

В. Н. Губин

**Дистанционные методы
в геологии
Курс лекций**

МИНСК
БГУ
2004

УДК 550.814

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор С. А. Сладкопевцев
(Московский государственный университет
геодезии и картографии);
член-корреспондент А. К. Карабанов
(Институт геологических наук НАН Беларуси)

Рекомендовано
Ученым советом географического факультета
29 апреля 2003 г., протокол № 8

Губин В. Н.

Дистанционные методы в геологии: Учеб. пособие для студентов спец. I 51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» /В. Н. Губин.—Мн.: БГУ, 2004.— 138 с.

ISBN 985 -

Изложены методы и технические средства дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены принципы визуального и автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков. Показаны особенности дистанционного изучения линеаментной тектоники, кольцевых структур литосферы, динамики плейстоценовых оледенений. Освещены вопросы практического использования материалов дистанционных съемок при прогнозе и поисках месторождений полезных ископаемых, проведении эколого-геологических исследований.

Предназначено для студентов геологических специальностей вузов, а также аспирантов, преподавателей учебных заведений и специалистов, занимающихся дистанционными методами изучения Земли.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Желание увидеть Землю с высоты птичьего полета у естествоиспытателей возникло давно. Однако только с появлением первых летательных аппаратов – сначала воздушного шара, а затем самолета - обозрение земной поверхности с воздуха перешло из мира фантастики в реальность. «Только теперь, с высоты прямолинейного полета мы открываем истинную основу нашей Земли, фундамент из скал, песка и соли, на котором, словно мох среди развалин, зацветает жизнь», – писал замечательный французский летчик и писатель Антуан де Сент-Экзюпери.

В последние годы благодаря современным аэросъемкам и зондированию Земли из космоса стало реальным комплексное познание земных недр, прогнозирование месторождений полезных ископаемых, изучение состояния и изменений литосферы под воздействием техногенеза, организация оперативного мониторинга геологической среды. Методы дистанционного зондирования открыли широкие перспективы для геологических исследований, во многом предопределили пути развития геологии и других наук о Земле.

В предлагаемом курсе лекций основное внимание уделено методике геологического дешифрирования аэрокосмических снимков и практической реализации данных дистанционного зондирования при изучении линеаментной тектоники, кольцевых структур литосферы и форм древнеледникового рельефа. Изложены вопросы использования материалов дистанционных съемок при прогнозе и поисках полезных ископаемых, в эколого-геологических исследованиях. Пособие поможет студентам в освоении лекционного материала и при выполнении практических занятий по курсам «Дистанционные методы в геологии», «Геологическая съемка и картографирование», «Четвертичная геология», «Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых», «Основы линеаментной тектоники», «Космическая геология». Пособие будет полезно также студентам географического профиля, аспирантам, преподавателям учебных заведений, использующим дистанционные методы изучения Земли.

Автор благодарен рецензентам данного пособия: заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору С. А. Сладкопевцеву и доктору геолого-минералогических наук, члену-корреспонденту профессору А. К. Карабанову.

1. ВВЕДЕНИЕ В ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

1.1. Основные понятия, терминология

Дистанционное зондирование (от англ. термина «remote sensing») обозначает в широком смысле изучение поверхности Земли или других планет на значительном расстоянии с помощью съемок с авиационных и космических носителей в целях изучения и тематического картографирования исследуемых объектов. Среди различных аспектов дистанционного зондирования особую актуальность приобретают аэро- и космические съемки Земли при геологических исследованиях.

Дистанционные методы в геологии представляют собой комплекс технологий и методов изучения закономерностей строения и развития литосферы с самолетов, космических аппаратов и других носителей визуально или различными приборами путем дешифрирования записи физического поля Земли. В научной литературе термин «дистанционные методы в геологии» нередко заменяют аналогичным по содержанию понятием «*аэрокосмогеологические методы*».

Развитие дистанционных методов в геологии тесно связано с геолого-географическими исследованиями с помощью космических средств планет Солнечной системы, поскольку это имеет определенное значение для выявления планетарных закономерностей в эволюции Земли. Прогресс в освоении космического пространства позволил выделить новое направление в геологической науке – *космическую планетологию*, которая открывает перспективы для сравнительного анализа строения Земли и других планет.

В геологической практике дистанционные методы разделяют на две группы: фотографические и нефотографические, или оптико-электронные методы съемок земной поверхности. К фотографическим методам относят аэро- и космические съемки, осуществляемые традиционной либо новой многозональной фотоаппаратурой. Съемки, проводимые с помощью сканирующих систем, спектрометрических приборов или радаров бокового обзора, называют оптико-электронными методами дистанционного зондирования. В общем комплексе аэрокосмогеологических исследований вспомогательное значение имеют визуально-инструментальные наблюдения поверхности Земли с воздуха либо из космоса, именуемые соответственно аэровизуальными и космовизуальными методами.

Аэрокосмогеологические исследования в сочетании с традиционными методами (геологическими, геофизическими, геохимическими и др.) повышают объективность геологических знаний о региональной структуре литосферы, проявлениях древних и новейших геологических процессов. Важную роль играет аэрокосмическая информация при тектонических исследованиях, палеогеодинамических реконструкциях, прогнозировании и поисках месторождений полезных ископаемых, изучении состояния и изменений верхней части литосферы в условиях техногенного воздействия.

В равнинно-платформенных областях, охваченных древнематериковыми оледенениями, дистанционными методами выявляются закономерности развития покровных (четвертичных) отложений различного состава и генезиса, формы проявления экзогенных геологических процессов, а по комплексу дешифровочных признаков и геолого-геофизических данных устанавливаются зоны разломов, кольцевые объекты (погребенные гранито-гнейсовые купола, вулканоплутонические структуры и др.) и тектонические блоки, активные на новейшем этапе геологической истории.

Дистанционные методы получили широкое развитие в специализированных видах геологического картографирования. *Космогеологическое картографирование* проводится в масштабах 1:1 000 000 и 1:500 000 с целью выяснения региональных закономерностей строения литосферы значительных по площади территорий на базе геоинформации, полученной из космоса. При изучении геологии отдельных районов (обычно в масштабе 1:200 000) осуществляется *аэрофотогеологическое картографирование*. В итоге составляются космогеологическая либо аэрофотогеологическая карты, которые представляют собой геологические модели местности, созданные на основе материалов дистанционного зондирования с учетом традиционных геолого-геофизических данных. Они используются для обновления карт геологического содержания, тектонических и геодинамических построений, решения поисковых, эколого-геологических и других задач.

С целью прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых выполняется *космоминерогеническое и космоструктурное картографирование*. При этом создаются прогнозные карты, позволяющие оперативно оценить структурные особенности рудных формаций и зон нефтегазонакопления, выбрать перспективные площади для постановки крупномасштабного геологического картографирования, поисковых геофизических и буровых работ.

1.2. Развитие аэрокосмогеологических исследований

Первые воздушные съемки с летательных аппаратов – воздушных шаров относятся к середине XIX в. Французским энтузиастом авиации Надаром в 1855 г. были сделаны фотографии Парижа и по ним составлен точный план города. В те же годы французский геолог Эме Цивильяль осуществлял фотографирование Альп с высоких вершин с целью выделения на фотоснимках геологических контуров. В России воздушные съемки были начаты в 1886 г., когда А. М. Кованько сфотографировал с воздушного шара Санкт-Петербург. В начале XX в. русским инженером В. М. Потте создан первый в мире пленочный аэрофотоаппарат. Первая аэрофотосъемка в России была произведена в 1918 г., в районе г. Тверь. С 1925 г. начинаются систематические съемки с целью составления топографических карт неизученных территорий.

С начала 30-х гг. XX в. в геологических исследованиях территории бывшего СССР проводились аэрофотосъемки по инициативе академика А. Е. Ферсмана. Аэроснимки используются при изучении нефтеносных районов Ферганы и Азербайджана. Широкий размах получили аэровизуальные геологические наблюдения в Восточной Сибири. К этому же периоду относятся первые сведения об использовании аэрофотоснимков в Беларуси, где они нашли применение для изучения болот Полесской низменности. В 1927 г. А. Е. Ферсманом выполнены аэровизуальные наблюдения особенностей ледниково-аккумулятивного рельефа между городами Ковно и Витебском.

В 30-е гг. значительный вклад в разработку и развитие аэрометодов внесен Ленинградским научно-исследовательским институтом аэрофотосъемки, созданном в 1929 г. Становилась очевидной большая научная и практическая эффективность аэрометодов в геологии. Накопленный опыт по применению материалов аэрофотосъемки в геологических исследованиях довоенного периода был обобщен в работах А. В. Гавемана, В. А. Фааса и В. П. Мирошниченко.

С середины 40-х гг. большой объем методических исследований выполнен Всесоюзным аэрогеологическим трестом (ВАГТ, организован в 1949) и Лабораторией аэрометодов АН СССР (ЛАЭМ, 1944). Отмечается широкое внедрение аэрометодов в 50-х гг. при геологических исследованиях и картографировании на территории Поволжья, Урала, Прикаспия, Казахстана, Средней Азии, Центральной и Восточной Сибири. Большую помощь аэрогеологам в дешифрировании элементов геологического строения оказали книги М. Н. Петрусевича «Геолого-съёмочные и поис-

ковые работы на основе аэрометодов» (1954) и «Аэрометоды при геологических исследованиях» (1962).

В 1959 г. началось планомерное использование материалов аэрофотосъемки в практике геологических исследований на территории Беларуси. Результаты дешифрирования аэроснимков показали высокую эффективность при геологической съемке масштаба 1:200 000, геоморфологическом картографировании, поисках месторождений минерального строительного сырья. Существенную роль в этом сыграли геологосъемочные работы с применением аэрометодов, выполненные Белорусской гидрогеологической экспедицией (БГЭ, организована в 1955 г.).

В 60–70-е гг. были достигнуты значительные успехи в использовании материалов дистанционного зондирования при геологических исследованиях. Аэрометоды в геологии получили широкое признание как средства получения информации о геологическом строении складчатых и платформенных областей. В основу анализа аэрофотоснимков были положены контрастно-аналоговый и ландшафтно-индикационный подходы, которые позволили по снимкам выявлять геологические структуры, вещественные комплексы горных пород в различных ландшафтных условиях при решении задач геологического картографирования среднего и крупного масштабов, прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых.

С середины 60-х гг. Лабораторией аэрометодов (ныне Всероссийский научно-исследовательский институт космоаэрогеологических методов, ВНИИКАМ) успешно разрабатываются ландшафтные методы дешифрирования покровных (четвертичных) отложений, морфологии рельефа, элементов тектонического строения применительно к территории Украины, Беларуси, Кольско-Карельской области и центральным районам России. Обобщение данного опыта использования аэрометодов отражено в методическом пособии «Дешифрирование четвертичных отложений Русской равнины» (1966). В 1971 г. Лабораторией аэрометодов под редакцией В. К. Еремина опубликована крупная работа по применению аэрометодов в геологических исследованиях, иллюстрированная многочисленными примерами дешифрирования аэрофотоснимков в различных геолого-ландшафтных условиях. Среди учебных пособий следует отметить книгу А. Е. Михайлова и Н. С. Рамм «Аэрометоды при геологических исследованиях» (1975).

В 1966 г. при Институте геологических наук (г. Минск) была организована Лаборатория аэрогеологического и морфометрического методов (ныне Научно-производственное государственное предприятие «Космо-

аэрогеология»). В. И. Гридиным, Л. С. Вольской и другими сотрудниками этой лаборатории на основе аэрометодов проводятся структурно-геоморфологические и неотектонические исследования в связи с нефтегазопромышленными работами в Припятском прогибе, составляются тектонические схемы нефтеперспективных площадей среднего масштаба, разрабатываются технические условия летно-съёмочных работ на территории Беларуси.

Важный этап в развитии дистанционных методов в геологии связан с освоением космического пространства, начало которому положил запуск в СССР первого в мире искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. С помощью телевизионной аппаратуры, установленной на ИСЗ «Молния», «Метеор» и других, были получены изображения земной поверхности с больших высот. Первый в мире космонавт Ю. А. Гагарин осуществил визуальные наблюдения Земли 12 апреля 1961 г. с орбиты космического корабля «Восток». Фотографирование поверхности Земли впервые было выполнено космонавтом Г. С. Титовым 6 августа 1961 г. В последующие годы с пилотируемых космических кораблей «Восток», «Восход», «Союз», «Союз-Т» (СССР), «Меркурий», «Джемини», «Аполлон» (США) и долговременных орбитальных станций «Салют» были получены многочисленные космофотоизображения Земли, осуществлены визуальные наблюдения. Автоматические и пилотируемые космические аппараты становятся важным средством научного исследования, дающими уникальную геологическую информацию.

Вторая половина 70-х гг. ознаменовалась активизацией аэрокосмических методов в геологии. В это время для геологических целей начинают широко применяться новые виды аэросъёмки (тепловая, радиолокационная, высотная) и съёмки из космоса в различных диапазонах электромагнитного спектра. Большое внимание уделяется структурной интерпретации континентальных и региональных космоизображений складчатых и платформенных областей. Новым и весьма интересным достижением явилось фиксирование на космических снимках кольцевых структурных форм различной геологической природы. В 1976 г. под редакцией В. Е. Хаина выходит в свет учебное пособие «Космические методы в геологии».

Качественно новый этап развития дистанционных методов геологических исследований наступил в 1980–1990 гг. с появлением цифровых средств получения аэрокосмической информации, разработкой компьютерных технологий обработки изображений земной поверхности и геолого-геофизических материалов. При дешифрировании аэро- и космиче-

ских снимков используется геоиндикационный метод, предусматривающий изучение взаимосвязей элементов ландшафта с геологическими объектами. Геоиндикационное моделирование находит широкое применение в тектонических исследованиях платформенных бассейнов, при выявлении структур осадочного чехла, перспективных на поиски нефти и газа, прогнозировании месторождений твердых полезных ископаемых и подземных вод. Немаловажную роль в методологии дистанционных геологических исследований сыграли теоретические обобщения по проблемам линеamentной тектоники и кольцевых структур Земли, опубликованные в работах Я. Г. Каца, В. В. Козлова, В. И. Макарова, Д. М. Трофимова и др.

В рассматриваемый период дистанционное зондирование Земли осуществлялось по американской программе пилотируемых полетов космических кораблей многоцелевого пользования «Спейс Шаттл» (корабли «Колумбия», «Челленджер», «Дискавери»).

Новым аспектом дистанционных методов в геологии явилось применение материалов аэро- и космических съемок при изучении состояния и изменений верхней части литосферы под воздействием хозяйственной деятельности человека, проведении мониторинга геологической среды и составлении карт эколого-геологического содержания. С помощью космической геодезии исследуется динамика литосферных плит и внутриплитных деформаций, что имеет важное значение для определения геодинамических обстановок формирования геологических тел, разработки моделей образования и локализации месторождений полезных ископаемых. Основные направления применения аэрокосмических методов в геологии рассматриваются в коллективной монографии «Космическая информация в геологии» (1983) и книге немецкого ученого П. Кронберга «Дистанционное изучение Земли» (1988).

В 90-х гг. в практике зарубежных работ по региональному геологическому изучению территорий, прогнозированию и поиску месторождений полезных ископаемых широко используются цифровые данные многоспектральных космических съемок системами «Landsat MSS, TM» (США), «Spot X S, P» (Франция), «JERS-1» (Япония). В России начали функционировать космические многоспектральные и радиолокационные системы получения дистанционной информации в цифровом виде МСУ-М, МСУ-СК, МСУ-Э, Алмаз, а также фотографические системы высокого пространственного разрешения КФА-1000, МК-4 и др. В последние годы выполняются национальные программы исследования природных ресурсов, в т. ч. геологического строения, в Канаде, Китае, Бразилии,

Аргентине, предусматривающие использование данных с собственных космических съемочных систем.

Сейчас на высоте 370 км от земной поверхности функционируют несколько модулей Международной космической станции (МКС). Первый элемент станции был выведен на орбиту в 1998 г. После окончания сборки ее масса составит почти 400 тонн. В реализации данного технического проекта принимают участие 16 государств – Россия, США, Япония, Канада, Италия, Бельгия, Нидерланды, Дания, Норвегия, Франция, Испания, Германия, Швеция, Швейцария, Великобритания и Бразилия. В третьем тысячелетии МКС будет играть радикально новую роль в дистанционном изучении Земли и освоении космического пространства.

На современном этапе методы дистанционного зондирования широко применяются в изучении геологического строения территории Беларуси. На основе дешифрирования материалов многоспектральных и фотографических космосъемок («Метеор», «Ресурс», «Лэндсат», «Космос», «Салют») и аэросъемок (высотной, многозональной, радиолокационной и др.) составлены космогенетические и аэрофотогеологические карты соответственно в масштабах 1:1 000 000 (1:500 000) и 1:200 000 (1:100 000). Разработаны методические подходы к использованию аэрокосмической информации при выполнении геодинамических реконструкций новейшего и более древних этапов развития западного региона Восточно-Европейской платформы. Результаты комплексного анализа данных дистанционного зондирования и материалов геолого-геофизических съемок реализуются при выяснении закономерностей размещения полезных ископаемых (нефть, бурые угли, калийные соли, минеральное строительное сырье и др.), минерагеническом районировании, выявлении и локализации потенциально рудоносных объектов.

Большое внимание в Республике Беларусь уделяется внедрению методов дистанционного зондирования при решении проблем региональной геологии, геоэкологии и рационального природопользования. Подобные работы выполняет Республиканский научно-технический центр дистанционной диагностики природной среды «Экомир» (А. А. Ковалев, В. Н. Кузьмин и др.) и Научно-производственное предприятие «Космоаэрогеология» (О. И. Карасев, И. А. Тяшкевич и др.) в сотрудничестве с Белорусским государственным университетом (Б. И. Беляев, В. Н. Губин, Ю. М. Обуховский, Ф. Е. Шалькевич), с рядом академических и отраслевых организаций (В. Д. Коркин, А. Р. Понтус и др.).

На основе компьютерной обработки материалов прицельной космической съемки с ИСЗ «Ресурс-01», дешифрирования многозональных аэрокосмофотоизображений, применения географических информацион-

ных систем и спутниковой геодезии осуществляется оценка состояния и изменений геологической среды Солигорского горнопромышленного района и других территорий со сложной геоэкологической ситуацией. Особое значение приобретает использование материалов дистанционного зондирования при составлении мелко- и среднemasштабных эколого-геологических карт, организации аэрокосмического мониторинга геологической среды.

Результаты применения дистанционных методов в геологических исследованиях Белорусского региона освещены в коллективных монографиях – «Аэрокосмические исследования ландшафтов Беларуси» (1994), «Дистанционное картографирование природной среды» (1995), «Мониторинг природной среды дистанционными и геодезическими методами» (1996) и «Аэрокосмическое изучение экзогенных процессов в условиях техногенеза» (2003).

В настоящее время в Республике Беларусь имеются технические средства для приема необходимой информации дистанционного зондирования Земли с двух американских спутников NOAA и TERRA, а также с российского космического аппарата «Метеор-3М». Белорусскими учеными и специалистами Российского авиационно-космического агентства разработана Концепция создания Белорусской космической системы дистанционного зондирования. Запуск первого отечественного искусственного спутника Земли внесет реальный вклад в совершенствование природопользования, познание земных недр, обеспечение экологической безопасности и мониторинга окружающей среды, а также в развитие других сфер науки, техники и экономики.

Аэрокосмические методы в геологии в своем развитии прошли путь от визуального дешифрирования аэрофотоснимков до компьютерного анализа цифровых данных, получаемых в нескольких диапазонах электромагнитного спектра как с авиационных, так и с космических носителей. Круг задач, решаемых с использованием данных дистанционного зондирования, расширился от составления схем геологического строения хорошо обнаженных районов, до выявления глубинных структур платформенных областей с мощной толщей древнеледниковых отложений. Значительную роль стали играть материалы дистанционных съемок при геологическом картографировании, гидрогеологических, инженерно-геологических и эколого-геологических исследованиях. Методы космического зондирования открыли широкие перспективы в изучении строения других планет Солнечной системы.

2. МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗУЧЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ

В настоящее время в геологии используются различные виды аэрокосмических съемок, позволяющие изучать геологические объекты в видимой и ближней инфракрасной области электромагнитного спектра, в тепловом инфракрасном (среднем, дальнем) диапазоне и радиоволновом (радарном) спектральном интервале. Если при аэросъемках электромагнитные колебания Земли могут быть зафиксированы с высот не более 25 км, то при использовании космических аппаратов высота зондирования земной поверхности неограничена. Благодаря большим высотам съемки увеличивается площадь изучаемых геологических объектов и как следствие увеличивается обзорность и геоинформативность материалов дистанционных съемок (МДС).

Методы дистанционного зондирования различаются в зависимости от аппаратуры и носителей, используемых при съемках Земли. Выделяют две основные группы дистанционных методов – *фотографические* и *нефотографические*, или *оптико-электронные*. Аэрокосмическое фотографирование основано на принципе прямого оптического проектирования видимых лучей на светочувствительные фотослои. Подобное зондирование земной поверхности осуществляется в видимом и ближнем инфракрасном спектральном интервале. В дистанционных нефотографических методах регистрация электромагнитного излучения осуществляется в других участках спектра путем электронно-оптических преобразований электрических сигналов. Использование при зондировании Земли авиационных и космических носителей съемочной аппаратуры позволяет разделить дистанционные методы на аэро- и космические.

Особую группу дистанционных методов составляют *визуально-инструментальные наблюдения* земной поверхности. Они проводятся космонавтами с пилотируемых кораблей и долговременных орбитальных станций. Важную роль при геологических исследованиях, особенно труднопроходимых таежных районов, играют аэровизуальные наблюдения с борта самолета или вертолета.

2.1. Физические основы и техника аэрокосмических съемок

Дистанционные методы позволяют изучать физическое поле Земли на расстоянии с целью получения информации о строении литосферы.

Физической основой дистанционного зондирования является отраженное либо собственное излучение электромагнитных волн природными объектами. Под *электромагнитным излучением* понимают распространение энергии в пространстве в виде волн или прямолинейного потока световых частиц (фотонов). Электромагнитные колебания имеют широкий диапазон длин волн. Общий спектр электромагнитного излучения различается по частоте и делится на несколько областей, называемых зонами (диапазонами) спектра. Для измерения длин волн в коротковолновом участке спектра в большинстве случаев используют следующие единицы: микрон или микрометр (мкм) и нанометр (нм). $1 \text{ мм} = 10^3 \text{ мкм} = 10^6 \text{ нм}$. Выделяют следующие основные диапазоны электромагнитных волн: ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный и радиодиапазон.

Дистанционное зондирование Земли проводится через толщу атмосферы. При прохождении через атмосферу электромагнитные волны взаимодействуют с содержащимися в ней частицами пыли, дыма, кристалликами льда, каплями воды и т. п. Атмосфера пропускает солнечные лучи определенных длин волн. Другую часть лучей атмосфера задерживает, отражая, рассеивая и поглощая их. Участки спектра, в пределах которых электромагнитные волны хорошо проходят сквозь атмосферу, достигая приемных устройств систем дистанционного зондирования, называют окнами прозрачности атмосферы (рис.1). Для съемки земной поверхности с авиационных и космических аппаратов используются следующие диапазоны волн:

- видимый диапазон 0,4–0,8 мкм;
- ближний инфракрасный диапазон 0,8–1,5 мкм;
- тепловой инфракрасный диапазон 3,5–5 и 8,0–14 мкм;
- сверхчастотный радиодиапазон 0,3–100 см.

