых аспектах тектонической активности Аляски по данным изучения снимков ЕРТС-1 195
В. Картер, Г. Итон. Использование снимков ЕРТС-1 для изучения воздействий землетрясений на геологические структуры (на примере землетрясения 1972 г. в Манагуа) 201

ИЗУЧЕНИЕ РЕЛЬЕФА И ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Э. Мак-Ки, К. Брид, Л. Гаррис. Изучение морфологии, происхождения и движения песчаных морей в пустынях Африки, Азии и Австралии 210
Р. Моррисон, Дж. Халберг. Картирование четвертичных отложений и форм рельефа на территории Среднего Запада и Великих равнин с помощью мультиспектральных снимков, сделанных со спутника ЕРТС-1 219
Р. Бреккенридж. Оледенение северо-западной части территории штата Вайоминг по данным спутника ЕРТС-1 227
С. Александер, Дж. Дейн, Д. Голд. Использование данных мультиспектрального сканатора (МСС) спутника ЕРТС-1 для картирования открытых разработок и дренажа кислых вод в Пенсильвании 233
Б. Гилбертсон. Оценка состояния растительного покрова на отвалах породы по снимкам спутника ЕРТС-1 (первые важные результаты) 237
Ф. Томпсон, Н. Роллер. Карта районирования земель Йеллоустонского национального парка 241
Э. Уорк мл., Д. Гилмер, А. Клетт. Предварительная оценка данных спутника ЕРТС-1 для определения количества и распределения природных водоемов и озер в прериях 244

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

У. Мелхорн, С. Синнок. Распознавание литологических комплексов и выявление форм рельефа на юго-западе штата Колорадо с помощью методики ADP 251
С. Рифман. Улучшение качества мультиспектральных снимков ЕРТС с помощью ЭЦВМ 258
Р. Роджерс, К. Пикок. Методика коррекции погрешностей, обусловленных солнечным и атмосферным влиянием, на снимках ЕРТС 269
У. Малила, Р. Налепка. Атмосферные влияния на данные ЕРТС-1 и современные методы извлечения информации 275
Д. Росс. Экспериментальное маскирование изображений RBV для уменьшения стационарных остаточных погрешностей в радиометрической коррекции 281

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИЗ КОСМОСА

Редактор В. Краснова
Художник И. Пучков
Художественный редактор В. Бисенгалиев
Технический редактор Л. Бирюкова
Корректоры Н. А. Гиря и С. А. Денисова

Сдано в набор 13/I 1975 г.
Подписано к печати 5/V 1975 г.
Бумага журн. 70×108$^{1}/_{16}$=9 бум. л.
25,20 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 23,93. Изд. № 5/7905.
Цена 2 р. 71 к. Зак. 1673.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 113105, Нагатинская ул., д. 1.

5574