Причем для геологических целей наибольшей геоинформативностью отличается видимый и ближний инфракрасный (ИК) диапазон. По мнению космонавта, профессора В. П. Савиных около 80 % информации, поступающей в настоящее время из космоса, приходится на этот диапазон.

Геологические объекты (горные породы, структурные элементы, формы рельефа земной поверхности) испускают электромагнитные волны, которые содержат как собственное излучение, так и отраженное излучение энергии Солнца. Экспериментальными исследованиями установлено, что величина и характер электромагнитных колебаний во многом зависит от структурных и литологических особенностей

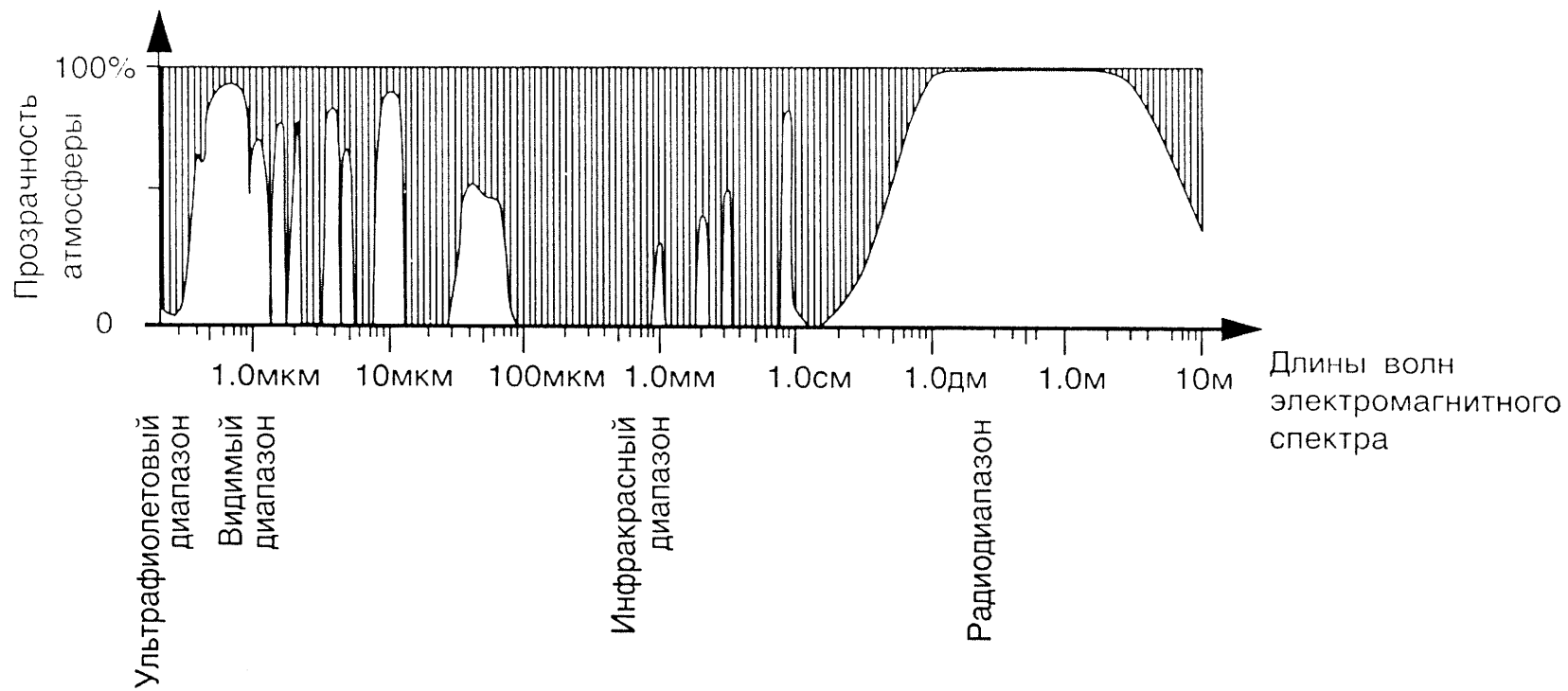


Рис. 1. Прозрачность атмосферы для электромагнитных волн (по Ю. Ф. Книжникову и др.)

поверхности литосферы. Существующие различия в электромагнитном излучении разнородных геологических образований позволяет применять для их изучения методы дистанционного зондирования.

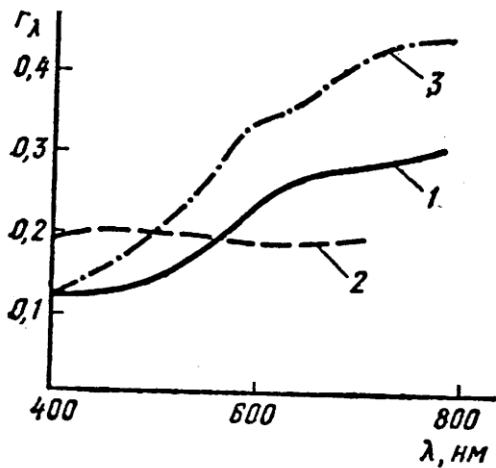


Рис. 2. Коэффициенты спектральной яркости пород: 1 – изверженных (гранит рапакиви), 2 – метаморфических (роговообманковый гнейс), 3 – осадочных (барханный песок светло-желтого цвета)

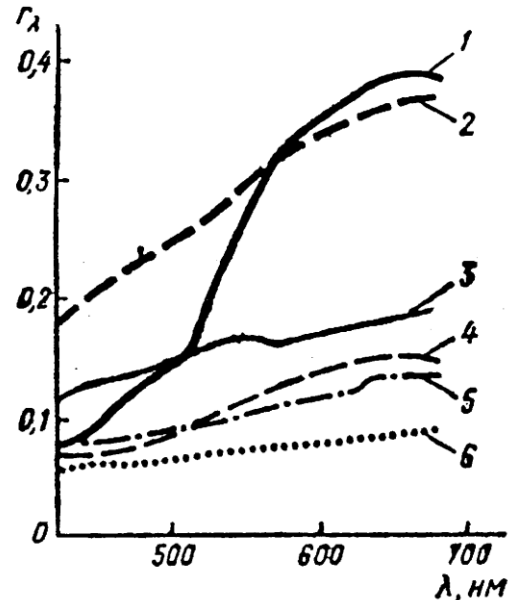


Рис. 3. Коэффициенты спектральной яркости основных видов почв: 1 – краснозем, 2 – серозем, 3 – дерново-подзолистая, 4 – темно-каштановая, 5 – лесная темно-серая, 6 – чернозем

Анализ спектральной отражательной способности геологических образований показывает, что получение наибольшего объема геоинформации возможно при дистанционном зондировании в видимой и ближней ИК-области спектра – 0,4–1,5 мкм. По данным Е. Л. Кринова и Ю. С. Толчельникова, спектральные коэффициенты яркости геологических объектов имеют тенденцию возрастать по мере продвижения в длинноволновую часть спектра. Некоторые кривые спектральной отражательной способности проходят через максимум в разных участках спектра. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены кривые спектральной яркости изверженных, метаморфических и осадочных горных пород, а также основных типов почв.

Техника аэрокосмических съемок включает различные виды аппаратуры регистрации электромагнитного излучения природных объектов, установленной на авиационные или космические носители. Съемочные системы, применяемые в дистанционных методах, должны обеспечить

получение изображений земной поверхности, пригодных для геологического дешифрирования (визуального, автоматизированного). Подобные технические средства подразделяют на фотографические и оптико-электронные. В зависимости от аппаратуры, используемой при дистанционной регистрации отраженного или собственного электромагнитного излучения Земли, выделяют следующие основные виды аэрокосмических съемок земной поверхности: фотографирование (0,4–0,9 мкм), телевизионная съемка (0,4–1,1 мкм), многоспектральная сканерная съемка (0,3–12,6 мкм), спектрометрирование (0,4–2,5 мкм), тепловая инфракрасная съемка (3,5–5 и 8,0–14 мкм) и радиолокационная съемка (0,3 см и более).

Следует отметить, что фотографирование, спектрометрирование, телевизионная, многоспектральная и инфракрасная съемки земной поверхности считаются пассивными дистанционными методами, так как они используют естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов, а также температурные неоднородности земных недр. Радиолокационные методы зондирования называют активными, поскольку они работают в микроволновой области излучения, создаваемого искусственным источником направленного действия.

Аэрокосмические носители аппаратуры дистанционного зондирования обеспечивают проведение съемок Земли с различных высот. Носители съемочной аппаратуры делятся на две основные группы: авиационные и космические. Аэросъемку производят с самолетов, вертолетов и других воздушных летательных аппаратов. Для выполнения аэросъемочных работ широко используются самолет АН-30, который оборудован комплексом аэросъемочной аппаратуры и обеспечивает фотографирование в масштабах от 1:5000 до 1:140 000. Новый самолет-зондировщик «Геофизика» рассчитан для аэросъемок (фотографической, многоспектральной, тепловой, радиолокационной) с высоты полета до 21 тыс. метров.

Аэросъемочная аппаратура устанавливается также на вертолетные носители Ка-26, МИ-4 и др. Для дистанционного зондирования природной среды и решения прикладных, в том числе геологических задач, в РНТЦ «Экомир» (г. Минск) разработана и эффективно применяется вертолетная лаборатория МИ-8МТ, оснащенная фотографическими и оптико-электронными системами.

Искусственные спутники Земли (ИСЗ) являются наиболее распространенными носителями оптико-электронной аппаратуры. Большой объем космической информации, используемой при решении геологических задач, получен с метеорологических ИСЗ «Метеор», «Тайрос»,

«Нимбус» и др. К настоящему времени по российской программе «МЕТЕОР» запущено более 50 космических аппаратов.

Для геологических целей важную роль играют запуски ресурсных спутников серии «Ресурс», «Алмаз», «Лэндсат», «Спот» и других космических систем, оснащенных оптико-электронной аппаратурой с высоким пространственным разрешением. Автоматические ИСЗ серии «Космос» оборудуются для съемок земной поверхности фотографическими камерами. Технология фотосъемки рассчитана на возвращение отснятых фотопленок при помощи спускаемых на Землю аппаратов.

Космическая фотосъемка земной поверхности осуществлялась с пилотируемых космических кораблей («Восток», «Восход», «Союз», «Меркурий», «Джемини», «Аполлон» и др.), орбитальных станций («Салют», «Мир», «Скайлэб») и кораблей многоцелевого пользования серии «Спейс Шаттл» («Колумбия», «Дискавери» и др.). Космонавты выполняют съемку более целенаправленно, выбирая благоприятные внешние условия и объекты фотографирования.

В составе орбитальной станции «Мир» действовал модуль дистанционного зондирования Земли «Природа». Пристыковка модуля к станции «Мир» осуществлена в апреле 1996 г. Установленная на модуле «Природа» аппаратура дистанционного зондирования, позволяла проводить съемку практически во всех спектральных интервалах, включая ультрафиолетовый, видимый, ИК и микроволновой диапазоны. Причем наблюдение земной поверхности осуществлялось как в пассивном режиме, так и при помощи активной радиолокации.

В настоящее время на околоземной орбите работает Международная космическая станция. Среди планируемых на ней научно-технических исследований и экспериментов важную роль играет отработка новых систем и приборов космической съемки Земли.

При дистанционном зондировании земной поверхности большое внимание уделяется определению ориентации авиационных и космических средств. Для этих целей применяются **спутниковые навигационные системы**. В них закладываются радиотехнические принципы получения навигационных данных.

Одной из подобных спутниковых систем являются NAVSTAR GPS. Она обслуживает неограниченное число подвижных и стационарных объектов, которые могут находиться в разных точках Земли, в воздухе, околоземном космическом пространстве, в любых метеорологических условиях. В системе NAVSTAR используется навигационная информация спутников, размещенных на шести орбитах. Такая структура дает

возможность уверенно работать не менее, чем с четырьмя спутниками. Система NAVSTAR включает передатчик дециметровых волн, который непрерывно передает сигналы, предназначенные для определения навигационно-временных параметров.

Бортовой комплекс NAVSTAR GPS, установленный на авиационных носителях, служит для приема навигационных сообщений. Система позволяет оперативно определить местоположение, путевую скорость, истинный путевой угол, время полета до выбранных путевых точек и другие характеристики.

На борту вертолета-лаборатории МИ-8МТ применяется навигационная система GPS с приемной аппаратурой TRANSPAK. Она обеспечивает работу с 8–10 ИСЗ, позволяя определить местонахождение воздушного судна в географической системе координат в градусах, минутах, секундах. Точность навигационных данных: координаты – 15 м, высота – 50 м, скорость – 0,5 м/с. Бортовой вычислительный комплекс связан с аэрофотоаппаратом для отметки координат центров снимков и со сканирующим многозональным комплексом видимого и теплового ИК-диапазона для нанесения меток координат на тепловые картины земной поверхности.

Спутниковые навигационные системы GPS имеют важное практическое значение для топографо-геодезических работ. Использование спутниковых приемников WILD GPS-SYSTEM 200 позволяет создать геодезическую основу для проведения геологической съемки (топопривязка геофизических профилей, буровых скважин и др.), обеспечения аэрокосмического мониторинга геологической среды на региональном, локальном и детальном уровнях исследований.

2.2. Фотографические методы

Среди широкого спектра дистанционных методов важнейшую роль в геологических исследованиях играют аэрокосмические фотосъемки Земли. Они дают наиболее детальную информацию о пространственно-временной структуре земной поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазоне (0,4–0,9 мкм).

Принципы фотосъемки. Фотографическая съемка производится с воздушных и космических летательных аппаратов фотокамерами, имеющими объективы с разным фокусным расстоянием. При одинаковой высоте съемки, чем длиннофокуснее объектив фотокамеры, тем крупнее масштаб полученных снимков. Применение для съемок многозональных фотокамер обеспечивает фотографирование земной поверхности в узких спектральных зонах.

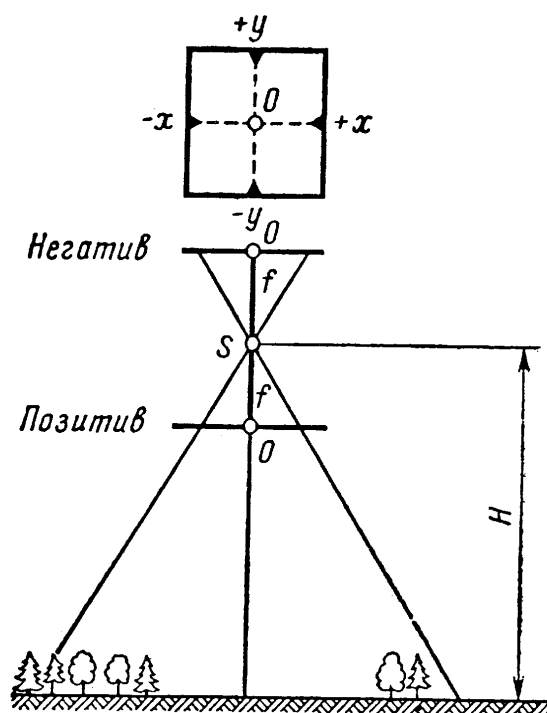


Рис. 4. Геометрическая схема получения кадрового аэрофотоснимка

Центральное место среди фотографических съемочных камер занимает аэрофотоаппарат (АФА), с помощью которого выполняется фотосъемка с самолета или вертолета. На рис. 4 изображена геометрическая схема получения снимка кадровым АФА. Здесь S – центр проектирования снимка, совпадающий с центром объектива; f – фокусное расстояние камеры – длина перпендикуляра, опущенного из центра проектирования на плоскость снимка, и O – главная точка снимка – основание перпендикуляра. Прямая, проходящая через главную точку снимка и центр проектирования, определяет направление съемки.

Полученные фотографирующими системами аэро- и космические снимки обладают различными геометрическими свойствами, которые обусловлены масштабом, разрешающей способностью фотоизображения и разрешением объектов на земной поверхности. Кроме того, важным показателем, характеризующим снимок, является коэффициент спектральной яркости.

Масштаб снимка ($1/m$) равен отношению фокусного расстояния объектива фотокамеры (f_k) к высоте фотографирования (H):

$$1/m = f_k/H.$$

Величина фокусного расстояния объектива фотокамеры постоянна для данного аппарата. Высота фотографирования сохраняется неизмен-

ной только при съемке равнинной местности. Точность определения масштаба снимка целиком зависит от точности определения высоты полета авиационного либо космического носителя.

В зависимости от масштаба снимка находится и его разрешающая способность, которая представляет собой число раздельно фотографически воспроизводимых на отрезке 1 мм черно-белых штрихов. Разрешение на местности равно наименьшим размерам воспроизводимых объектов земной поверхности на снимке.

Аэрофотосъемка выполняется с авиационных носителей, обычно в масштабе 1:25 000 и крупнее. Рациональной является аэрофотосъемка с помощью двух синхронно работающих АФА. Благодаря такой съемке возможен анализ разномасштабных АФС одной и той же территории в одинаковых природных условиях. На территории Беларуси для геологических целей широко применяются снимки, выполненные основным АФА-42/20 в масштабе 1:25 000 и дополнительными АФА-ТЭ-100 в масштабе 1:50 000. Высота фотографирования порядка 5 тыс. м над уровнем моря.

Выделяют также высотную аэрофотосъемку, которая выполняется при высоте полета самолета от 6 до 12 тыс. м. При съемке получают снимки масштабов 1:100 000–1:240 000. Мелкомасштабные АФС обладают большой обзорностью и по геоинформативности вполне сопоставимы с космическими фотоснимками сходного масштаба. Такая съемка нашла применение для получения снимков горных районов. Имеется опыт проведения высотной аэрофотосъемки равнинных территорий. Например, в Беларуси эффективно применяются в геологии снимки, полученные при высотной аэрофотосъемке основным АФС-ТЭС-5 в масштабе 1:210 000 и дополнительным АФА-42/20 в масштабе 1:55 000.

При аэрофотографировании используются панхроматические, ортохроматические, инфрахроматические и другие виды аэропленок. Из цветных пленок наиболее распространенной является трехслойная аэропленка ЦН-3. Для получения изображений в условных цветах применяют в основном спектрзональные двухслойную (СН-6) и трехслойную (СН-23) пленки. Каждая из двух (трех) слоев этих пленок имеет максимум светочувствительности в определенной зоне электромагнитного спектра, что дает наибольшее количество условных цветовых градаций. Спектральные пленки обеспечивают регистрацию в видимом и ближнем ИК-диапазонах.

С появлением аэрофотопленок с широкой полосой чувствительности от 400 до 800 нм (типа МШ-4) стало возможным производить **многозональную аэрофотосъемку** фотокамерами МКФ-6М, АС-707, МСК-4 и

др. Они имеют четыре или шесть объективов и синхронно работающие затворы. Каждый объектив снабжен светофильтром, который в сочетании с пленкой разной спектральной чувствительности позволяет получить изображение геологического объекта в достаточно узкой зоне спектра. Так, камера АС-707, входящая в состав аэросъемочной аппаратуры вертолета-лаборатории МИ-8МТ, имеет четыре фотографических канала в синем (400–500 нм), зеленом (480–600 нм), красном (580–700 нм) и ближнем ИК (700–860 нм) спектральных диапазонах и предназначена для выполнения плановой аэрофотосъемки с высот от 50 до 1000 м.

Фотографирование земной поверхности может производиться при разных положениях оптической оси АФА. В данном случае выполняют *плановую* либо *перспективную аэрофотосъемку*. Съемка и снимки называются плановыми, если углы наклона не превышают $1,5\text{--}2^{\circ}$. Обычно АФА устанавливают на специальные гироскопические устройства, обеспечивающие вертикальное положение оптической оси АФА и получение плановых (горизонтальных) снимков. Фотографирование при наклонном положении оптической оси АФА называется перспективной съемкой. Для геологических исследований наибольшей геоинформативностью отличается плановая аэрофотосъемка.

В зависимости от характера покрытия местности АФС различают *маршрутную* и *площадную аэрофотосъемку*. Маршрутной аэросъемкой называется воздушное фотографирование полосы местности по определенному маршруту, например, по долине крупной реки. Площадное аэрофотографирование осуществляется в тех случаях, когда необходимо заснять значительную территорию для целей геологического картографирования. Такая съемка производится по прямолинейным параллельным маршрутам. Полученные при площадной аэросъемке АФС перекрываются между собой. Продольное перекрытие между снимками составляет не менее 57–60 % от размера кадра и увеличивается в горных районах. Перекрытие между АФС смежных маршрутов (поперечное перекрытие) обычно задается равным 30–40 %. Подобная аэросъемка земной поверхности позволяет увязать АФС между собой, способствует стереоскопическому дешифрированию геологических объектов, изготовлению фотосхем (планов) в качестве основы для составления геологических карт.

С целью повышения геоинформативности АФС аэрофотосъемку выполняют в определенные *сезонные периоды*. Оптимальными сроками фотографирования геологических объектов (не залесенных) на территории Беларуси являются ранневесенний и позднесенний подсезоны. В это

время коэффициенты спектральной яркости покровных отложений отличаются высокими значениями в оранжевой, красной и ИК-областях спектра. Наибольший эффект дают съемки на изопанхроматические (Т-18, Т-22, Т-28) и спектрзональные (СН-6, СН-10, СН-23) со светофильтром ЖС-18 или ОС-14. Благоприятны для съемки ясная, безоблачная погода, первая половина дня, желательно – утренние часы. Оптимальная высота солнца – 20–30°. При съемке в условиях облачности, задымленности атмосферы, когда видимость не превышает 10–12 м, и при других погодных явлениях, уменьшающих спектральную яркость ландшафта, следует сокращать время экспозиции или применять светочувствительные изопанхроматические пленки.

Съемки с помощью АФА проводят с применением специальных приборов. Выдержку, диафрагмирование и светофильтры устанавливают расчетным путем, проверяют по результатам пробного залета. Соблюдая основные природные и технические условия аэрофотосъемок, можно получить наиболее информативные МДС для целей геологического дешифрирования.

Космическая фотосъемка производится с высот более 150 км. Основными средствами регистрации являются фотокамеры МКФ-6М, КАТЭ-140, МК-4 и др. Космические фотоаппараты разделяют на автоматизированные камеры, устанавливаемые на пилотируемых космических кораблях и орбитальных станциях, и полные автоматы для съемок с беспилотных космических средств, с последующим возвращением отснятой пленки на Землю.

Высокой геоинформативностью отличаются космические фотоснимки (КФС), получаемые многозональными фотокамерами. Так, фотосъемка камерой МКФ-6М осуществляется в шести зонах спектра: 450–500; 520–560; 580–620; 640–680; 700–740 и 780–860 нм. Полоса пропускания электромагнитных волн для 1–5 каналов –40 нм, для 6 канала –100 нм. Каждый канал оснащен объективом «Пинатар» с фокусным расстоянием 125 мм с разными светофильтрами и пленкой. Многозональная фотосъемка камерой МКФ-6М выполнялась с космических аппаратов серии «Союз», «Салют», «Космос», а также с самолета-лаборатории АН-30. Камера КАТЭ-140 и ее разновидности (КАТЭ-200, КАТЭ-1000) устанавливались на аппараты серии «Союз», «Салют», «Космос», «Мир».

Из современных космических фотоаппаратов следует отметить многозональную камеру МК-4, которая имеет четыре объектива с фокусным расстоянием 300 мм. Съемка осуществляется в четырех из шести спектральных зон: 400–700; 460–585; 515–565; 580–800; 635–690 и 810–900 нм.

Разрешение объектов на местности составляет 5–15 м. Съемка камерой МК-4 производится со спутников серии «Космос» с околоземных орбит высотой 200–400 км. В зависимости от высоты фотографирования масштаб получаемых снимков колеблется от 1:1 500 000 до 1:150 000.

В результате дистанционного фотографирования получают материалы аэро- и космических съемок следующих видов: контактная печать в виде отдельных АФС либо КФС, увеличенные фотоизображения, фотосхемы, фотопланы, репродукции накидного монтажа.

Фотоснимки, или контактные отпечатки с аэро- (космо) фильма изготавливаются на светочувствительной бумаге. Увеличенные снимки получают в результате проекционной печати. На них выявляются более мелкие детали и полнее наносятся данные дешифрирования.

Фотосхемы монтируют из центральных частей АФС или КФС, наклеивая их на картон либо иную жесткую основу. Эти фотоматериалы значительно увеличивают обзорность, что дает возможность выявлять общие геологические закономерности территории. Уточненные фотосхемы изготавливают из предварительно трансформированных снимков, на которых устранены искажения, вызванные наклоном АФА или колебаниями высоты полета. По точности уточненные фотосхемы могут служить топоосновой для геологических карт масштаба 1:25 000 и мельче.

Более высокой точностью отличаются фотопланы, которые составляются в основном из АФС. При их создании координаты точек местности, опознанные на снимках, определяются геодезическим способом. Фотопланы обычно изготавливаются для равнинных областей и пригодны для составления геологических карт любого масштаба.

Репродукции накидного монтажа получают фотографированием с многократным уменьшением всех снимков данной трапеции, наложенных друг на друга по идентичным контурам. Такой монтаж используется для подбора снимков на планшете топографической карты или его часть, для обеспечения снимками территории планируемых геологических исследований.

Материалы аэро- и космических фотосъемок нашли применение во всех видах геологических исследований. На их основе проводят геолого-съемочные и поисковые работы всех масштабов; изучают тектонику и геодинамический режим территорий; выявляют структурные факторы, контролирующие размещение рудной минерализации, ловушек нефти и газа; выполняют гидрогеологические, инженерно-геологические, геоморфологические и эколого-геологические исследования.

Среди различных видов фотографических методов дистанционного зондирования высокой геоинформативностью отличается многозональная аэро- и космическая съемка. Преимущество подобного фотографирования определяется возможностью лучшего распознавания геологических объектов по малозаметным в природе цветовым различиям, наиболее выраженным в тех или иных зонах спектра.

Использование многозональных снимков позволяет получить дифференцированные изображения в узких диапазонах спектра и интегральные изображения в видимой и ближней ИК-областях. По сравнению с традиционной съемкой в видимом диапазоне расширяется объем извлекаемой информации как за счет большого (4–6 и более без учета синтеза) числа снимков на одну и ту же территорию, их более высокого разрешения на местности, так и за счет увеличения отдешифрованных объектов в результате детальной проработки их индикационных признаков в узких зонах спектра.

Проведение многозональной съемки эффективно для изучения территорий со следующими геолого-ландшафтными условиями:

1) складчатые области с разнородным литологическим составом горных пород наряду с их сильной тектонической дислоцированностью, в особенности, когда размеры отдельных картографируемых тел существенно меньше плотности маршрутной сети (например, участки развития интрузивных даек и жил);

2) районы со сложным характером распределения геологических тел, когда границы между ними имеют извилистую конфигурацию или выражены постепенными переходами;

3) платформенные области в случае отражения в осадочном чехле погребенных структурных форм (например, при поисках нефтегазоносных структур);

4) в гумидной лесной зоне при ландшафтной индикации четвертичных отложений.

Для изучения геологического строения областей древнематерикового оледенения более информативными являются красная зона видимого спектра и ближний ИК-диапазон.

Широкое использование в геологических исследованиях получили фотографические снимки с околоземных орбит высотой 200–400 км. Дешифрирование КФС масштабов 1:1 000 000–1:200 000 позволяет получать данные о геологических и геоморфологических объектах регионального и локального порядка: кольцевых структурах, линейментах, литолого-стратиграфических комплексах, мезоформах рельефа и т. п. При

этом достигается возможность увязки разрозненных элементов крупных структур. Разрешающая способность КФС (от 15 м до 1–3 м) позволяет их увеличивать для рассмотрения различных деталей земной поверхности, что имеет важное значение при проведении геологической съемки и картографировании.

2.3. Оптико-электронные методы

Большую группу дистанционных методов геологических исследований образуют аэрокосмические съемки Земли, осуществляемые с помощью нефотографических съемочных систем. Подобное зондирование земной поверхности выполняется телевизионными камерами, сканирующими устройствами, спектрометрической аппаратурой, радиолокаторами и др. В зависимости от используемых съемочных систем оптико-электронные методы позволяют изучать геологические объекты в широком интервале электромагнитных волн: от видимого спектра до сверхчастотного радиодиапазона. Рассматриваемая группа методов дистанционного зондирования включает телевизионную съемку, многоспектральную сканерную съемку, спектрометрирование, тепловую инфракрасную и радиолокационную съемки.

Телевизионная (ТВ) съемка. Дистанционное зондирование в видимой и ближней ИК-области спектра электромагнитных колебаний (0,4–1,1 мкм) может выполняться с помощью телекамер. ТВ-съемка отличается от фотографической тем, что дает изображения с меньшим разрешением на местности. Однако подобное зондирование имеет свои преимущества – большая обзорность ТВ-снимков и оперативность их получения.

Космическая ТВ-съемка производится ежедневно с охватом всей земной поверхности с высот 600–1000 км при ширине полосы обзора от 1000 до 2500 км. Технология проведения ТВ-съемки включает регистрацию электромагнитного спектра при помощи телекамеры. Изображение поступает на приемно-передающее устройство камеры–видикон. Отсюда электромагнитные сигналы по радиоканалу в фототелеграфном режиме поступают на приемные станции на Землю, либо записываются на магнитную ленту. На приемных станциях телесигналы усиливаются и преобразуются в видимое телевизионное изображение, фотографируемое с телеэкрана специальным устройством.

ТВ-аппаратура дистанционного зондирования может включать несколько черно-белых видеокамер с различными светофильтрами, либо состоять из одной камеры с несколькими телеканалами. В последние годы отмечается тенденция использования ТВ-камер, работающих в ИК-области

спектра в диапазоне 2–15 мкм. В них передающими элементами служат полупроводниковые и пироэлектрические видиконы.

Впервые ТВ-системы были установлены на метеорологических ИСЗ, в том числе «Метеор» и «Нимбус». Технические параметры ТВ-съемки с ИСЗ «Метеор-1» следующие: высота полета – 620–890 км; полоса захвата – 1000–1400 км; разрешение на местности – 1,25–1,70 км; спектральный диапазон – 0,4–0,7 мкм.

ТВ-камеры могут входить в состав аппаратных комплексов дистанционного зондирования с авиационных носителей. Это позволяет получать изображения местности в цифровой форме непосредственно в процессе проведения аэросъемочных работ, осуществлять запись видеoinформации, а также вести обработку ТВ-изображений с помощью ПЭВМ.

Значение космической ТВ-съемки в комплексе региональных геологических исследований определяется ее основными преимуществами: охватом местности в тысячи километров, высокой степенью генерализации ТВ-изображений, возможностью регулярного получения этой информации почти по любому району земного шара. По ТВ-снимкам дешифрируются отдельные части трансконтинентальных линейных элементов (Сарматско-Туранский и др.), суперрегиональные разломы и крупнейшие складчатые структуры типа мегантиклиналий. Возможности изучения по ТВ-изображениям литолого-стратиграфических комплексов крайне ограничено.

По телеснимкам, полученным с ИСЗ «Метеор» была составлена карта линейных и кольцевых структур Восточно-Европейской платформы, выполнено геологическое дешифрирование территории Приенисейской Сибири и других регионов. Исследованиями В. И. Астахова, И. И. Башиловой, В. Я. Еременко и др. показано, что основная информация, получаемая с помощью ТВ-снимков, носит тектонический и особенно неотектонический характер и пригодна при составлении мелкомасштабных тектонических карт.

Многоспектральная съемка выполняется сканерными системами, которые устанавливаются как на космические, так и авиационные носители. Подобное зондирование Земли широко применяется в геологических исследованиях.

В многозональных сканерах излучение, поступающее от природного объекта, отражается от сканирующего элемента (вращающегося или качающегося зеркала), попадая через объектив в точечный датчик. Этот прибор преобразует световой сигнал в электрический и разделяет его на ряд зон (полос-сканов), каждый элемент которых (пиксел) регистрирует-

ся отдельно. В результате преобразования исходного многомерного пространства природных образований формируется другое многомерное пространство в виде сканерного изображения. Каждому элементу такого изображения соответствует яркость излучения природных образований, находящихся в момент регистрации в поле зрения сканирующего устройства.

При сканерной съемке используется участок видимого спектра электромагнитного излучения и ИК-диапазон. Отличительная черта сканерных устройств – способность воспроизводить изображение земной поверхности в узких зонах – до 40 нм. Полученная при помощи сканирующих устройств информация поступает по радиоканалу в наземные приемные центры, где в цифровом виде записывается на магнитную ленту и параллельно визуализируется на фототелеграфном аппарате в виде снимков.

Многоспектральными сканерами оборудованы спутники «Метеор-2», работающие в различных диапазонах в видимой и ближней ИК-частях спектра. Масштаб снимков, получаемых в результате съемки многоспектральным сканером (МСС) малого разрешения на борту ИСЗ «Метеор-2» равен 1:6 000 000, разрешение на местности – 1 км, масштаб снимков МСС среднего разрешения – 1:2 500 000, разрешение на местности – около 250 м.

Для оперативного сбора видеоинформации разработана многоспектральная сканирующая система «Фрагмент», с помощью которой съемки земной поверхности с борта спутника «Метеор-2» проводятся в восьми интервалах электромагнитного спектра в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Ширина полосы обзора в системе «Фрагмент» составляет 85 км, разрешение – около 80 м; процессы получения и обработки космической информации автоматизированы.

В геологических целях важное значение приобретает космическая информация с российских ИСЗ «Ресурс-01». Спутники этой серии оснащены аппаратурой высокого и среднего разрешения и обеспечивают съемку Земли в нескольких спектральных диапазонах. Информационные возможности ИСЗ «Ресурс-01» сопоставимы с возможностями американской космической системой «Лэндсат».

На ИСЗ «Ресурс-01» в качестве датчиков дистанционного зондирования используются многозональные сканирующие устройства двух типов: оптико-электронные высокого разрешения (МСУ-Э) и оптико-механические среднего разрешения с конической разверткой (МСУ-СК).

Камера МСУ-Э имеет следующие технические характеристики: спектральные диапазоны – 0,5–0,6; 0,6–0,7 и 0,8–0,9 мкм; пространственная разрешающая способность – 45 м; ширина полосы обзора – 45 км.

Устройство МСУ-СК работает в диапазонах – 0,5–0,6; 0,6–0,7; 0,7–0,8; 0,8–1,1 мкм (видимые и ближние ИК- участки спектра) и 10,4–12,6 мкм (тепловой ИК-диапазон); пространственное разрешение камеры – 140 и 550 м (в зависимости от спектральных диапазонов); ширина полосы обзора – 600 км.

Для сравнения приведем параметры многоспектрального сканера MSS, который устанавливался на космические аппараты «Лэндсат-3,4 и 5»: разрешение – 80 м; используемые спектральные диапазоны – 0,49–0,605 мкм (зеленый), 0,603–0,698 мкм (красный), 0,701–0,813 мкм (красный-ближний ИК) 0,808–1,23 мкм (ближний ИК); зона обзора – 185 км.

На ИСЗ «Метеор-3М» (находится на орбите с 2001 г.) установлен многоспектральный радиометр (МСР) и МСУ-Э. МСР обеспечивает построение изображений Земли в видимом и ближнем ИК и тепловом ИК-диапазонах спектра. МСР имеет следующие технические характеристики: спектральные диапазоны – 0,5–0,7; 0,8–1,0; 10,4–11,3 и 11,5–12,5 мкм; пространственное разрешение – 1 км; радиометрическая точность в тепловых ИК-диапазонах – 0,15 К; ширина полосы обзора – 2700 км. Данные сканирующего устройства МСУ-Э сходны с «Ресурс-01».

Действующий сегодня спутник «Лэндсат-7» был запущен в 1999 г. Установленный на спутнике сканирующий радиометр ЕТМ обеспечивает съемку земной поверхности в шести каналах с разрешением 30 м, в одном ИК-диапазоне – 60 м и одновременную панхроматическую съемку с разрешением 15 м при ширине полосы обзора для всех каналов 185 км.

Сканирующими устройствами оборудуются также авиационные носители. На самолете-зондировщике «Геофизика» оптический многоспектральный сканер обеспечивает с высоты полета 20 км полосу обзора 28 км и разрешающую способность 30 м.

Главное преимущество сканерной съемки: 1) многоканальность, обеспечивающая получение изображений геологических объектов в различных спектральных диапазонах (в узких интервалах); 2) оперативность, позволяющая передавать изображения по радиоканалам; 3) изображения объектов представляются в цифровом (электронном) варианте, что позволяет проводить геологическое дешифрирование сканерных космических снимков (КС) с помощью автоматических систем; 4) сканерные КС могут быть преобразованы специальным устройством в виде фотографических изображений.

Материалы космической сканерной съемки нашли широкое применение в геологии. На основе сканерных КС были составлены мелкомасштабные космогенетические карты Арало-Каспийского региона, территории Украины, западной части Восточно-Европейской платформы и многих других регионов.

Результаты космогеологических исследований территории Беларуси показывают, что высокой геоинформативностью отличаются сканерные изображения, выполненные с ИСЗ «Метеор-2 и 3», «Ресурс-01» и «Лэндсат-3» в красном и ближнем ИК-диапазонах. Геологическое дешифрирование этих снимков позволило выявить пространственное распределение линейных и кольцевых структур разного порядка (от суперрегиональных до локальных); изучить особенности развития ротационно-планетарных процессов; оконтурить гляциодинамические формы рельефа земной поверхности; определить области питания и разгрузки подземных вод; составить серию космогенетических и прогнозных карт масштабов 1:1 000 000–1:200 000 и др.

Важную роль в эколого-геологическом картографировании и ведении литомониторинга играет прицельная сканерная съемка с ИСЗ «Ресурс-01». В основе подобного зондирования земной поверхности лежит свойство оптической оси сканера отклоняться на управляемый угол, что позволяет последовательно регистрировать с одного витка трассы космического аппарата множество отдельных участков местности, а каждый из них снимать в течение одного периода глобального обзора не с одного, а со многих витков. При этом наибольшую информативность имеют цифровые изображения, полученные многозональным сканирующим устройством высокого разрешения МСУ-Э. По КС, визуализированным в масштабе 1:100 000, возможно изучение проявлений экзогенных геологических процессов, изменений уровня режима подземных вод и других трансформаций верхней части литосферы под воздействием техногенеза.

Дистанционное спектрометрирование Земли позволяет измерять спектральный состав излучения, отраженного природными объектами в диапазоне электромагнитного спектра 0,4–2,5 мкм. Отраженное земной поверхностью излучение проходит в спектрометрах через собирающую оптическую систему и разделяется специальным устройством на спектральные составляющие. Их амплитуды измеряются и регистрируются.

Первое успешное космическое спектрофотометрирование было проведено космонавтом В. И. Севастьяновым с корабля «Союз-9» в 1970 г. По данным спектрометрирования с орбитальных станций «Салют-4, 6» осуществлялось изучение геосистем белорусскими учеными (Б. И. Бе-

ляев, Л. И. Киселевский, А. А. Ковалев и др.). Дистанционное спектрометрирование позволяет классифицировать спектральные яркости литологического состава горных пород и других природных образований, описанных Е. Л. Криновым при наземных исследованиях.

Примерами спектрометрической аппаратуры, разработанной в Беларуси, могут служить спектрометрические системы «СКИФ» и «ГЕММА». Система «СКИФ» обеспечивает измерение спектрального состава излучения в одном из 5 спектральных интервалов: 0,39–1,1; 0,39–0,59; 0,56–0,73; 0,72–0,88; 0,84–1,1 мкм. «ГЕММА» работает в спектральном диапазоне 0,4–0,88 мкм. Максимальное число спектральных каналов – 450, средняя ширина спектрального канала составляет 2–3 нм. Спектрометрической аппаратурой оснащена вертолетная лаборатория МИ-8МТ, получившая широкое применение в изучении природной среды Белорусского региона.

Спектрометрическая съемка в геологических целях информативна в видимом и ближнем ИК-спектральном диапазоне (0,4–1,4 мкм). Такая съемка позволяет измерять отражательную способность горных пород. Последние имеют различную отражательную способность и поэтому отличаются величиной коэффициента спектральной яркости. Познание значений коэффициентов спектральной яркости горных пород расширяет возможности геологического дешифрирования, в том числе с использованием компьютерных технологий. Геологические объекты отражаются на снимках с разной степенью контраста, зависящего от их спектральных особенностей.

Инфракрасная (ИК) съемка проводится с целью регистрации теплового излучения геологических объектов с космических аппаратов и самолетов в интервалах длин волн преимущественно 3,5–5 и 8–14 мкм. ИК-зондирование осуществляется с помощью сканирующих систем и последующей визуализацией радиационных изменений в форме тепловых карт. Последние отображают пространственно-временное распределение температурных контрастов земной поверхности и структурных форм литосферы.

Пороговая чувствительность ИК-тепловой аппаратуры составляет 0,1–1°К, что позволяет фиксировать даже незначительные температурные различия геологических объектов. Разрешение деталей на местности при космической съемке составляет от сотен метров до первых километров. ИК-съемка с авиационных носителей с высот не более 1 км обеспечивает разрешение до 10–15 м. Приемниками ИК-излучения способными получить тепловые карты с высокой пороговой чувствительностью и разре-

шающей способностью в спектральном диапазоне 8–14 мкм, являются фоторезисторы из сернистого свинца, теллура и сурьмянистого индия.

ИК-съемка из космоса осуществляется сканирующими радиометрами. Подобная аппаратура устанавливается на спутниках системы «Метеор», «Космос» и др. На ИСЗ «Лэндасат-3» в бортовом многоспектральном сканере дополнительно использовался тепловой ИК-диапазон 10,4–12,5 мкм с пространственным разрешением 240 м.

В настоящее время для дистанционного зондирования с авиационных носителей применяется ИК-аппаратура «Зима», «Осень», «РСФ-М» и др. Наиболее перспективно использование ИК-комплекса «РСФ-М», охватывающего весь процесс радиационных измерений земной поверхности: от собственно ИК-съемки с борта носителя и регистрации сигналов, до визуализации изображений в псевдоцветах на экране видеоконтрольного устройства, их предварительной обработки с выводом результатов в наглядном для потребителя виде. ИК-комплекс «РСФ-М» позволяет выполнять аэросъемку с высот 100–1000 м в спектральных интервалах 0,8–1,1 и 8–13 мкм с линейным разрешением около 0,7 м.

Широкое применение в геологических исследованиях получила ИК-аппаратура «Вулкан», регистрирующая излучение земной поверхности в областях спектра 3–5 и 8–14 мкм. Подобное ИК-зондирование земной поверхности осуществляется со специализированного самолета АН-30.

Главный принцип применения ИК-изображений в геологических исследованиях заключается в том, что разновозрастные и близкие по литологическому составу породы при прочих равных условиях (влажность и др.) должны обладать близкими тепловыми контрастами и, следовательно, отражаться на ИК-изображении сходной структурой рисунка.

Наиболее ярко проявляются возможности ИК-съемки при изучении районов активной современной вулканической и гидротермальной деятельности. В этом случае аномальные, высокотемпературные источники тепла находятся на поверхности, и ИК-изображение передает картину распределения теплового поля в момент съемки. На ИК-снимках обнаруживаются тепловые аномалии (обычно в виде светлых пятен), определяющие положение кратера вулкана, выходы термальных вод и газов.

С помощью тепловой аэросъемки решаются различные геологические задачи. При геологическом картографировании и поисках полезных ископаемых материалы ИК-съемки позволяют изучать интрузивные массивы; выявлять древние вулканические аппараты и куполовидные поднятия в погребенных гранитных массивах; выделять литологические разно-

сти горных пород; обнаруживать системы разрывных нарушений; фиксировать проявления современной гидротермальной деятельности и др.

Применение ИК-аэросъемки в гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях способствует оконтуриванию очагов разгрузки подземных вод; изучению термальных источников, явлений заболачиваемости и засоления; обнаружению погребенных долин рек, проявлений карстовых и суффозионных процессов, льдистых грунтов, криогенных структур и др.

При изучении состояния геологической среды по материалам съемки достигается возможность обнаруживать снижение уровня грунтовых вод вблизи карьеров и просадки грунтов над шахтными горными выработками; выявлять очаги загрязнения водоемов; обнаруживать скрытое возгорание торфяников и терриконов; осуществлять контроль состояния подземных теплотрасс.

Материалы космической ИК-съемки целесообразно использовать для выявления региональных разломов литосферы, по которым происходит разгрузка глубинных подземных вод; оконтуривания зон подтопления и заболачивания вблизи крупных водохранилищ и каналов; изучения влажности почво-грунтов в районах мелиораций.

Радиолокационная (РЛ) съемка как один из видов дистанционных методов базируется на использовании радиоволнового участка электромагнитного спектра 0,3–100 см. Особую эффективность такое зондирование приобретает при изучении Земли и геологии других планет Солнечной системы, если их поверхность закрыта для наблюдения (съемки) плотной облачностью, туманом. РЛ-зондирование может проводиться в любое время суток. При РЛ-съемке широко используются радиолокационные станции бокового обзора (РЛС БО).

Материалы РЛ-аэросъемок применяются в региональных геологических исследованиях. Рассмотрим специфику подобного зондирования земной поверхности. Посланный РЛС БО радиосигнал по нормали отражается от встречающихся на его пути объектов и улавливается специальной антенной, затем передается на видеокон или фиксируется на фотоэмульсии (фотопленке). Принцип работы основан на фиксации различного времени прохождения зондирующего импульса до объекта и обратно.

РЛ-снимок формируется бегущим по строке световым пятном. Участок местности, расположенный непосредственно под самолетом, не попадает в область действия радиосигнала и образует «мертвую» зону, величина которой зависит от высоты полета и угла локации. Выраженность РЛ-изображения зависит от степени шероховатости поверхности отра-

жения (земной поверхности), геометрии объекта, угла падения луча, физических свойств поверхности отражения (состав грунтов, влажность и др.).

Среди РЛС БО, установленных на авиационных носителях, следует отметить станцию «Торос». В этой аппаратуре используются две полосы обзора справа и слева по направлению летательного средства. РЛ-аэросъемка выполняется в масштабах 1:90 000 и 1:180 000 в каждой из полос обзора при разрешении от 10 до 200 м.

Космические РЛС БО отличаются удачным сочетанием достаточно высокого разрешения при широкой (до максимальной) полосе обзора. Так, подобная аппаратура, установленная на ИСЗ «Космос-1500», при высоте орбиты 649–679 км обеспечивала ширину полосы обзора 450–500 км и среднее линейное разрешение 0,8–2,5 км.

С целью повышения разрешающей способности космического РЛ-зондирования ИСЗ оборудуются радиолокационными системами с синтезированной апертурой антенны (РСА). Установленная на российском ИСЗ «Алмаз-1А» РСА включает две волноводные антенны и имеет следующие характеристики: разрешение на местности – 30 м; ширина полосы обзора – 30 км; ширина полосы захвата – 350 км.

РСА входят в состав аэросъемочных комплексов. Например, на самолете-зондировщике «Геофизика» функционирует двухдиапазонная РСА (длины волн 4 и 125 см) с разрешающей способностью 5 и 20 м.

РЛ-изображения информативны при изучении структурных форм литосферы, если они выражены в рельефе, подчеркнуты сменой литологического состава горных пород или зонами изменения гидрогеологических условий. Разломы и трещины хорошо фиксируются на радарном изображении в виде протяженных линий в том случае, если их простираемость совпадает с направлением летательного средства. Низкий угол съемки позволяет использовать теневой эффект для выделения структурных элементов.

Работы, выполненные в пределах Кольского полуострова, Полярного Урала, Камчатки и других складчатых районов, показывают широкие возможности РЛ-аэросъемки в геологическом картографировании (трассирование тектонических нарушений, выявление границ литолого-стратиграфических комплексов, определение вещественного состава горных пород и др.). Интересные геологические результаты получены по применению РЛ-зондирования при изучении структурных форм платформенных областей (Западная Сибирь, Туркмения, Беларусь). Использование РЛ-съемки оказалось эффективным при геологическом картографировании труднодоступных районов, покрытых густой тропической

растительностью, где метеорологические условия не позволяют проводить обычную аэрофотосъемку (Колумбия, Панама, Эквадор, Бразилия и др.).

Космические РЛ-съемки наиболее информативны при региональном геологическом картографировании, поскольку РЛ-изображения отражают генерализованные структуры, охватывают большие по площади территории. При геоморфологических исследованиях с помощью РЛ-изображений обнаруживаются особенности строения гидросети. На снимках дешифрируются как современные, так и погребенные долины, фиксируются участки рельефа с повышенной влажностью. По РЛ-изображениям возможно изучение геоморфологии прибрежных зон морей и океанов (характер береговой линии, затопленные устья рек, рифовые постройки и т. п.).

2.4. Визуально-инструментальные наблюдения

Прошло почти восемь десятилетий с тех пор, когда началось изучение земной поверхности с воздуха. Еще французский географ Э. Мартонн в своей книге «Аэрогеография» (1950) отмечал, что «Никогда не летавшему географу можно прямо сказать, что он неполноценный географ... Основное преимущество наблюдения с воздуха заключается в том, что взгляд охватывает и каждую подробность и всю местность в целом, анализирует и синтезирует одновременно». Подобное высказывание вполне справедливо к геологу, изучающему горные породы и структурные элементы недр, выраженные на земной поверхности. Большое значение геологическим исследованиям с самолетов придавал академик А. Е. Ферсман, принимавший участие во многих аэровизуальных экспедициях. К настоящему времени накоплен большой опыт проведения визуально-инструментальных наблюдений геологических объектов с авиационных носителей.

Визуальные геологические наблюдения относятся к методам дистанционного изучения литосферы. Выделяют аэровизуальные исследования, осуществляемые геологами с воздушных аппаратов (самолетов, вертолетов), и визуальные наблюдения с околоземной орбиты, которые выполняются космонавтами в ходе экспериментов на пилотируемых космических кораблях и орбитальных станциях. Основное достоинство этих методов заключается в том, что наблюдатель-исследователь видит геологические объекты под привычным ракурсом и в естественной гамме цветов и оттенков, особенно с авиационных носителей. Это позволяет использовать визуально-инструментальные методы для выявления закономерностей строения и пространственной дифференциации проявлений структурных форм литосферы, изучения литолого-стратиграфических ком-

плексов горных пород, обнаружения негативных изменений геологической среды в условиях техногенного воздействия.

Аэровизуальные наблюдения с борта самолетов или вертолетов особенно эффективны при геологической съемке и картографировании в масштабах 1:200 000–1:50 000. Подобные исследования позволяют определить положение обнажений горных пород в эрозионных врезках (например, по долинам рек), оценить проходимость местности, получить информацию о дешифровочных признаках геологических объектов, провести корректировку геологических маршрутов и точек наблюдений, что имеет важное значение при проведении полевых работ. Чаще всего аэровизуальные методы применяются на стадии полевых рекогносцировочных исследований.

Трассы аэровизуальных маршрутов намечаются с учетом данных предварительного геологического дешифрирования МДС. Составляется журнал наблюдений, в котором приводят режимы полета (курс, скорость, время и высота полета), а также перечень вопросов, подлежащих выяснению с борта летательного аппарата.

Основным является этап аэровизуальных наблюдений. При геологических исследованиях в условиях Беларуси экономично использовать вертолет Ка-26. Оптимальное время воздушного изучения геолого-геоморфологических объектов – ранневесенний и позднесенний периоды. Лучшее время суток полетов – утренние безветренные часы. Режимы полетов при наблюдениях с борта вертолета Ка-26 различны. Проведение рекогносцировочных наблюдений эффективно с высоты около 300 м при скорости полета 120 км/ч. В этом случае достигается возможность изучать общие закономерности геологического строения территории благодаря обзору земной поверхности в несколько квадратных километров. С высоты 150–300 м и обзоре 1–1,5 км различаются формы мезорельефа и стратиграфо-генетические комплексы покровных отложений. Изучение особенностей микрорельефа и литологического состава горных пород возможно с высоты полета 50–150 м и обзоре земной поверхности 0,4–1 км.

Аэровизуальное дешифрирование предусматривает геологическую интерпретацию МДС с борта вертолета (самолета) путем геоиндикационного анализа рельефа, гидросети, растительности и элементов хозяйственной деятельности. Распознавание этих компонентов геологической среды осуществляется по естественным геометрическим (размеры, конфигурация, ориентировка) и цветовым признакам. Характер мезо- и микрорельефа изучают по морфометрическим признакам, а также по структуре растительного покрова. Морфологический анализ рельефа основан

на сравнении исследуемой формы с объектами на местности, размеры которых известны.

В геоиндикационных целях аэровизуальным методом изучается структура растительного покрова: доминирующие виды растений и их группы, характеризующиеся определенной цветовой гаммой. Установив для разных растительных групп цветковые признаки, можно отличить их друг от друга и нанести на МДС. Цветовые признаки зависят от фенологического состояния растительности и изменяются по сезонам.

Литологический состав горных пород диагностируется путем индикационного анализа растительного покрова. Сосняк багульниковый, например, указывает на наличие торфяной залежи, подстилаемой песками, реже супесью, сосняк лишайниковый индицирует песчаные отложения и т. д. На обнаженных, лишенных растительности участках горные породы различаются по цветовым признакам. Так, моренные пески и супеси обнаруживаются по пятнистому рисунку: на желто-сером фоне оранжево-бурые пятна овальной формы. О литологическом составе можно судить, наблюдая карьеры, очертания грунтовых дорог, особенности сельскохозяйственных угодий и др. Грунты, перекрытые торфяным покровом, могут быть опознаны по вспашкам вдоль мелиоративных каналов. Иногда в условиях распаханых маломощных (<0,4 м) торфяников наблюдается «просвечивание» подстилающих отложений.

При аэровизуальных исследованиях обращается внимание на конфигурацию и ориентировку геологических контуров. В ряде случаев их закономерное расположение может индицировать проявления структурных элементов литосферы. Линейная конфигурация геологических границ нередко приурочена к разрывным нарушениям, кольцевая – к пликативным тектоническим дислокациям.

Полученные в ходе наблюдений с борта вертолета (самолета) геологические сведения фиксируются на МДС и в журнале аэровизуальных исследований (или на магнитной ленте). Осуществляется малоформатная аэрофотосъемка интересных в геологическом отношении объектов.

Воздушное обследование сочетается с наземными наблюдениями в местах внеаэродромных посадок (аэродесантная съемка). Последние проводят на ключевых участках и служат для проверки, уточнения и дополнения результатов аэровизуального дешифрирования и наблюдений с борта вертолета. Если достаточно надежная посадка невозможна, то наблюдения осуществляют в режиме зависания вертолета над исследуемым участком. После завершения очередного маршрута проводят корректировку материалов предварительного и аэровизуального геологического

дешифрирования. Результаты воздушного обследования территории совместно с традиционными материалами геолого-съемочных работ используются при составлении окончательного варианта геологической карты.

Космовизуальные наблюдения. Начало визуальному изучению земной поверхности из космоса положил Ю. А. Гагарин. В дальнейшем многие космонавты отмечали большие возможности орбитальных наблюдений в геолого-геоморфологических целях. Космонавтом В. И. Севастьяновым, выполнявшим наблюдения морского дна на банках и в прибрежных шельфах у восточного берега Южной Америки, сделан вывод, что визуальные исследования оказываются весьма геоинформативными благодаря высокой и избирательной разрешающей способности человеческого глаза. При этом наблюдаются и такие объекты, которые на КС вообще не фиксируются, в частности рельеф морского дна на значительных глубинах.

Установлено, что разрешающая способность глаза составляет около одной угловой минуты. Это позволяет наблюдать из космоса предметы, размеры которых не менее 200 м. Однако у некоторых космонавтов острота зрения в условиях невесомости увеличивается. Например, американский космонавт Э. Уайт видел из космоса моторные лодки на морской поверхности. Он заявил, что Земля из космоса видна лучше, чем с высоты 13 км из самолета.

Этот эффект отмечали и другие космонавты, видевшие объекты земной поверхности шириной всего в десятки метров. Так, белорусский космонавт В. В. Коваленок во второй экспедиции на ПОС «Салют-6» отчетливо различал на ледниках Памира моренные гряды шириной 10–20 м.

В отличие от фотографической съемки земной поверхности визуальные наблюдения из космоса имеют свои особенности, поскольку человеческий глаз способен зафиксировать такие тонкие черты в окраске и рисунке отдельных аномальных участков, которые пока недоступны имеющимся техническим средствам дистанционного зондирования. В течение длительного полета космонавт-исследователь проводит наблюдения многократно, в самых различных условиях освещенности, в разные сезоны года, под разными углами при перспективном обзоре.

Технология космовизуальных наблюдений, выполняемых на пилотируемых космических кораблях и орбитальных станциях, состоит из следующих операций исследований: изучение по бортовой документации полетного задания; подготовка средств наблюдений и регистрации; выявление особенностей геологического объекта в соответствии с заданием бортового журнала визуальных наблюдений; фотографирование района

наблюдений с помощью стационарных и ручных фотокамер; нанесение объекта на карту, схему или космический снимок, помещенные в бортовом журнале; запись результатов наблюдений и фотосъемки преимущественно путем заполнения соответствующих таблиц; сообщение Центру управления полетом о выполненной работе, консультации со специалистами – постановщиками экспериментов.

При космовизуальных исследованиях сведения о геологических объектах фиксируются в дневниках с перечнем вопросов, подготовленных совместно со специалистами-геологами. Заслуживающие внимание объекты зарисовываются, осуществляется их спектрометрирование или фотосъемка. Комментарии космонавтов о наблюдаемых объектах передаются по теле- и радиоканалам. При получении новых рекомендаций специалистов осуществляется дополнительное изучение или фотографирование геологических объектов.

В результате визуальных геологических экспериментов с околоземной орбиты достигается возможность изучать структурные формы литосферы, слабо проявленные на КС. Решение подобной задачи имеет важное значение для равнинных платформенных территорий с мощным покровом рыхлых поверхностных отложений, часто измененных деятельностью человека. Так, одно из заданий экипажа «Салют-6», в составе В. В. Коваленка и А. С. Иванченкова, заключалось в наблюдении кольцевых структур на юге Украины, где они играют рудоконтролирующую роль. Этот район особенно труден для выполнения геологических наблюдений и изучения с помощью КС из-за маскирующей роли сельскохозяйственного освоения территории. Космонавтами эти кольцевые структуры были зафиксированы на бортовой карте при наблюдениях в осенний период (после уборки урожая с полей).

С космической орбиты в ряде случаев выявляются малоамплитудные тектонические поднятия в платформенных областях, обычно недостаточно отчетливо дешифрирующиеся на космических снимках. Определенный практический интерес представляет слежение за районами проявления современных геодинамических процессов (вулканизм, сейсмичность, развитие крупных оползней, селевые потоки и др.). В последние годы становится все более актуальной проблемой применения космовизуальных методов при ведении мониторинга геологической среды в районах развития горнодобывающей промышленности и иного интенсивного хозяйственного освоения территорий.

3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Изучение строения литосферы с применением аэрокосмической информации базируется на современных методах и технологиях геологического дешифрирования МДС. В общей технологической схеме подобных исследований ведущее место занимают методы визуального и автоматизированного дешифрирования, заключающиеся в обнаружении, распознавании и определении геолого-геоморфологических объектов и геодинамических процессов по их изображениям на МДС. Восприятие и обработку информации со снимков при визуальном дешифрировании осуществляет глаз и мозг оператора-дешифровщика. Автоматизированный способ дешифрирования предусматривает выполнение всех этапов обработки и интерпретации МДС с помощью специальных электронных устройств.

3.1. Принципы дешифрирования аэрокосмических снимков

Дешифрирование (интерпретация) МДС визуальным способом является важнейшей составной частью геологических исследований с использованием дистанционных методов. В литературе приведены многочисленные толкования сущности дешифрирования МДС. С. П. Альтер утверждает, что дешифрирование представляет собой метод определения границ и истинного значения изучаемых предметов, явлений и процессов земной поверхности по их фотоизображению и внешнему отражению путем полевого и камерального изучения. По определению Л. Е. Смирнова, дешифрирование снимков – сложный процесс, в результате которого получается и используется информация об объекте исследования, заложенная в материалах съемки. С точки зрения Л. А. Богомолова, дешифрирование – получение информации об объектах местности (или, в более широком смысле, об объектах и явлениях географической оболочки) по их фотоизображению, основанное на знаниях закономерностей фотографического воспроизведения их оптических и геометрических свойств, а также на знаниях закономерных взаимосвязей пространственного размещения объектов. В приведенных выше определениях дана общая трактовка термина «дешифрирование».

Геологическое дешифрирование есть метод изучения по аэрокосмическим снимкам морфологии земной поверхности и особенностей строения литосферы. Дешифрирование основывается на анализе взаимосвязей

геологического строения с теми компонентами ландшафта, которые отражаются на аэрокосмических снимках.

Основными задачами, возникающими при дешифрировании геологических объектов, являются следующие:

1) исследование структурных форм литосферы, их взаимоотношений, генезиса и относительного возраста;

2) выявление и прослеживание на площади литолого-стратиграфических комплексов, анализ их пространственных и временных соотношений;

3) изучение степени отражения геологических объектов, в том числе погребенных структурных форм, в ландшафтных особенностях земной поверхности;

4) анализ геоморфологических особенностей территории, выяснение генезиса форм рельефа и их возраста;

5) изучение современных геологических процессов;

6) выявление рудоконтролирующих структур при прогнозировании и поисках полезных ископаемых;

7) оценка состояния и изменений верхней части литосферы в условиях техногенеза;

8) уточнение, детализация или создание новых карт (геологических, тектонических, геоморфологических, инженерно-геологических, сейсмического районирования, эколого-геологических, прогнозно-минералогических и других).

При дешифрировании аэрокосмических снимков прибегают к трем основным методическим приемам: 1) сопоставлению снимков с фотоизображениями геологических объектов; 2) сравнению объектов в пределах одного снимка; 3) логической интерпретации дешифрируемых геологических объектов, например, хорошо различимые на МДС и в рельефе земной поверхности карстовые формы (западины) свидетельствует о близком залегании карстующихся пород.

Выделяют следующие виды геологического дешифрирования: *визуальное*, или глазомерное, *визуально-инструментальное*, производящееся с помощью стереоскопов, параллаксометров и других простейших приборов, и *автоматизированное*, выполняемое с применением специальных приборов и компьютерных средств. В полевых условиях геологи прибегают в основном к визуальному и визуально-инструментальному дешифрированию.

При геологическом дешифрировании используются как прямые признаки, отображающие на МДС непосредственно дешифрируемый объект, так и косвенные, передающие те или иные геологические свойства объекта

не прямо, а через посредство других явлений: растительность, почвы, обводненность и т. п. Сложность геологического дешифрирования МДС заключается в многообразии объектов и изменчивости их изображения.

Прямые дешифровочные признаки объединяют рисунок и тон аэрокосмоизображения. Фоторисунок на МДС создают формы и элементы рельефа земной поверхности, литологический состав покровных горных пород, растительный покров, элементы хозяйственной деятельности и другие ландшафтные особенности. Рисунок аэрокосмоизображения обусловлен геометрической формой и размерами объектов, характером границ.

Изображение на плановом снимке близко к ортогональной проекции. Обычно обращается внимание на направление и форму границ, площадную конфигурацию геологических объектов и их объемную форму. При геологическом дешифрировании определяются угловые размеры наклона рельефа, падения слоистых толщ, сместителей разрывов, контактов интрузивных массивов и т. д. Изучаются также линейные размеры, площади и другие параметры геологических объектов. Эти задачи решаются фотограмметрическими методами.

Рисунок аэрокосмоизображения часто полностью подчинен геологическому строению и рельефу земной поверхности. В большинстве случаев своеобразный, хорошо фиксирующийся на МДС рельеф обусловлен структурными особенностями, литологическим составом и генетическими условиями формирования горных пород. Все эти факторы, в силу различного проявления селективного выветривания и денудации, определенной избирательности эрозии и аккумуляции рыхлого материала, отражаются на поверхности в виде характерных форм мезо- и микро-рельефа, в развитии мелкой гидрографической сети и в характере распределения растительности.

Структура эрозионной сети отражает различные свойства горных пород и условия их залегания. Густота, ориентировка и сочетание речных долин и водотоков позволяют создать представление о водопроницаемости, трещиноватости, литологическом составе пород, условиях их залегания, нарушенности тектоническими разрывами и т. п.

Тон фотоизображения обусловлен яркостными характеристиками геологических объектов на МДС. При нормальном зрении удастся различать 32–35 оттенков от белого до черного цвета. Тон изображения зависит от большого числа факторов, из которых основными являются: яркость и цвет объекта, технические условия фотографирования. Яркость объекта складывается из освещенности солнечным светом, свойств и отражательной способности его поверхности. Цветовые различия объекта

зависят от окраски падающего света и от отражательной способности поверхности предмета. Попадая на светочувствительный слой пленки, отраженные лучи в зависимости от их окраски вызывают различную плотность изображения, по которой и судят о спектральной отражательной способности – цвете соответствующего объекта.

Большое значение при дешифрировании снимков имеет тень объекта – пространство, не освещенное прямым светом. Не освещенная солнцем сторона предмета образует собственную тень, а тень, отбрасываемая предметом на земную поверхность, – падающую тень. Тень является дешифровочным признаком, позволяющим отличать объемный предмет от плоского. Падающая тень помогает установить формы рельефа: обрывов, промоин, гребней, водоразделов и т. д.

Важнейшим дешифровочным признаком являются цветовые характеристики горных пород, передающиеся при съемке на цветную либо спектрально-зональную фотопленку. Цветные снимки имеют ряд несомненных преимуществ перед черно-белыми. Особенно успешно применяется цветная съемка в районах с хорошей обнаженностью и наличием резкого цветового контраста между разнородными и ярко окрашенными горными породами, а также для районов развития рыхлых континентальных отложений.

Косвенные дешифровочные признаки. Все явления и предметы в природе находятся в тесной взаимосвязи. Различные геологические объекты обнаруживают тесную связь с рельефом земной поверхности, почвами, растительным покровом и элементами хозяйственной деятельности. Из этой взаимосвязи и возникают так называемые косвенные признаки. Среди них основное значение при геологическом дешифрировании имеют геоморфологические особенности, характер почв и растительности.

Крепость пород и устойчивость их к процессам выветривания играют основную роль в формировании макро- и микроформ рельефа. Большое значение имеет нарушенность пород трещинами и разрывами со смещениями, предопределяющими рисунок и ориентировку сети речных и овражных долин. Это дает возможность по геоморфологическим признакам выделять распространение горных пород различных по составу и происхождению, например, новейшие континентальные образования, кислые интрузивные породы, закарстованные известняки и т. д. Особенно важны линейные повышения в рельефе, возникающие обычно над крепкими жилами и дайками изверженных пород.

В области древнематерикового оледенения холмистый рельеф указывает на широкое развитие моренных супесей и суглинков, гравийно-

галечного материала. Проявление на земной поверхности и снимках про-садочно-западинных форм свидетельствует о наличии лессовых образований.

При геологическом дешифрировании используются индикационные свойства почвенного покрова, который передается на снимках в изменении фототона. Окраска почв зависит главным образом от литологических особенностей материнских горных пород, соотношения гумусовых и минеральных частиц, механического состояния, засоленности и степени увлажнения. Наибольший эффект использования при дешифрировании изображения почв достигается в тех случаях, когда почвы залегают непосредственно на коренных породах или на их элювии. Наиболее часты пятнистые, точечные, полосчатые, прямолинейные и извилистые рисунки почв.

Торфяно-болотные почвы, приуроченные к низинам и котловинам, обнаруживаются на снимках по однородному темно-серому фотоизображению. Солончаковые почвы имеют обычно неровную пятнистую окраску. Своеобразный точечный, серповидный или волнистый рисунок образуют песчаные почвы, развитые на эоловых и аллювиальных песках.

Влажность почв в ряде случаев является дешифровочным признаком проявлений на земной поверхности разрывных нарушений и других проницаемых зон литосферы. Подобными показателями могут служить и водные источники, по выходам которых иногда удается установить положение трещин, разрывов и иных структурных форм.

Использование растительных индикаторов геологических условий предопределено прежде всего тем обстоятельством, что произрастание отдельных видов древесной, кустарниковой и травянистой растительности отмечается на почвах определенного состава. Структура почв, как было рассмотрено выше, тесно связана с литологией горных пород. На известковых почвах травянистая растительность редкая, однако произрастают кустарники. В условиях степного Казахстана, например, этот признак легко позволяет выявлять слои и линзы карбонатных пород.

На территории Беларуси с помощью растительных индикаторов возможно дешифрировать литологический состав горных пород в лесных регионах. Так, озерно-аллювиальные отложения (супеси, пески) распознаются на снимках благодаря мелкопятнистому фоторисунку, образованному кронами ольхово-березовых древостоев.

В последние годы при геологическом дешифрировании широко используются *комплексные*, или *ландшафтные признаки*. В данном случае показателями литологического состава горных пород, залегания грунто-

вых вод, проявлений элементов тектоники служат природные территориальные комплексы (ПТК), или ландшафты земной поверхности. Установленный по аэрокосмическим снимкам, геологическим, геоморфологическим, геоботаническим и иным материалам комплекс ландшафтных индикаторов позволяет оконтурить участки земной поверхности с определенными условиями осадконакопления, магматизма, метаморфизма, металлогении и тектонического строения. Изменение геологического строения отражается в комплексе природных компонентов, составляющих ландшафтные индикаторы.

Геоинформативность прямых, косвенных и комплексных (ландшафтных) дешифровочных признаков определяется сложностью геологического строения и физико-географическими условиями исследуемой территории. При изучении по МДС литологического состава горных пород и элементов тектоники, особенно в равнинно-платформенных областях, охваченных древнематериковыми оледенениями, следует использовать ландшафтные дешифровочные признаки.

3.2. Визуальное геологическое дешифрирование

Традиционным методом применения МДС в геологических исследованиях является визуальное дешифрирование аэро- и космических снимков. Наиболее широкое распространение получили следующие его виды: геоморфологическое, дешифрирование четвертичных отложений и структурное.

Геоморфологическое дешифрирование МДС имеет практическое значение при установлении общих закономерностей геоморфогенеза, проведении геоморфологического картографирования и районирования территории, ревизии существующих карт рельефа, структурно-геоморфологическом анализе, исследовании рельефообразующих процессов.

Методические приемы геоморфологического дешифрирования могут быть наглядно рассмотрены на примере Белорусского региона. Современный рельеф территории Беларуси сформирован несколькими разновозрастными оледенениями и преобразован современными эрозионно-денудационными и техногенными процессами. Разнообразие ледниковой морфоскульптуры, широкое развитие наложенных процессов денудации и аккумуляции в сочетании с разновозрастностью рельефа обуславливает использование определенной методики геоморфологического дешифрирования.

Изучение рельефа по МДС базируется на анализе комплекса прямых, косвенных и ландшафтных признаков. Индикационная роль тона и структуры фоторисунка повышается при дешифрировании космоизображений. Фоторисунок является показателем морфологии, генезиса и отно-

сительного возраста рельефа. Нитевидный извилистый рисунок подчеркивает современный рельеф аллювиального генезиса, полосчатый указывает на распространение эоловых форм поозерско-голоценового возраста, для денудационного выработанного рельефа сожского времени формирования характерны ветвящиеся дендритовидные рисунки, обусловленные эрозионным расчленением. Для объективизации процесса дешифрирования морфологии и генетических особенностей рельефа, помимо изучения тона и рисунка фотоизображения, осуществляется структурно-ярусная интерпретация МДС. Подобный подход основан на последовательном сопоставлении результатов контрастно-аналогового дешифрирования с данными геолого-геоморфологических исследований. Кроме того, целесообразен индикационный анализ гидрографических, геоботанических и антропогенных признаков.

Сложность пространственной организации современного рельефа предопределяет выбор эталонных участков для геоморфологического дешифрирования. Они сосредоточены в трех геоморфологических зонах, различающихся генезисом современной поверхности и возрастом рельефа. Первая зона, включающая территорию Белорусского Поозерья с рельефом позднеплейстоценового возраста, характеризуется мелкоконтурностью и контрастностью изображения, вызванной скульптурностью форм, четкими геоморфологическими границами, физиономичностью ландшафтов. Это повышает достоверность распознавания геоморфологических объектов на МДС. Рельеф второй зоны – Белорусская гряда и обрамляющие равнины – отличается более древним среднеплейстоценовым возрастом. В этой зоне широко представлены холмисто-моренные комплексы, различающиеся морфологически. На МДС они обнаруживаются по пятнистому рисунку, образованному системами гряд и холмов, западинными формами рельефа. Для третьей зоны – Белорусского Полесья – свойственно преобладание плоских, морфологически невыразительных поверхностей с размытыми границами генетических типов, что способствует неоднозначной интерпретации дешифрируемых контуров. В Полесье преимущественно распространен рельеф аквальной группы: водно-ледниковый, озерно-аллювиальный и аллювиальный.

Сопоставление дешифровочных признаков и геоморфологических индикаторов трех названных зон позволяет выработать определенные дешифровочные критерии с учетом степени преобразованности и физиономичности рельефа. Распознавание геоморфологических особенностей осуществляется по КС в основном на уровне генетического типа

и лишь в отдельных случаях, для объектов со значительной физиономичностью, на уровне мезоформ рельефа. Благодаря высокой разрешающей способности АФС возможно изучение мезо-, микро- и наноформ земной поверхности.

Ледниково-аккумулятивный рельеф, представленный краевыми образованиями (конечными моренами) и моренными равнинами, широко распространен в северной и центральной частях Беларуси. В области поозерского оледенения конечноморенные гряды имеют ячеистый рисунок за счет преобладания грядово-холмистых мезоформ, а также систем озерных котловин. Границы таких образований четкие, разделяющие контрастные по тону и рисунку участки космоизображения. Конечные морены отличаются светло-серым и серым пятнистым фототонном на распаханых участках и темно-серым зернистым изображением в пределах лесных массивов. К югу от границы поозерского оледенения контуры конечноморенных образований имеют неясные очертания, пятнистый светло-серый рисунок с полигональными формами, обусловленный распаханностью территории. Нередко конечные морены подчеркиваются дендритовидным рисунком, характеризующим формы линейной эрозии.

Моренным равнинам свойственен неравномерный пятнистый рисунок светло-серого и серого тона. Вследствие высокой распаханности пологонаклонных поверхностей пятнистость изображений нарушается четким полигональным рисунком. Отдельные участки равнин, покрытые широколиственно-еловыми и сосновыми лесами, имеют на МДС темновато-серый фототон со слабовыраженным крапом.

Водно-ледниковые равнины различаются по пятнистому рисунку изображения, образованному четко ограниченными темно-серыми контурами, различными по форме и размерам. Широко развитые в пределах данного типа рельефа сосновые и мелколиственные леса создают крапчатый внутриконтурный фоторисунок. Распаханные участки равнин (в основном в центральной части и на юге Беларуси) имеют светло-серый фототон. Нередко пологоволнистые водно-ледниковые равнины осложнены ложбинообразными понижениями, различающимися на МДС серыми и темно-серыми пятнами вытянутых очертаний. Среди форм водно-ледникового генезиса уверенно дешифрируются камовые массивы, фиксирующиеся в основном на КС масштабов 1:500 000 - 1:200 000 и среднемасштабных АФС по изометричным аномалиям темно-серого фототона.

В области поозерского оледенения широко распространены плоские озерно-ледниковые равнины, занятые мелколиственными, реже сосновыми лесами. Они прослеживаются на МДС по пятнистому слабовыраженному фоторисунку темновато-серого тона. Отмечаются темные пятна изометричной формы в плане со смазанным внутриконтурным рисунком, индицирующие котловины остаточных озер. Мелкая пятнистость светло-серого тона свойственна пологоволнистым участкам равнин, которые в основном распаханы. Важным индикатором данного типа рельефа являются системы озер, отчетливо заметные на МДС различных уровней генерализации.

Наиболее уверенно дешифрируются речные долины. Русла рек высоких порядков (Западная Двина, Днепр, Припять и др.) выделяются на КС нитевидными извилистыми линиями темного или аномально светлого тона. Темный фототон имеют полноводные русла, особенно в половодье. Это наглядно видно на примере космоизображения района р. Припять, полученного в весенний период съемки. Речные террасы дешифрируются лишь в тех случаях, если их минимальная ширина превышает разрешающую способность космоизображения. Иногда разновозрастные террасы рек Западная Двина, Днепр выделяются как единый комплекс.

Для ярко выраженных пойм (Припять, Днепр) характерен струйчатый веерообразный, либо извилистый полосчатый рисунок темно-серого (низкие поймы) и серого (высокие поймы) фототона, достаточно хорошо выраженный на разномасштабных МДС. Аллювиальные и озерно-аллювиальные равнины, занимающие значительные площади, обычно не только отчетливо оконтуриваются, но и могут быть классифицированы в возрастном отношении. Примером могут служить обширные надпойменные террасы Припяти. Наиболее древняя из них, средне-позднепоозерского возраста, характеризуется темно-серым тоном космоизображения и гомогенным рисунком с редким крапом (в пределах заболоченных низин). Фототон террас позднепоозерского времени более светлый. Нередко структуру рисунка изображения аллювиальных и озерно-аллювиальных равнин нарушают полигональные формы, которые индицируют развитую сеть мелиоративных каналов, торфоразработки и т. п.

Рельеф эолового генезиса выделяется лишь на МДС масштаба 1:200 000 и крупнее по характерным формам – грядам, буграм и их скоплениям, создающим специфичный полосчатый, иногда мелкосетчатый рисунок. Для данных форм типичен очень светлый (перевеваемые пески), либо светло-

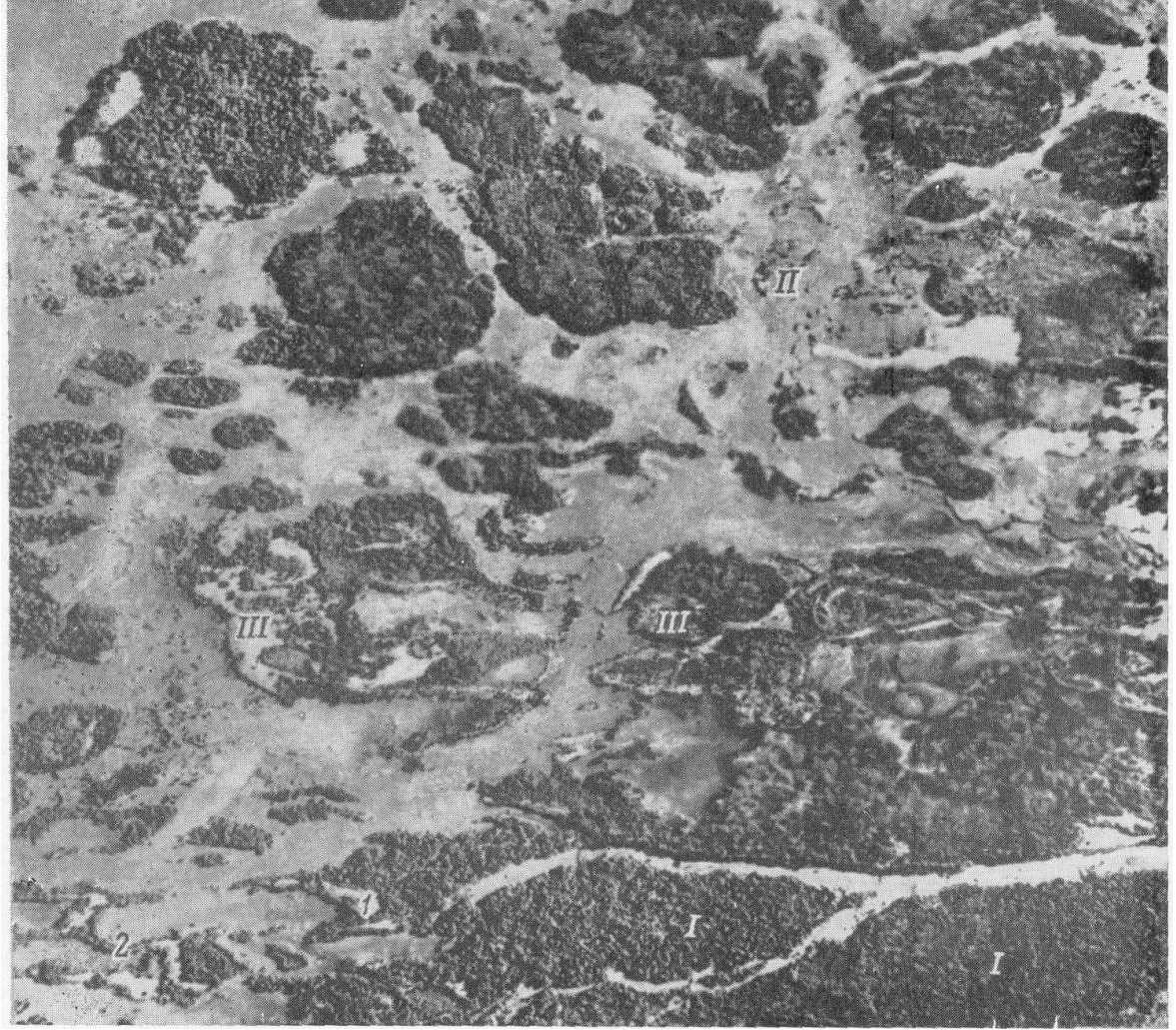


Рис. 5. Озерно-аллювиальная равнина (I) с болотами (II) и формами золового рельефа (III)

серый (закрепленные пески) фототон. Межрядовые понижения обычно отличаются темно-серым тоном космоизображения.

Озерные котловины распознаются по характерным очертаниям в плане и по темному фототону. Низкие террасы прослеживаются в виде узкой полосы темно-серого тона. Более осветленный тон типичен для высоких уровней озерных террас. Внутриконтурный рисунок этих террас однородный либо с расплывчатым крапом. В местах осушительной мелиорации озерные террасы индицируются по характерному полигональному рисунку.

Дешифрирование заболоченных низин и котловин обычно не вызывает затруднений. Подобные образования выделяются на МДС по хорошо выраженному пятнистому рисунку изометричной, иногда несколько вытянутой формы в плане (рис. 5). Внутриконтурный рисунок – однородный для низинных и крапчатый смазанный в пределах верховых болот. Фототон этих форм изменяется от серого до темно-серого, причем более темный тон индицирует болота низинного типа. Заболоченные территории, подверженные осушительной мелиорации, опознаются по полигональным формам, образованным торфоразработками и системами каналов.

Уверенно дешифрируются на МДС ложбины стока и долины прорыва талых ледниковых вод. Эти формы распознаются по плановым очертаниям, темно-серому тону и однородному либо неясно-крапчатому рисунку фотоизображения. Подобные признаки свойственны также староречьям в долине р. Припять.

Достоверность геоморфологического дешифрирования повышается при изучении поверхностей, созданных деятельностью рек и озер, аккумуляцией в приледниковых бассейнах, а также преобразованных современными процессами: заболачиванием, ветровой эрозией и интенсивным овражно-балочным расчленением. Уверенно диагностируются на МДС краевые ледниковые образования, особенно в области поозерского оледенения. При дешифрировании рельефа, созданного ледниковой аккумуляцией и водно-ледниковыми потоками, следует использовать вспомогательный картографический геолого-геоморфологический материал.

Результаты геоморфологического дешифрирования МДС используются при геологической съемке и картографировании, изучении экзогенных процессов, в структурном анализе рельефа земной поверхности, при прогнозе и поисках полезных ископаемых.

Дешифрирование четвертичных отложений основано на использовании особенностей рисунка и фототона аэро- и космоизображений, а также

ландшафтных признаков. Степень надежности дешифрирования МДС определяется литолого-фациальным составом горных пород, существованием взаимосвязей между рельефом земной поверхности, растительным покровом и геологическим субстратом, а также техногенной освоенностью территории.

Литолого-генетические типы четвертичных отложений подчеркиваются специфическими фоторисунками (табл. 1). Для аллювиальных комплексов типичны полосчато-струйчатые, веерообразные рисунки. Эоловые образования диагностируются полосчатыми, сетчатыми фотоизображениями. Пятнистые фоторисунки, нередко осложненные полигональными формами (пашни), индицируют моренные отложения и т. п. Сменой рисунков аэрокосмического изображения подчеркиваются изменения литологических особенностей пород. Так, озерно-ледниковые толщи, сложенные с поверхности песками, распознаются на МДС по однородному либо расплывчатому пятнистому рисунку. На наличие глинистого субстрата указывает более отчетливая пятнистость фотоизображения.

В ледниковой области гетерогенный тон изображения обусловлен высокой литолого-фациальной изменчивостью четвертичных образований. При постоянном фациальном составе отложений, например, болотного, озерного или водно-ледникового генезиса, тон аэрокосмоизображения отличается однородностью.

В ряде случаев фототон позволяет судить о генезисе и составе четвертичных отложений. Более темный тон индицирует органогенные образования, по очень осветленному серому фототону выявляются эоловые пески, а аллювиальные отложения пойм имеют на МДС светло-серый тон. Если четвертичные образования характеризуются разными литологическими особенностями, то более светлый тон имеют водопроницаемые породы, более темный – влагоемкие.

Важную роль в дистанционном изучении четвертичных отложений играют косвенные дешифровочные признаки. Рельеф земной поверхности, формирующий основной рисунок аэрокосмофотоизображения, служит показателем литолого-генетических комплексов четвертичных отложений.

Приуроченность покровных образований к определенным геоморфологическим уровням заметна на высотных АФС и локальных КС более отчетливо, чем на традиционных АФС. Зависимость типа растительности от состава четвертичных толщ однозначно устанавливается в пределах аллювиальных, водно-ледниковых и озерно-ледниковых образований. К группе гидрографических признаков относятся эрозионная сеть, озера,

Таблица 1

**Дешифровочные признаки основных литолого-генетических типов
четвертичных отложений на космических снимках локального уровня
генерализации (для условий Беларуси)**

Генетические типы отложений и их возраст	Литологические особенности	Прямые признаки			Косвенные признаки (индикаторы)			
		Рисунок изображения	Тон изображения	Характер границ	Морфология рельефа	Гидрографическая сеть	Растительность	Техногенные признаки
<p align="center">Моренные gIId gIIšz gIII pz</p>	Супеси, суглинки, валунные пески, песчано-гравийные и гравийно-галечные отложения	Мелкоячеистый и мелкопятнистый с отчетливыми очертаниями пятен, к югу от границы поозерского оледенения – пятна расплывчатой конфигурации, осложнены полигональными формами (пашни)	Пятнистый светло-серый или серый с мелкими темно-серыми пятнами (лесные массивы)	Четкие неровные границы в области поозерского оледенения, к югу от нее контуры плавные, часто неясные	Грядово-холмистые конечные морены	Наличие систем озер в области поозерского оледенения, к югу – хорошо развитая речная сеть, формы линейной эрозии	В области поозерского оледенения – островной характер развития еловых, вторичных мелколиственных лесов (в межхолмных понижениях)	Мелкоконтурность пашен в области поозерского оледенения, к югу – значительная распашка (до 50% территории)

Генетические типы отложений и их возраст	Литологические особенности	Прямые признаки			Косвенные признаки (индикаторы)			
		Рисунок изображения	Тон изображения	Характер границ	Морфология рельефа	Гидрографическая сеть	Растительность	Техногенные признаки
Флювиогляциальные f1d f1sz f1п pz	Пески, песчано-гравийные отложения	Пятнистый, образованный четко очерченными пятнами, различными по форме и размерам. Их внутриконтурный рисунок имеет слабовыраженный крап (участки с различными типами леса) либо полигональный рисунок (за счет контурности пашен). Отмечаются пятна вытянутых очертаний (ложбины стока) и дендритовидные полосы (мелкие реки)	Темноватосерый неравномерный либо светлосерый (пашни)	Хорошо выраженные на залесенных территориях. Отчетливо видны границы обширных ложбин стока	Всхолмленные либо пологоволнистые равнины, камовые массивы, ложбины стока талых ледниковых вод	В области поозерского оледенения – наличие озер, далее к югу – ложбины стока талых ледниковых вод	Сосновые и вторичные мелколиственные леса	Распаханность ограниченная от 10 % (на севере Беларуси) до 25 % (в ее центральной части и на юге)

Генетические типы отложений и их возраст	Литологические особенности	Прямые признаки			Косвенные признаки (индикаторы)			
		Рисунок изображения	Тон изображения	Характер границ	Морфология рельефа	Гидрографическая сеть	Растительность	Техногенные признаки
Лимногляциальные Ig III pz	Пески, глины, суглинки, супеси	Пятнистый слабовыраженный с участками мелкой пятнистости (за счет мелкоконтурности угодий). Отмечаются изометричной формы пятна со смазанным внутриконтурным рисунком (котловины остаточных озер)	Темновато-серый, редкие и мелкие пятна на светло-серого тона (пашни)	Хорошо выраженные	Плоские озерно-ледниковые равнины, осложненные котловинами заторфованных озер	Котловины остаточных озер, иногда с мелкими озерами	Вторичные мелколиственные, реже еловые леса	Ограниченная распашанность (около 10 %), мелкоконтурность угодий

Генетические типы отложений и их возраст	Литологические особенности	Прямые признаки			Косвенные признаки (индикаторы)			
		Рисунок изображения	Тон изображения	Характер границ	Морфология рельефа	Гидрографическая сеть	Растительность	Техногенные признаки
Аллювиальные aПд aПсз aПрз a IV	Пески, песчано-гравийные отложения, супеси, глины	Для пойменных отложений характерны тонкоструйчатый веерообразный (Припять, Днепр) либо нитевидный извилистый (Зап.Двина, Виляя) рисунки. Аллювий надпойменных террас отличается пятнистым, иногда караваеобразной формы рисунком, осложненным крапом (заболоченные понижения), дендритовидными полосками (мелкие реки), полигональными формами (районы мелиорации)	Серый, темно-серый (низкие поймы, участки надпойменных террас, покрытые лесом)	Четкий	Плоские поймы, плосковолнистые надпойменные террасы, пологоволнистые озерно-аллювиальные равнины с широким развитием заболоченных низин, котловин эоловых форм	Долины мелких рек, котловины заторфованных озер	Широколиственно-сосновые и вторичные мелколиственные леса	Мелиоративные системы каналов, распашка торфяников, торфо-разработки

Генетические типы отложений и их возраст	Литологические особенности	Прямые признаки			Косвенные признаки (индикаторы)			
		Рисунок изображения	Тон изображения	Характер границ	Морфология рельефа	Гидрографическая сеть	Растительность	Техногенные признаки
Лессовидные рп III рз	Лессовидные супеси, суглинки	Мозаичный, обусловленный сочетанием контрастных пятен полигонального рисунка (пашни) и изометричных форм (западины). На отдельных участках характерен дендритовидный полосчатый рисунок (эрозионное расчленение) либо ячеисто-пятнистый (западины)	Преобладают светлые тона. Ярко выражена пятнистость фототона – следствие мозаики пашен, развития суффозионных западин	Выражены фрагментарно	Платообразные водораздельные поверхности, осложненные суффозионными западинами и эрозионным расчленением	Густая сеть мелких водотоков и ложбин стока	Редкие участки широколиственных лесов	Высокая степень распаханности (около 50 % территории)
Эоловые vIII-IV	Пески	Полосчатый, мелкосетчатый	Очень светлый (перевеваемые пески) либо светло-серый (закрепленные пески)	Четкие	Эоловые холмы, гряды		Сосновые леса	

Генетические типы отложений и их возраст	Литологические особенности	Прямые признаки			Косвенные признаки (индикаторы)			
		Рисунок изображения	Тон изображения	Характер границ	Морфология рельефа	Гидрографическая сеть	Растительность	Техногенные признаки
Озерные I IV	Пески, супеси, суглинки, глины, сапропели, мергели	Изометричные, овально-вытянутые, иногда удлиненной формы пятна, приуроченные к озерным котловинам (темные пятна). Внутриконтурный рисунок однородный либо с расплывчатым крапом. В местах осушительной мелиорации полигональный рисунок	Серый и темно-серый. Более темный фототон указывает на гумусированные пески, супеси в пределах низкого террасового уровня	Хорошо выраженные	Плоские озерные террасы, котловины заторфованных озер	Озера, реликтовые котловины озер	Мелколиственные леса	Мелиоративные системы каналов на заболоченных участках озерной террасы
Болотные b IV	Торф, сапропели	Пятнистый, изометричной формы в плане, иногда с темными пятнами озер (верховые торфяники), либо расплывчатопятнистый (низинные). Внутриконтурный рисунок однородный однородный для низинных и крапчатый смазанный для верховых болот.	От серого до темно-серого. Для низинных торфяников фототон более темный, чем для верховых	Хорошо выраженные, особенно для верховых болот	Плоские заболоченные низины	Мелкие озера и болота	Сосновое редколесье, мелколиственные заболоченные леса	Торфоразработки, системы мелиоративных каналов

болота, фиксирующиеся на МДС даже высоких уровней генерализации. В частности, в пределах развития отложений водно-ледникового, озерно-аллювиального, озерно-ледникового генезиса широко распространены озера и болота. Конечноморенные образования индицируются мелкоконтурностью заболоченных участков. Показателями некоторых литологических особенностей служат техногенные признаки: размещение и контурность угодий, осушительные мероприятия, создание водохранилищ и т. п.

Надежными индикаторами четвертичных образований являются эктоярусы ПТК. Индикация грунтов осуществляется достоверно по ландшафтными показателями в пределах вторичных водно-ледниковых, моренно-зандровых, аллювиальных террасированных и пойменных ПТК с широким развитием гидроморфных почв и естественного растительного покрова, определяющего структурные особенности аэрокосмоизображения. Так, моренно-зандровые ПТК, занятые черноольховыми таволговыми лесами, являются показателями пологонаклонных зандров, сложенных супесчано-суглинистыми образованиями, а также залегания уровня грунтовых вод на глубине около 1,5 м. Ландшафт распознается по зернистому плотному рисунку темно-серого фототона, осложненному темными угловатыми линиями (мелиоративные каналы).

Дешифрирование четвертичных отложений нашло широкое применение при геологической съемке, инженерно-геологических, гидрогеологических и эколого-геологических исследованиях, поисках минерального строительного сырья.

Структурное дешифрирование предусматривает выявление по аэрокосмоизображениям особенностей ландшафта, связанных с проявлением на земной поверхности новейших тектонических форм и элементов глубинного строения. При дешифрировании МДС используется контрастно-аналоговый и геоиндикационный методические подходы.

Контрастно-аналоговый метод изучения структурных элементов литосферы по МДС заключается в типизации полей фотоизображения с определенным набором дешифровочных признаков. В этом случае априорно предполагается, что территории со сходными геолого-геоморфологическими условиями имеют на МДС одинаковый фоторисунок, а с различными – отличаются по фотоизображению. При изучении тектонических особенностей по МДС таким способом основное значение имеет анализ структуры фотоизображения.

Структурные формы платформенного чехла и фундамента, активизированные на неотектоническом этапе, отражаются на МДС в виде линейных, кольцевых и площадных аномалий рисунка аэрокосмоизображения. Линейно вытянутым контрастным фрагментам фоторисунка соответствуют линеаменты – индикаторы тектонической делимости земной коры. Системы полосовых аномалий более темного фотона, чем соседние участки фотоизображения, являются показателями зон трещиноватости с повышенной проницаемостью для глубинных флюидов. Изометричная ориентировка фотоаномалий характерна для кольцевых структур – сложно построенных гетерогенных образований земной коры. Площадным аномалиям фоторисунка соответствуют тектонические блоки, различающиеся новейшим геодинамическим режимом.

При тектонических построениях на основе МДС наиболее информативен *геоиндикационный метод*, предусматривающий анализ ландшафтных индикаторов проявлений структурных элементов литосферы. По аэро- и космическим снимкам с привлечением значительного объема фактологического материала (геоморфологического, геохимического, геолого-геофизического и др.) устанавливают корреляционные связи между ландшафтными особенностями земной поверхности, новейшим геодинамическим режимом и погребенными структурными формами. Чем выше степень унаследованности структур платформенного чехла и фундамента древнего заложения к новейшему структурному плану, тем информативнее геоиндикационное дешифрирование МДС.

В основу геоиндикационного метода положена теоретическая концепция о ландшафтах как динамичных природных системах, в которых отражены изменения, вызванные новейшими тектоническими процессами. *Ландшафтные индикаторы*, или *геоиндикаторы* представляют собой как отдельные природные компоненты, так и ПТК в целом, связанные с характером проявления на поверхности Земли структурных форм, активных в позднеолигоцен-антропогеновое время. Геоиндикаторы объединены в моно- и полисистемную группы. Первая включает в себя геологические (фиксируемые во внешнем облике ландшафта), геоморфологические, гидрографические и геоботанические признаки. Группа полисистемных индикаторов состоит из ПТК разных иерархических уровней.

Среди геологических индикаторов наиболее геоинформативны на территории запада ВЕП гляцигенные признаки, дешифрируемые по внешним чертам литогенной основы ландшафтов. Они представляют собой ледниковые деформации горных пород плейстоценового возраста:

гляциодислокации, ложбины ледникового выпахивания и размыва, большей частью выраженные в ландшафте и на МДС. Следует отметить, что динамика плейстоценовых ледников контролировалась неотектоникой региона и поэтому гляциодислокации нередко располагаются в пределах структурных форм платформенного чехла и фундамента, испытавших позднеолигоцен-антропогенную активизацию. Индикационная роль ледниковых ложбин заключается в их локализации вдоль линий дизъюнктивных структур.

Важное геоиндикационное значение имеют разные категории рельефа, образующие рисунок изображения на высотных АФС и КС. Поскольку степень воздействия ледников определялась их мощностью, динамикой и тектоническими факторами, в четвертичном покрове даже значительной мощности отразились многие структурные формы. Сравнение современного рельефа и поверхности погребенного кристаллического фундамента показывает, что максимальные высоты в пределах Минской возвышенности приурочены к северо-восточному склону Белорусской антеклизы, а Новогрудская, Слонимская возвышенности и Копыльская гряда хорошо согласуются с поднятиями поверхности фундамента. Подобные соотношения устанавливаются также с рельефом ложа антропогенных образований.

Признаками линейных структур являются линейно ориентированные фрагменты речных долин, их резкая асимметрия, сгущенная параллельная ориентировка в плане русел рек, прямолинейные очертания тыловых швов террас, приуроченность озерно-болотных низин и котловин, ложбин стока талых ледниковых вод, зон осциляционных конечных морен к определенным линиям, смена интенсивности экзогенных процессов и т. д. Кольцевые структуры подчеркиваются дугообразной ориентировкой участков речных долин, озерно-болотных массивов, изометричным расположением песчаных гряд, заболоченных котловин и др.

Почвы и растительный покров являются косвенными индикаторами, поскольку воздействие на них геодинамических процессов осуществляется путем перестройки рельефа и изменения уровней грунтовых вод. Возможности анализа по МДС геоботанических признаков структурных форм в Беларуси ограничены вследствие значительной техногенной освоенности ландшафтов. Широкое использование получили растительные индикаторы при дистанционной лито- и тектоиндикации в таежных и аридных областях. Так, исследованиями С. В. и А. С. Викторовых, Б. В. Виноградова, Е. А. Востоковой выявлена тесная связь пустынных видов растительности с проявлениями тектонических процессов.

Ведущее место в тектонических исследованиях на основе аэрокосмической информации занимает полисистемная группа ландшафтных индикаторов. В данном случае геоиндикаторами служат свойства ландшафтной структуры: характер границ ПТК; конфигурация, ориентировка и плотность контуров ПТК; взаимное расположение и содержание (состав) ПТК определенных рангов, обусловленные проявлением новейших тектонических процессов. В геоиндикационных целях принята ландшафтная классификация, предложенная Г. И. Марцинкевич для типизации ландшафтов и их морфологических частей в условиях Беларуси.

Наиболее достоверными геоиндикаторами являются роды ландшафтов, объединяющие однородные по генезису и времени формирования ПТК. Одним из показателей структурных форм служит характер границ родов ландшафтов. Контрастные границы ПТК этого ранга отмечаются вдоль линии разломов и кольцевых структур высокого порядка, активных на позднеолигоцен-антропогеновом этапе. Конфигурация ландшафтных контуров связана с новейшей активизацией разрывных и пликативных деформаций литосферы. Линейные контуры родов ландшафтов устанавливаются вдоль региональных разломов платформенного чехла и фундамента. Изометричная (кольцевая, эллипсоидная) конфигурация ландшафтных контуров сопряжена с проявлениями кольцевых структур различного генезиса.

В пределах тектонических структур, отличающихся друг от друга геодинамическим режимом, ориентировка ландшафтных выделов различна. На юге Беларуси доминируют широтные и субширотные системы контуров ПТК, обусловленные неотектонической активизацией герцинских дизъюнктивов Припятского прогиба. С отражением линейных структур фундамента и поверхности доантропогеновых отложений связаны северо-западное и субмеридиальное направления ландшафтных контуров на территории Белорусской антеклизы.

Плотность ландшафтных контуров (количество ПТК на единицу площади) является показателем преобладающих тенденций неотектонических движений.

Высокой плотностью характеризуются роды ландшафтов в пределах интенсивно воздымающихся блоков земной коры и меньшей – в условиях относительной стабилизации структур.

Отмечается геоиндикационная роль содержания (состава) ПТК в ранге родов ландшафтов. К зонам разломов чаще других приурочены ландшафты нерасчлененных речных долин, пойменный и аллювиальный террасированный. Иногда гидроморфные ландшафты индицируют геодинамические условия, связанные с растяжением земной коры. Раскрытие

значительного числа трещин и образование проницаемых зон способствует вертикальной миграции флюидов, циркуляции подземных вод и как следствие высокой обводненности ландшафтов.

Аллювиальный террасированный, озерно-аллювиальный, моренно-зандровый и другие слабодренированные ландшафты сопряжены с блоковыми структурами, испытывающими нисходящие движения, либо относительную стабилизацию в позднеолигоцен-антропогенное время. К блокам, характеризующимся положительными неотектоническими деформациями, тяготеют холмисто-моренно-эрозионные, камово-моренно-эрозионные и вторично-моренные ландшафты, значительно расчлененные долинами ручьев и ложбинами.

При региональных тектонических построениях информативен анализ групп родов ландшафтов: низменных, средневысотных и возвышенных, занимающих определенную гипсометрическую ступень над уровнем моря. Такие ПТК тяготеют к крупным блокам литосферы, различающимся размахом неотектонических движений.

Структурное дешифрирование МДС играет важную роль при составлении тектонических карт, геодинамическом анализе областей нефтегазонакопления, изучении структуры рудных полей и месторождений.

3.3. Автоматизированное геологическое дешифрирование

Обработка больших объемов геологической информации, получаемой при аэрокосмических съемках, может успешно осуществляться лишь при использовании быстродействующих ЭВМ. Автоматизация процесса обработки МДС позволяет повысить точность и объективность результатов дешифрирования больших массивов геологических данных. При автоматизированной обработке МДС решаются задачи двух видов: моделирование и восстановление изображений, улучшение их качества, контрастных характеристик, фильтрация различного рода искажений. Другим видом обработки является геологический анализ и проведение измерительного дешифрирования путем решения фотограмметрических задач. При обработке изображений в цифровой форме осуществляется ввод изображений в ЭВМ и их математическая обработка. Обобщенная схема устройства ввода аэрокосмической информации включает в себя: блок сканирования, обеспечивающий автоматическое считывание фотографического изображения, блок фотометрирования и блок сопряжения устройства с ЭВМ.

В настоящее время системы обработки данных дистанционного зондирования базируются на применении серийных ЭВМ со штатным про-

граммным обеспечением. Полная система прикладного программного обеспечения содержит следующее:

- средства автоматизации хранения изображений на внешних накопителях;
- средства диалога с пользователем через специализированный дисплейный комплекс;
- средства обслуживания процессоров ввода и вывода изображений;
- средства «вспомогательной» обработки изображений, программы быстрых спектральных преобразований, программы вычитания, перемножения, логарифмирования, стыковки изображений и выделения их фрагментов;
- средства «содержательной» обработки изображений, программы фильтрации, кодирования, статистического анализа изображений, идентификации, выделения признаков и распознавание образов;
- средства синтеза изображений, программы синтеза голограмм, пространственных фильтров;
- средства отладки и тестирования программных компонентов.

Применение ЭВМ для обработки видеоизображений позволяет находить количественные показатели многозональной видеоинформации, например, статистические характеристики. Последние на первой ступени обработки изображения можно рассматривать как априорную информацию, позволяющую на следующих ступенях визуализировать различные контрасты, что упрощает процедуры классификации.

Общую задачу обработки аэрокосмической видеоинформации можно определить как выяснение геологических свойств объектов по результатам измерения их спектрального излучения, структуры и текстуры фотоизображения. С участием оператора-дешифровщика осуществляется так называемый интерактивный режим обработки снимков, при котором оператором производится управление процессом обработки, анализ результатов контроля за качеством решения поставленной задачи.

К числу основных операций интерактивной обработки видеоизображений относятся: выделение заданных элементов анализируемого изображения из окружающего фона, проведение измерительных и вычислительных операций по выделенным элементам (рис. 6). Анализ выделенных элементов позволяет оператору оценить эффективность используемых программ применительно к решению поставленной задачи, выбрать режим для дальнейшей обработки. Выделение заданных элементов изображения осуществляется с использованием цвета в качестве признака, а также характеристик текстуры.



Рис. 6. Результаты компьютерной обработки видеоизображения

Для получения точности процесс обработки интерактивным методом имеет ступенчатую структуру, при которой оператор, выбирая траекторию перехода от процедуры к процедуре, анализирует промежуточные результаты, отображая их на экране дисплея.

При организации технологической схемы обработки аэрокосмической информации важную роль играет рациональное использование методов автоматизированного дешифрирования с учетом их возможностей для решения конкретной геологической задачи. Общая схема обработки МДС включает в себя следующие этапы:

- статистический анализ априорных данных, которые обеспечивают выбор эталонных участков, и планирование оптимальных сроков аэрокосмических съемок;
- накопление и анализ дешифровочных признаков исследуемых классов геологических объектов по эталонным участкам;
- выделение на анализируемых снимках границ однородных областей (сегментация);
- автоматизированная классификация изображений в диалоговом режиме (управление классификацией);
- присвоение выделенному классу геологического содержания (идентификация).

Исследования на всех этапах работ требуют участия специалистов – геологов.

В ходе автоматизированной обработки МДС первоначально формируется и анализируется набор геологических данных, обеспечивающий решение поставленной задачи. Исследуя делимость классов объектов земной поверхности по спектральным и текстурным признакам, выделяются группы плохо различимых классов, определяется максимальная вероятность ошибки распознавания классов и ошибки распознавания объектов внутри выделенного класса. На основании данных анализа проводится выбор эталонных геологических объектов, обобщаются и изучаются на местности их основные спектрально-отражательные характеристики, индикатрисы отражения, особенности структурно-морфологического строения. Планируются оптимальные сроки аэро- и космических съемок.

Важное место в рассматриваемой технологической схеме занимает геологический анализ видеоинформации в интерактивном режиме с участием инженера-геолога. При этом используются программы получения и анализа дешифровочных признаков оконтуренных эталонов (участков местности, принадлежащих обучающей выборке). Применяются специальные и стандартные программы управления видеоданными. В процессе

анализа используются данные наземных и аэровизуальных исследований эталонных территорий (полигонов).

При обработке видеоинформации осуществляются следующие процедуры:

- формирование видеофайлов по заданным координатам углов фрагмента и спектральным каналам;
- координатная привязка снимков и преобразование их в заданную картографическую проекцию;
- воспроизведение на устройствах вывода нужного спектрального фрагмента;
- определение для выбранных однородных участков статистических характеристик: построение одномерных, двумерных гистограмм распределения яркости, векторов средних значений яркости;
- получение линейных комбинаций исходных многозональных изображений;
- классификация выделенных однородных участков с привлечением априорной информации о числе и центрах классов, объединения в кластеры;
- по-элементная классификация видеофайлов по классам;
- представление и воспроизведение результатов классификации.

По эталонным полям и отдельным их участкам анализируются яркостные и текстурные признаки, строятся гистограммы и оценивается их возможность аппроксимации нормальным законом. Производится оценка информативности каждого из спектральных каналов и формируется система интегральных дешифровочных признаков.

Основу интерактивной геологической автоматизированной обработки составляют программные комплексы, позволяющие осуществить выделение однородных областей и производить управляемую классификацию. Подобная классификация проводится в три этапа:

- на первом этапе интерпретатор очерчивает на исследуемом изображении тестовый участок, на котором осуществляется расчет его статистических характеристик;
- на втором этапе просматриваются все элементы изображения, и если функция правдоподобия их принадлежности к классу обучающего тестового участка местности (эталона) превышает заданный порог, то элемент отмечается на экране дисплея;
- на третьем этапе производится операция сглаживания изображения так называемым скользящим окном, при этом выделяются связанные участки изображения и осуществляется получение геологической карты.

I. Получение
видеоинформации

II. Обработка и отображение
видеоинформации

III. Дешифрирование и
картографическое
моделирование

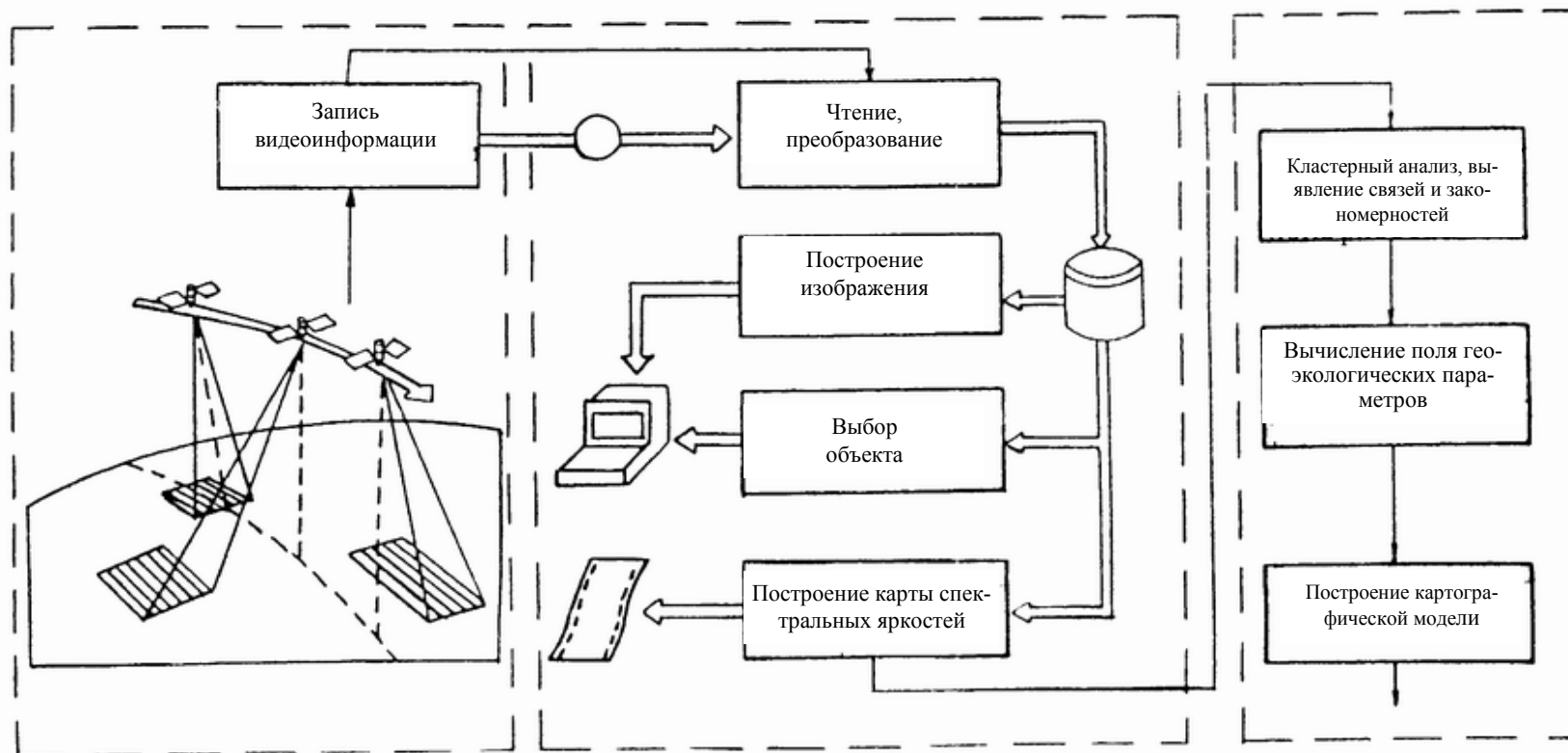


Рис. 7. Технологическая схема компьютерной обработки космических сканерных снимков, полученных с ИСЗ «Ресурс-01»

Наглядным примером автоматизированного геологического дешифрирования МДС является компьютерная обработка космических сканерных снимков, полученных с ИСЗ «Ресурс-01». В качестве эталона выбран Березинский геодинамический полигон (Крупский район Минской обл.). На рис. 7 приведен один из вариантов технологической схемы обработки космоизображений с помощью ПЭВМ в связи с составлением геоэкологических карт.

Первоначально, поступающая по радиоканалу космическая информация, преобразуется в специализированных вычислительных комплексах. Результатом такой проработки является матрица интенсивности светового излучения, отраженного от подстилающей поверхности в трех частотных диапазонах. Каждый КС представляется видеофайлом, первые 400 байт которого являются его паспортом. Далее следуют три значения интенсивностей излучения в трех зонах спектра для каждой точки. Данные с видеофайла переносятся на магнитный диск ПЭВМ. При дешифрировании выбирается фрагмент КС среднего размера. Его можно рассматривать с максимальным разрешением, если одна измеренная точка отображается одним пикселом на экране.

При помощи программы «SURFER» осуществляется построение карт изолиний. Затем эти модели сопоставляются с тематическими картами геолого-геофизического содержания. Современный уровень обработки цифровой информации на ПЭВМ позволяет производить выделение участка местности для последующей его детальной геологической интерпретации. Одновременно данный участок можно привести к определенной картографической проекции в определенном масштабе.

Особое место в технологии электронной обработки космической информации занимает построение и анализ цифровой модели (ЦМ) пространственного распределения равных значений спектральных яркостей геологических объектов. Последние с одинаковой структурой распределения яркостных показателей объединяются в тематические классы. Специфика подобной группировки такова, что тематические классы могут быть представлены в виде морфолитосистем, объединяющих рельеф земной поверхности и сопряженный с ним геологический субстрат (табл. 2).

Геологическая интерпретация ЦМ показывает, что выделение морфолитосистем наиболее достоверно по компьютерным космоизображениям, выполненным в спектральном диапазоне 0,6–0,7 мкм. Довольно однозначно устанавливаются заболоченные низины и котловины, сложенные торфом и тонкими супесями. По ЦМ возможна пространственная диффе-

Таблица 2

**Отражение морфолитосистем на цифровой модели
космического изображения, полученного с ИСЗ «Ресурс-01»**

Тематические классы (морфолитосистемы)	NN кластера (изолинии на ЦМ)		
	канал-1 (0,5–0,6 мкм)	канал-2 (0,6–0,7 мкм)	канал-3 (0,8–0,9 мкм)
1. Озерные котловины (озеро Селява и др.)	+30	+28 +30	+35 +40
2. Плоские заболоченные низины (торф, супеси)	+30	+28	---
3. Пологоволнистые водно-ледниковые и моренные равнины (пески, супеси)	+32	+30	+55
4. Среднехолмисто-грядовые моренные комплексы (песчано-гравийные породы, суглинки)	+34	+32	+70
	+36	+36	+75
5. Крупнохолмисто-грядовые моренные комплексы (пески, гравийно-галечные породы, суглинки)	+38 и более	+40 и более	+75 и более

ренциация моренных гряд по характеру относительных высот рельефа (рис.8). Изолинии спектральных яркостей указывают также на литологический состав горных пород (пески с гравием, галькой и суглинки), слагающих эти мезоформы.

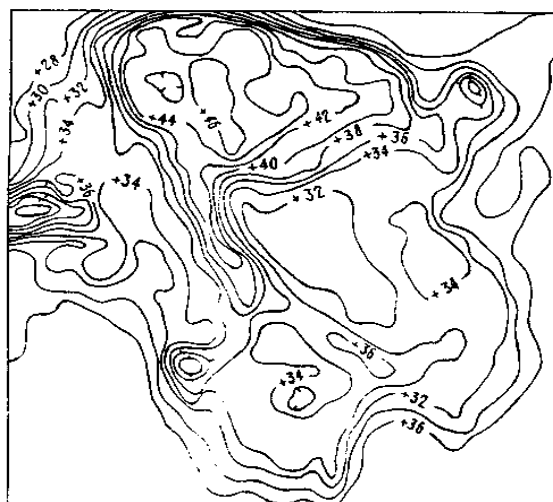


Рис. 8. Распределение спектральных яркостей холмисто-грядовых моренных комплексов на цифровой модели космического снимка (канал 0,6–0,7 мкм)

Кроме того, анализ ЦМ в ряде случаев позволяет выявить структурные элементы литосферы. Так, в пределах Березинского полигона отчетливо прослеживается на ЦМ фрагмент Холопеничского разлома протяженностью в несколько километров в виде удлиненной замкнутой аномалии со

значениями спектральной яркости +30 (рис.9).

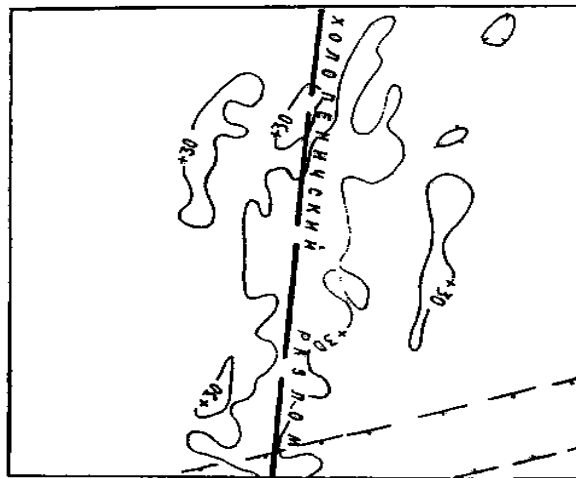


Рис.9. Отражение фрагмента глубинного разлома в спектральных яркостях морфолитосистем на цифровой космической модели (канал 0,5-0,6 мкм)

3.4. Технологическая схема дешифровочного процесса

Геологические исследования, проводимые на основе данных дистанционного зондирования, предполагают использование всей совокупности общих и частных приемов камерального и полевого дешифрирования МДС. Технология подобных работ может быть построена по принципу сетевого планирования, что позволяет определить последовательность отдельных операций и оптимизировать весь дешифровочный процесс. В настоящее время разработан ряд технологических схем применения аэрокосмической информации для различных видов геологического картографирования, выполнения геологоразведочных работ, проведения геоиндикационных исследований. Независимо от видов геологических исследований в технологии дешифровочного процесса выделяются три этапа: предварительный камеральный, полевой и окончательный камеральный. Этапы в свою очередь делятся на отдельные стадии, которые различаются по времени, характеру технологических операций и приемов выполнения работ (табл.2).

Предварительный камеральный этап включает организационные мероприятия: проектирование работ, заказ и получение необходимых МДС, топографических карт, геолого-геофизических и других тематических материалов. Особое внимание на данном этапе уделяется научно-технической подготовке к дешифрированию, от которой зависит качество работ и последующие объемы полевых исследований. Изучается состояние проблемы, критически анализируется фактический материал, полученные сведения систематизируются. Осуществляется топогеодези-

ческая привязка МДС, нанесение на них фактического материала, а также выполняется геологическое дешифрирование и составление предварительных карт геологического содержания.

Таблица 3.

**Геоиндикационного дешифрирования материалов
дистанционных съемок**

Этапы	Стадии	Операции				
Предварительное камеральное дешифрирование	Научно-техническая подготовка	Систематизация МДС и их топогеодезическая подготовка		Анализ фактического материала и нанесение его на МДС		
		Оценка геоинформативности МДС				
	Выявление геоиндикаторов, предварительное картографирование	Распознавание геоиндикаторов и установление дешифровочных признаков		Обработка МДС на приборах		
				Стереоскопическое изучение	Измерительное дешифрирование	Фотометрический анализ
	Составление предварительных геоиндикационных карт	Редуцирование результатов дешифрирования				
	Рекогносцировка	Аэровизуальное дешифрирование				
Полевое дешифрирование	Получение новой информации об геоиндикаторах, корректировка данных картографирования	Наземное изучение геоиндикаторов, проверка дешифровочных признаков				
		Выявление новых геоиндикаторов, установление их индикационных связей				
		Уточнение геоиндикационных карт	Редуцирование результатов дешифрирования			
		Выборочный контроль данных дешифрирования				
Окончательное камеральное дешифрирование	Разработка системы геоиндикаторов, окончательное картографирование	Анализ геоиндикаторов по данным предполевого и полевого дешифрирования		Обработка МДС на приборах		
		Разработка системы геоиндикаторов и их экстраполяция				
		Типизация дешифровочных признаков геоиндикаторов по морфогенетическому принципу				
		Составление окончательных геоиндикационных карт		Редуцирование результатов дешифрирования		

Главное место на предполевом этапе занимают компьютерная обработка МДС и визуальное геологическое дешифрирование. Должное внимание придается разработке (или доработке имеющегося) классификатора геологических объектов на основе дешифрирования и анализа фактического материала. В итоге создаются компьютерные (электронные) модели и комплект карт различного геологического содержания. В предварительный период осуществляется выбор ключевых участков и нанесение сети полевых маршрутов. Под «ключами» подразумевают участки земной поверхности, охватывающие разнообразие геологических объектов, встречающихся на территории исследований. Главное свойство таких участков – соответствие их геологической структуре всей территории. Результаты полевых исследований на «ключках» экстраполируют на весь район исследований.

Изучение объектов на ключевых участках осуществляют с помощью метода заложения и описания точек, выбор которых подчинен логическому анализу результатов предварительного дешифрирования. Наиболее целесообразно расположение точек полевых наблюдений в пределах основных рисунков фотоизображения, отражающих геологические условия ключевых территорий, что повышает качество полевых исследований при экономии времени. Точки наблюдения и границы ключевых участков отмечают на топографических картах. В процессе полевых работ их местоположение можно корректировать.

В полевой этап выполняются рекогносцировочные (автомобильные, аэровизуальные) исследования и геологическое изучение ключевых участков на основе проведения наземных маршрутов. В этот период уточняются данные предварительного дешифрирования (визуального, компьютерного) МДС, производится сбор нового полевого материала.

Важную роль в рекогносцировочных исследованиях геологических объектов играют аэровизуальные методы, особенно в пределах труднопроходимых территорий (заболоченных, таежных, горных). В условиях Беларуси для этих целей экономично использовать вертолет Ка-26. Проведение рекогносцировочных наблюдений эффективно с высоты около 300 м. В этом случае достигается возможность изучать общие геологические закономерности территории благодаря обзору земной поверхности в несколько квадратных километров. На основе рекогносцировочных наблюдений корректируют расположение ключевых территорий, точек полевых исследований, уточняют отдешифрированные контуры, намеченные на предварительном этапе.

В поле на всем протяжении маршрута выполняют геологическое дешифрирование, сущность которого заключается в выяснении конкретного содержания выделенных на МДС контуров. Полевое дешифрирование позволяет проверить результаты предварительного геологического картографирования непосредственно на местности, уточнить и детализировать их дешифровочные признаки. Для стереоскопического просматривания снимков в полевых условиях могут быть рекомендованы компактные линзовые стереоскопы фирмы «Цейсс-Йена» и др.

Дешифрирование МДС сопровождается полевым описанием точек наблюдений. При этом в полевом дневнике фиксируются точки наблюдения, указываются номер снимка и номенклатура планшета исследуемой территории. Затем описываются природные компоненты. При характеристике рельефа учитывают его мезо-, микро- и наноформы, их морфометрию (абсолютные отметки, относительные превышения, конфигурация, густота расчленения, крутизна склонов и т. д.).

В полевых условиях изучают состав горных пород в естественных (овраги, уступы в береговой линии рек, озер и т. п.) и искусственных обнажениях (шурфы, стенки карьеров и др.). В случае присутствия в геологическом разрезе грунтовых вод измеряют глубину их залегания. Для целей геоиндикационного дешифрирования обращается внимание на видовой состав растительного покрова, распределение доминирующих групп ассоциаций. При описании элементов техногенного воздействия (каналы, карьеры, водохранилища и др.) отмечают положительные и отрицательные проявления хозяйственной деятельности. Расположение точек полевых наблюдений фиксируются на МДС.

После очередного маршрута проводят ежедневную камеральную обработку полевых материалов. На МДС рабочего масштаба поднимают уточненные и вновь выделенные границы. Затем осуществляют детальное геологическое дешифрирование между соседними маршрутами в пределах ключевого участка.

В конце полевых исследований производят заключительную камеральную обработку собранных материалов, в задачу которой входит предварительное обобщение данных полевых наблюдений на ключевых территориях и составление геологических карт рабочего масштаба. Особое внимание уделяют экстраполяционному дешифрированию необследованных территорий, но характеризующихся аналогичными геологическими условиями и сходными дешифровочными признаками. Выделяют две формы экстраполяции: локальную, где дешифровочные признаки распространяются на небольших по площади участках, и региональную,

осуществляемую по КС в пределах структурных областей высокого порядка (Припятский прогиб, Белорусская антеклиза и др.).

При решении спорных вопросов полевого картографирования осуществляют выборочную проверку данных дешифрирования. С этой целью выполняют наземные контрольные маршруты или аэровизуальные наблюдения с серией внеаэродромных посадок.

Окончательный камеральный этап объединяет обработку результатов полевых исследований, создание итоговых геологических карт и составление отчета. Проведение повторного визуального геологического дешифрирования выполняют для уточнения и детализации данных предварительного и полевого анализа МДС по всей исследуемой площади путем обобщения дешифровочных признаков, выявленных на разных участках. При этом изучают стереоскопическую модель ландшафта (в основном по АФС), осуществляют выборочное измерительное дешифрирование отдельных геологических объектов и перенос результатов дешифрирования на топографическую основу.

С учетом данных полевых наблюдений дополняют «словарь образов» – классификатор и проводят автоматизированную обработку новых МДС для составления окончательного варианта компьютерной карты. Выборочное измерительное дешифрирование направлено на определение морфометрических характеристик рельефа в пределах участков, не охваченных полевыми маршрутами. Его выполняют с помощью стереоприборов с измерительным устройством. Проведение измерений форм рельефа возможно путем оперативной фотограмметрической обработки АФС на «Стереонаграфе-2».

В камеральный этап важнейшим видом работ является составление геологических карт. Подобные построения осуществляются на основе данных дешифрирования МДС; результатов полевых, в том числе аэровизуальных наблюдений; карт ключевых участков; фондовых материалов геолого-геофизического содержания. Выводы излагают в виде отчета, который иллюстрируют аннотированными МДС и сводной таблицей дешифровочных признаков типичных геологических объектов.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

4.1. Геоинформативность аэрокосмических снимков

Достоверность геологических построений на основе дистанционных методов определяется прежде всего геоинформативностью применяемых материалов аэро- и космических съемок. Последние различаются между собой в зависимости от систем, регистрирующих и передающих на наземные станции информацию о земной поверхности, носителей (космических или воздушных) соответствующей аппаратуры, средств обработки получаемых данных, природных особенностей (сезонных, метеорологических и др.) и целевого назначения съемки.

Геологические исследования на территории запада ВЕП обеспечены информативным комплектом МДС, который включает изображения земной поверхности, полученные с космических и авиационных носителей фотографирующими и оптико-электронными системами.

Применительно к целям геологического дешифрирования под *геоинформативностью* МДС подразумевается способность аэро- или космического изображения передавать признаки геологических объектов: структурных элементов литосферы, литолого-стратиграфических комплексов, проявлений экзогенных процессов и др. Существенное влияние на геоинформативность МДС оказывает уровень генерализации снимков, их разрешающая способность и спектральные характеристики.

Генерализация изображения земной поверхности на снимке представляет собой естественное изменение пространственных и оптических компонентов ландшафта, в результате чего меняется разрешение деталей местности, формы контуров и оптические градиенты изобразившихся объектов. При этом процессе происходит отфильтровывание небольших природных компонентов, размеры которых меньше разрешающей способности данного фотоизображения. Рассмотрим геоинформативность МДС континентального, регионального, локального и детального уровней оптической генерализации, для каждого из которых характерны определенный масштаб, степень разрешения на местности и объем геологической информации.

КС континентального уровня генерализации, полученные сканерами малого разрешения с ИСЗ «Метеор», охватывают значительные по площади территории. На одном КС отражается полностью западный регион ВЕП. Большая обзорность космоизображения способствует выявлению крупнейших кольцевых структур (Полесская, Клинцовская, Витебская и

др.) диаметром порядка 200 км и более, а также суперрегиональных линейных элементов (Балтийско-Украинский, Брестско-Велижский и т. п.), трассирующихся на многие сотни километров. Они различаются на КС благодаря своей выраженности в крупных формах рельефа, дифференцируемых по морфо-структурным показателям. Дешифрирование континентальных КС позволяет изучать в единой системе кольцевые и линейные образования литосферы, устанавливать их взаимосвязи как на западе ВЕП, так и в соседних регионах. По таким КС возможна индикация тектонических мегаблоков, испытавших разнонаправленные движения на позднеолигоцен-антропогеновом этапе развития Земли.

К *региональному уровню* оптической генерализации относятся сканерные КС серии «Метеор» среднего разрешения и КФС, выполненные с ПОС «Салют» и «Мир». Данная группа космоизображений позволяет изучать суперрегиональные и региональные разломы с большей уверенностью по сравнению с континентальными КС. Крупнейшие тектонические структуры запада ВЕП фиксируются фрагментарно. Наиболее полно дешифрируются крупные (Березовская, Туровская и т. п.) и средние (Браславская, Новогрудская и т. п.) кольцевые объекты соответственно размерами в поперечнике 50–200 и 25–50 км (рис. 10, 11). Ведущими геоиндикаторами на региональных КС служат морфосистемы. Геоиндикационное значение морфосистем заключается в том, что они являются, с одной стороны геоструктурными элементами, выраженными в современном рельефе (морфоструктурой), а с другой – комплексами форм проявления на земной поверхности экзогенных процессов (морфоскульптурой).

На региональных КС выделяются неотектонически активные структуры фундамента в пределах щитов платформы с незначительной толщиной четвертичных отложений, а также антеклиз с относительно мало мощным осадочным чехлом. Дешифрируемые региональные разломы, пересекающие Украинский щит и Микашевичско-Житковичский выступ, хорошо согласуются с рельефом и особенностями внутреннего строения фундамента. Наиболее уверенно проявляются на КС разломы, ограничивающие крупные контрастные геоструктуры, например, разделяющие Днепровско-Донецкую впадину и Припятский прогиб с Украинским щитом, Воронежской и Белорусской антеклизами.

Сканерные КС высокого разрешения серии «Ресурс», «Лэндсат», КФС «Космос», а также высотные АФС и радиолокационные АС мелкого

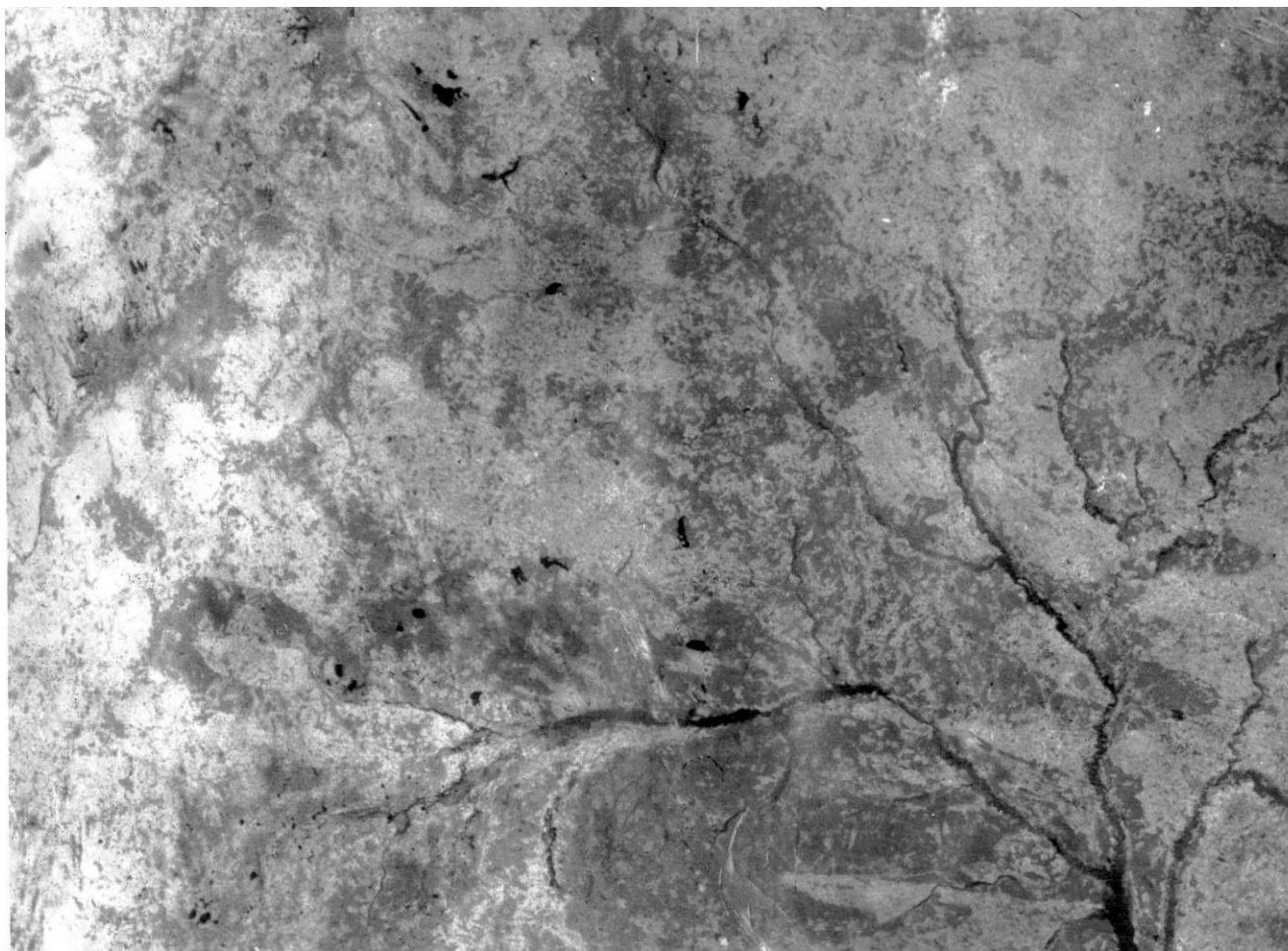


Рис. 10. Фрагмент космического изображения территории запада Восточно-Европейской платформы, полученного с ИСЗ «Метеор-31» в спектральном диапазоне 0,7–1,0 мкм

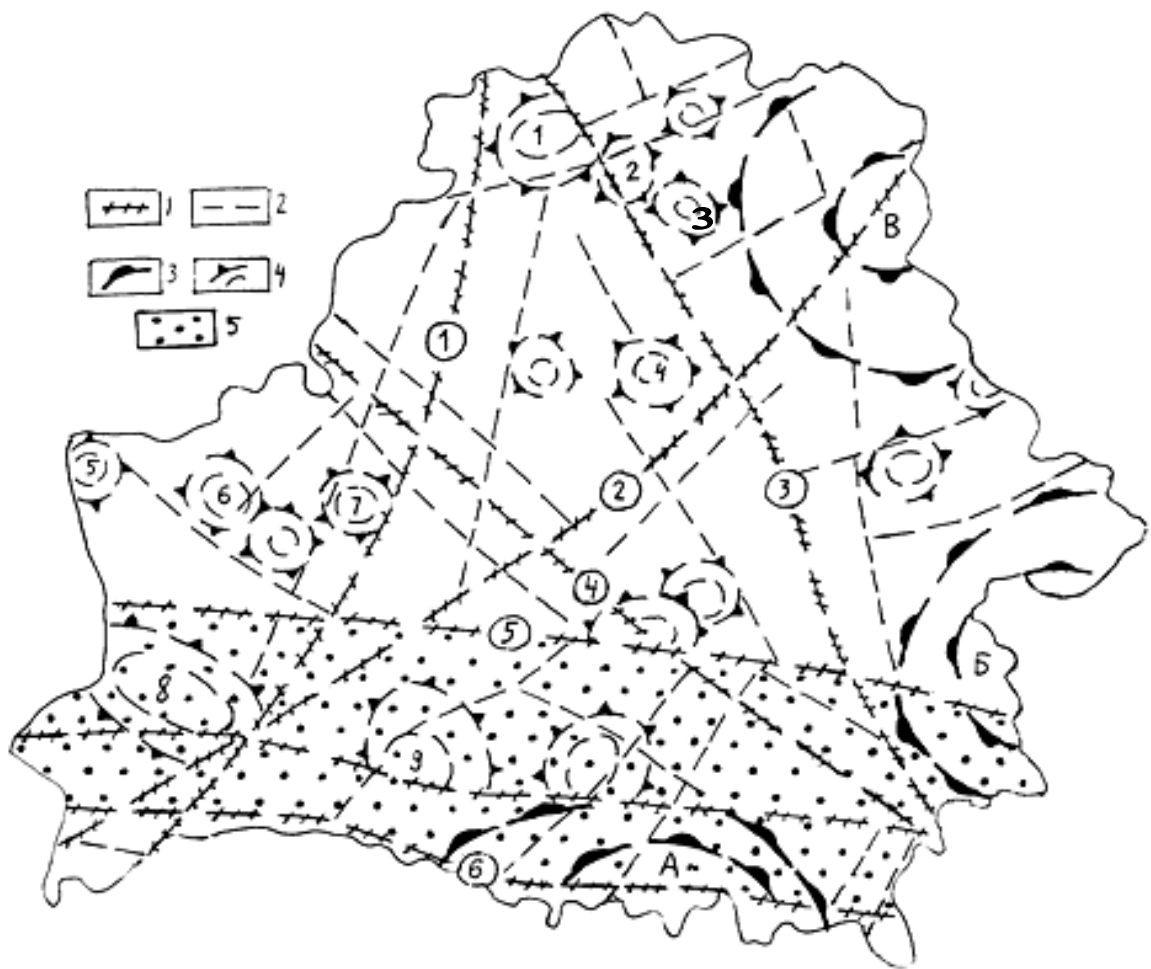


Рис. 12. Карта линеаментов и кольцевых структур территории Беларуси по данным космической съемки: 1 – суперрегиональные линеаменты (1 – Балтийско-Украинский, 2 – Брестско-Велижский, 3 – Двинско-Черниговский, 4 – Ошмянско-Речицкий, 5 – Северо-Припятский, 6 – Южно-Припятский); 2 – региональные и локальные линеаменты; 3 – кольцевые мегаструктуры (А – Полесская, Б – Клинцовская, В – Витебская); 4 – региональные кольцевые структуры (1 – Браславская, 2 – Ветринская, 3 – Ушачская, 4 – Борисовская, 5 – Гродненская, 6 – Щучинская, 7 – Новогрудская, 8 – Березовская, 9 – Лунинецкая); 5 – фрагмент зоны Сарматско-Туранского трансконтинентального линеамента

масштаба образуют локальный уровень генерализации. Они дают резкий скачок в содержании информации о геологической природе дешифрируемых объектов. При этом объем сведений, фиксируемых на локальных КС, приближается к данным, получаемым с помощью высотных АФС. На локальных МДС дешифрируются в основном средние и мелкие (диаметром менее 25 км) кольцевые структуры, региональные и локальные разломы. Главнейшими их индикационными признаками являются мезо-

формы рельефа. Относительно высокая разрешающая способность высотных АФС предполагает их использование для детализации ряда структурных форм литосферы. МДС локального уровня генерализации позволяют изучать литолого-генетические типы четвертичных отложений (см. табл. 1.)

Детальный уровень оптической генерализации объединяет группу радиолокационных АС, многозональных и традиционных (средне-масштабных) АФС. Характеризуясь высоким разрешением на местности, такие МДС способствуют выявлению мелких кольцевых и линейных структур, связанных с проявлениями локальных тектонических движений. В данном случае геоиндикаторами служат, главным образом, мезоформы рельефа. Детальные МДС информативны при изучении литолого-фациального состава покровных отложений (рис. 12), индикации экзогенных геологических процессов.

Структурный анализ среднемасштабных АФС более трудоемок и менее достоверен, чем МДС высоких уровней генерализации. АФС позволяют выделять густую сеть линеаментов, определенная часть которых образована только экзогенными процессами. Геологическая интерпретация подобных объектов сложна и неоднозначна. Кроме того, линеаменты большой протяженности, представленные различными комбинациями ландшафтных индикаторов, на АФС среднего масштаба выражены фрагментарно или вообще не фиксируются.

Геоинформативность МДС тесно связана со *спектральным диапазоном* дистанционного зондирования, так как ландшафтные индикаторы имеют достаточно четкую спектральную характеристику. Это позволяет распознавать геоиндикаторы с помощью многозональных съемок в видимом и ближнем ИК-диапазонах, а также в дециметровой РЛ-зоне спектра.

В зеленом спектральном диапазоне (0,5–0,6 мкм) значительный объем информации может быть получен о структурных формах и литологическом составе горных пород, дешифрирующихся по геоботаническим признакам. В этой области спектра уверенно опознаются, например, линеаменты в зоне Южно-Припятского разлома, выраженные в залесенных заболоченных ландшафтах Белорусского Полесья. Недостатком МДС в спектральном диапазоне 0,5–0,6 мкм является их низкая разрешающая способность, ограничивающая изучение различных категорий рельефа и связанных с ними линеаментов.

В красной зоне спектра (0,6–0,8 мкм), благодаря надежному отображению рельефа на МДС, появляется возможность дешифровать структурные особенности литосферы, прослеживаемые в геоморфологичес-

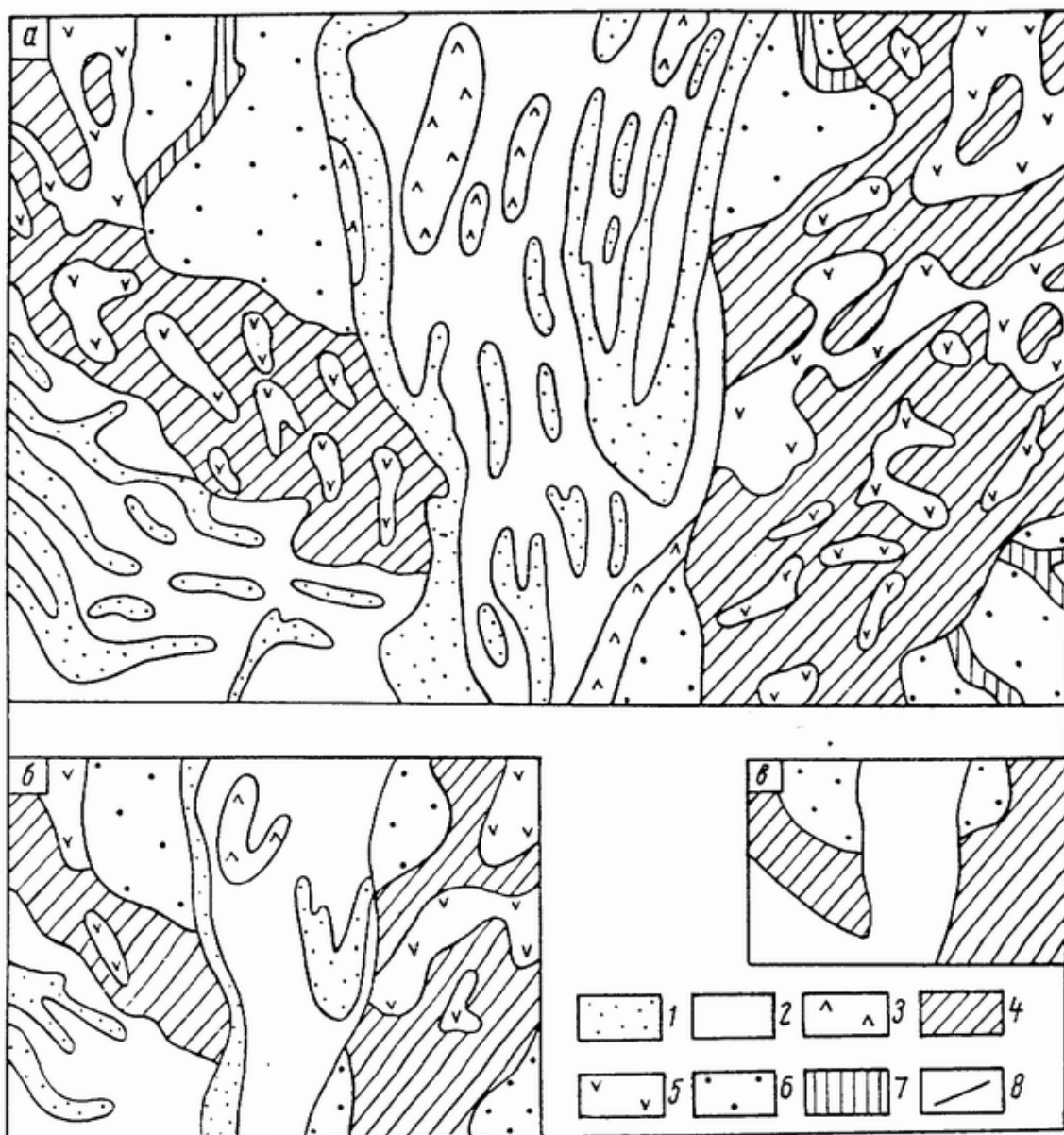


Рис. 12. Фрагменты карт четвертичных отложений одной и той же территории, составленных на основе дешифрирования аэрофотоснимков масштаба 1:17500 (а), 1:35000 (б) и 1:55000 (в): 1-3 – аллювиальные отложения поймы (1 – гумусированные супеси, 2 – пески, 3 – оторфованные пески); 4 – озерно-аллювиальные отложения (супеси, пески); 5 – болотные отложения (торф); 6 – флювиогляциальные отложения (пески, песчано-гравийные породы); 7 – перигляциальные отложения в денудационных ложбинах и балках; 8 – геологические границы

ких индикаторах. На локальных КС рассматриваемого диапазона, фрагменты Балтийско-Украинского суперрегионального линеамента довольно отчетливо выражаются в линейной ориентировке озерных котловин,

элементах речных долин и проявлениях на земной поверхности эрозионных процессов.

ИК-область спектра (0,8–1,1 мкм), снижающая влияние атмо-сферной дымки, наиболее отчетливо подчеркивает структуры, распознающиеся в морфологических особенностях рельефа. Наглядный пример этому – широтная ориентировка линеаментов над зоной Южно-Припятского суперрегионального разлома. Системы линеаментов фиксируются на КС в ИК-диапазоне и выражаются в ландшафте по прямолинейным границам между первой и второй надпойменными террасами Припяти, линейным отрезком долины Желонь.

РЛ-спектральный диапазон фиксирует структурные элементы литосферы в основном по комплексу геоморфологических признаков. Выраженность структурных форм литосферы в рельефе земной поверхности подчеркивается благодаря эффекту «скульптурности» РЛ-изображения. В зоне Северо-Припятского суперрегионального разлома субширотные системы линеаментов довольно отчетливо диагностируются даже на распаханых участках моренных равнин вследствие радиотеней РЛ-изображения, образованных мелкими формами рельефа и отрезками гидросети. В ряде случаев «просвечивающая» способность РЛ-диапазона позволяет идентифицировать погребенные структуры, не проявляющиеся на традиционных МДС.

Более полную информацию как о новейшей тектонике региона, так и о глубинном строении можно получить путем комплексного анализа различных спектральных диапазонов. При этом лучшее распознавание и выделение тектонических структур по малозаметным в ландшафте индикационным признакам осуществляется на основе МДС, полученных в четырех или шести спектральных интервалах фотографической части электромагнитного излучения. Визуальная оценка информативности многозональных снимков показывает, что лучшее отображение геологических объектов в желто-оранжевой (600 ± 20 нм) и красной (660 ± 20 нм) зонах электромагнитного спектра.

4.2. Анализ линеаментной тектоники

В свете современных теоретических представлений линеаментная тектоника как научная дисциплина рассматривает закономерности пространственного распределения и эволюции линейных неоднородностей литосферы, проявленных на поверхности Земли в виде линеаментов. Термин «линеамент» впервые предложен в начале XX в. американским геологом В. Хоббсом для обозначения погребенных структур, выражен-

ных в прямолинейных формах рельефа. Главнейшие черты линеаментной тектоники создают экспонированные на земную поверхность дизъюнктивные (разрывные) дислокации литосферы, образующие линейные морфоструктуры.

Широкое развитие космогеологических методов исследований регионов земного шара определило важный этап в изучении линеаментной тектоники. Несомненный интерес представляет анализ систем линеаментов по КС в пределах равнинно-платформенных областей. В этих геологических условиях линеаменты фиксируют разрывы, флексурно-разрывные дислокации, зоны трещиноватости и иные зоны повышенных деформаций и проницаемости литосферы, которые отражены на поверхности Земли разнообразными линейными элементами морфоструктуры и ландшафта.

В ходе изучения линеаментной тектоники западного региона ВЕП выявлены особенности пространственной дифференциации линеаментов, составлена серия космогенных карт Беларуси и сопредельных территорий. Вместе с тем вопросы геологической интерпретации линеаментов все еще слабо разработаны.

В результате комплексного анализа космогеологических и геолого-геофизических материалов получены новые данные о геологической природе линеаментов Белорусского региона. Выраженные в современном рельефе и на КС линеаментные системы являются индикаторами тектонической делимости литосферы. Они образованы под совокупным воздействием эндогенных, ротационно-планетарных и экзогенных процессов. Во многих случаях дешифрируемые линейные структуры сопряжены с проявлением на земной поверхности активных в позднеолигоцен-антропогеновое время разломов (коровых, мантийных). Подобно разрывным нарушениям разнопорядковые линеаменты по протяженности разделяются на суперрегиональные, трассирующиеся на многие сотни километров, региональные, вытянутые на десятки и первые сотни километров и локальные линеаменты небольшой длины (единицы – первые десятки километров).

Суперрегиональные линеаменты (Балтийско-Украинский, Брестско-Велижский, Северо- и Южно-Припятский и др.) обнаруживают связь с глубинными (мантийными) разломами доплатформенного и платформенного этапов заложения и развития (см. рис. 11, 12). Среди данной группы линеаментных структур отчетливо выделяется Балтийско-Украинский линеамент, прослеживаемый на КС от Карпат до Балтийского щита ВЕП. Территорию Беларуси суперлинеамент пересекает в суб-

меридиональном направлении в виде зоны эшелонированных линейных ландшафтных тектоаномалий, выраженных в основном отрицательными формами рельефа, коленообразными изгибами рек Припяти, Немана, Вилии и в других индикаторах.

Материалы геолого-геофизических съемок свидетельствуют, что Балтийско-Украинский линеамент является структурой древнего заложения и в целом совпадает с положением Белорусско-Прибалтийского гранулитового пояса в кристаллическом фундаменте. В пределах Центрально-Белорусского массива суперлинеаменту соответствуют системы мантийных разломов, с которыми связано формирование Околовской грабен-синклинали, многочисленных интрузивных образований березовского, кореличского и мостовского комплексов фундамента. По данным глубинного сейсмического зондирования данный линеамент приурочен к вытянутой впадине по поверхности Мохоровичича (М) субмеридионального простирания с глубиной залегания М порядка 45–50 км.

В структуре поверхности фундамента Балтийско-Украинский линеамент тяготеет к осевой части одноименной полосы поднятий, включающей погребенные склоны Балтийского и Украинского щитов, Латвийскую седловину, наиболее приподнятую часть Белорусской антеклизы и ее погребенные выступы. Подобные поднятия в течение всего платформенного этапа служили водоразделом морских палеобассейнов. По поверхности ложа антропогенных (покровных) отложений в зоне суперлинеамента широко развиты вытянутые котловины глубиной до 40–80 м. Подобные отрицательные формы, по-видимому, образованы древнеледниковой экзарацией. В плейстоцене зона Балтийско-Украинского линеамента контролировала распространение ледниковых покровов и формирование макроформ рельефа западной части Белорусской гряды. На КС области поозерского оледенения отчетливо дешифрируются краевые моренные комплексы и экзарационные ложбины, связанные с развитием вдоль суперлинеамента Дисненской ледниковой лопасти.

Балтийско-Украинский линеамент имеет сквозной характер и его юго-западный фрагмент трассируется в пределы западной окраины ВЕП и далее в складчатую область Карпат, изменяя свое простирание с субмеридионального на северо-восточное. На Украине ему соответствует Ковельская зона разломов (азимут 30–40°), активизированная в связи с альпийским тектогенезом в Карпатах. Южный фрагмент дешифрируемого линеамента на территории юго-запада ВЕП формировался под воздействием тектонических перемещений вероятно сбросо-сдвигового характера.

Брестско-Велижский линеамент простирается в северо-восточном направлении из района южнее Бреста по направлению к Велижу (Смоленская область Российской Федерации) на расстояние свыше 600 км. Линейная структура проявляется в современном рельефе в виде систем прямолинейно ориентированных конечноморенных осцилляций Копыльской гряды, Оршанской и Копыльской возвышенностей, отрезков долин рек Щары, Березины, Западной Двины и по другим ландшафтным признакам, которые в комплексе образуют на КС узкую полосовую аномалию светло-серого фототона.

По данным геофизических построений рассматриваемый линеамент прослеживается по оси регионального интенсивного минимума магнитного поля и вытянутой пониженной гравитационной аномалии. Протяженный его фрагмент оконтурен изогипсами поверхности М с отметками 42,5 и 45 км. Отмеченные особенности отражения суперлинеамента в физических полях, субсогласное простирание по отношению к формам рельефа М позволяют предположить его глубинное заложение.

В структурном отношении Брестско-Велижский линеамент сопряжен с осевой частью Оршанской впадины на участке Червень-Толочин, а также с Витебской мульдой. В рельефе ложа антропогенных образований он подчеркивается системой ложбин ледникового выпахивания и размыва. В региональном плане структура разделяет площади с различной мощностью покровных отложений: 110–190 м к северо-западу от линеамента и 30–110 м к юго-востоку от него. На северо-востоке республики суперлинеамент совпадает с линией Черноморско-Балтийского водораздела, что косвенно указывает на его позднеантропогенную активность.

К классу суперрегиональных структур относятся также Северо- и Южно-Припятский линеаменты, принадлежащие к планетарной системе Сарматско-Туранского трансконтинентального линеамента (см. рис. 12). Суперлинеаменты выражены крупными протяженными аномалиями типа «уступ» гравитационного и магнитного полей. На территории Припятского прогиба эти структуры сопоставляются с одноименными краевыми разломами, далее на запад – с дизъюнктивами, ограничивающими Подляско-Брестскую впадину. Наиболее тесная связь суперлинеаментов обнаруживается с восточным фрагментом Северо-Припятского разлома и Южно-Припятским дизъюнктивом в пределах Украинского щита. Оба разлома представляют собой сбросы амплитудой до 3–4 км, построенные в виде ступенчатых систем, кулисообразно сочленяющихся разрывов. Развитие дизъюнктивов связано с процессами растяжения и листрического раскалывания Припятского палеорифта в позднефранско-фаменское время.

В позднеолигоцен-антропогеновый период, как и на предшествующих этапах геологической истории, Северо- и Южно-Припятский линейные элементы отличались высокой тектонической активностью. Суммарные амплитуды деформаций на отдельных участках структур составили порядка 100–120 м. Положение восточного отрезка Северо-Припятского линейного элемента согласуется с границей максимального распространения наревского и сожского (московского) ледников. В плейстоцене эта часть линейной структуры испытала заметную активизацию под воздействием ледниковых нагрузок. Неодинаковый характер новейшего геодинамического режима в пределах Северо- и Южно-Припятского линейных элементов обусловил их дискретное проявление в ландшафтных индикаторах и на КС.

Из других суперрегиональных линейных структур на территории Беларуси следует прежде всего отметить Ошмянско-Речицкий линейный элемент, сопряженный с осевой линией Воложинского грабена и опущенным до 0,5 км участком поверхности фундамента Бобруйского погребенного выступа. Далее на юго-восток суперлинейный элемент прослеживается в пределах Днепровско-Донецкой впадины, где тяготеет к наиболее погруженным блокам фундамента. В направлении Ошмяны – Вильнюс данный линейный элемент согласуется с системой протяженных активных разломов, пересекающих почти ортогонально структурные элементы кристаллического фундамента. В областях, расположенных к северу и югу от северо-западного фрагмента суперлинейного элемента, с позднепротерозойского времени до мезо-кайнозоя включительно неоднократно менялись условия осадконакопления.

Ошмянско-Речицкий линейный элемент отличался высокой неотектонической активностью, особенно в юго-восточной части, где существенные позднеолигоцен-антропогеновые поднятия амплитудой свыше 80 м создали условия растяжения верхних горизонтов платформенного чехла. Суперлинейный элемент является осевой линией Вилейско-Бобруйской геодинамической зоны. В его пределах значения коэффициентов густоты локальных линейных элементов достигает высоких значений (до 0,14–0,16), что свидетельствует о повышенной геодинамической напряженности этого участка земной коры в новейшее время. Широкое развитие в зоне линейного элемента гидроморфных ландшафтов обусловило довольно отчетливое его выражение на КС. К суперлинейному элементу приурочены важнейшие положительные формы современного рельефа Беларуси – Ошмянская гряда и юго-западная ветвь Минской возвышенности. Контролирующую роль в формировании этих конечноморенных образований играли неотектонические движения, унаследованно проявившиеся в зоне Ошмянско-Речицкого линейного элемента.

Активным развитием в позднеантропогеновое время характеризовались также Двинско-Черниговский и Гродненско-Мозырский линеаменты. Они оказали заметное влияние на формирование доантропогеновой поверхности территории Беларуси. Двинско-Черниговский линеамент отделяет восточную часть региона с доминирующими абсолютными отметками рассматриваемой поверхности свыше 100 м (до 160–180 м) от центральной и юго-восточной (в форме залива) площадей, где кровля коренных пород имеет гипсометрический интервал между 50–100 м. Приподнятый до 140–160 м участок доантропогеновой поверхности на юге республики (склоны Украинского щита) ограничен протяженным фрагментом Гродненско-Мозырского линеамента. В пределах северо-западного отрезка Двинско-Черниговского линеамента в районе Новополоцка по данным бурения установлен сброс в породах верхнего девона амплитудой около 8 м и отмечается повышенная минерализация подземных вод.

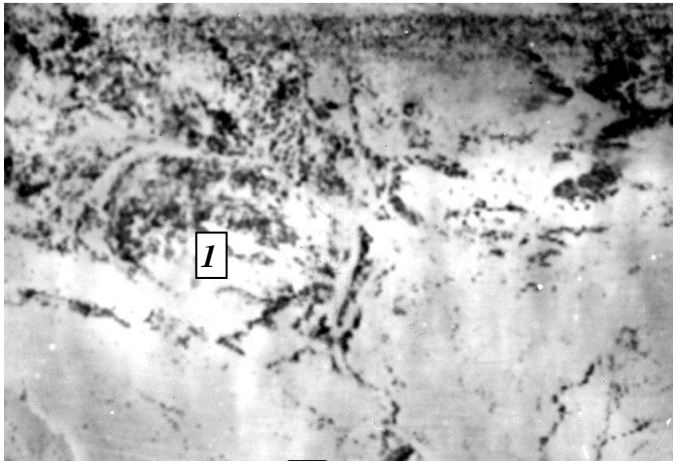
Системы *региональных линеаментов* сопряжены с разломами внутрикоркового или верхнемантийного уровней литосферы. Выраженность многих дизъюнктивов в структуре доантропогеновой поверхности и в современном рельефе указывает на их неотектоническую активность. Доминирующее простирание этой группы линеамента в пределах Беларуси диагональное, субмеридиальное и субширотное. На территории Белорусской антеклизы к региональным линейным структурам отнесен Налибокский линеамент, ограничивающий Центрально-Белорусский массив с северо-востока. На значительном протяжении линеамент согласуется с одноименным региональным разломом (сброс амплитудой 250 м), неотектонические движения вдоль которого повлияли на формирование долины Немана (в верхнем течении) и прилегающей к ней Верхне-Неманской озерно-аллювиальной низины.

Региональные линеаменты субмеридиональной ориентировки ограничивают Дятловскую, Каролинскую, Старицкую и другие структурные зоны кристаллического фундамента, заложенные вдоль мантийных разломов. С широтным линеаментом, протягивающимся на расстояние более 100 км, сопряжены Ляховичский и Свислочский региональные разломы, ограничивающие Белорусскую антеклизу с юга. Вдоль этой линейной структуры отмечается резкая смена холмисто-моренно-эрозионных ландшафтов вторичными водно-ледниковыми и озерно-аллювиальными комплексами, заметны спрямленные отрезки (до 5–6 км) речных долин Щары и Лани.

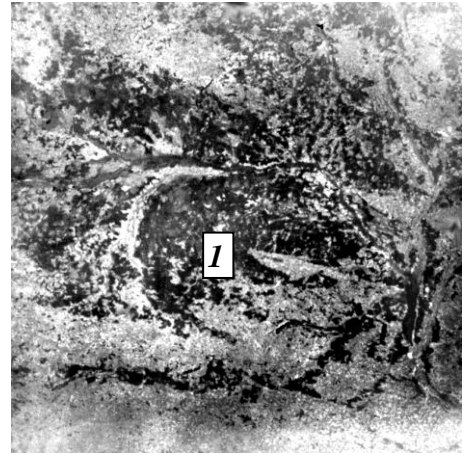
Линеаменты регионального уровня широко развиты в пределах Припятского прогиба. Здесь по комплексу дешифровочных признаков, данных сейсморазведки и бурения устанавливается их связь с разломами, ограничивающими структурные элементы прогиба. Преобладающее направление линейных структур – субширотное и диагональное. По КС в пределах Микашевичского линеамента обнаруживаются признаки отражения на земной поверхности правостороннего сдвига, диагностирующиеся в современном рельефе резким горизонтальным изгибом (длиной около 3 км) долины р. Случи на участке впадения ее в Припять.

Разломы субширотной ориентировки (Червонослободский, Речицкий и др.), сформированные в условиях тектонического растяжения, в большинстве случаев отчетливо дешифрируются на КС в виде зон повышенной трещиноватости и обводненности приповерхностных горизонтов платформенного чехла. Подобные черты проявлений линеаментов, индицирующих данный кинематический тип разрывных нарушений, установлены исследователями в других равнинно-платформенных регионах. Среди северо-восточных линеаментов на территории Припятского прогиба по данным космической съемки и сейсморазведки устанавливаются две региональные зоны разрывных разрушений: Малыньско-Туровская и Первомайско-Заозерная.

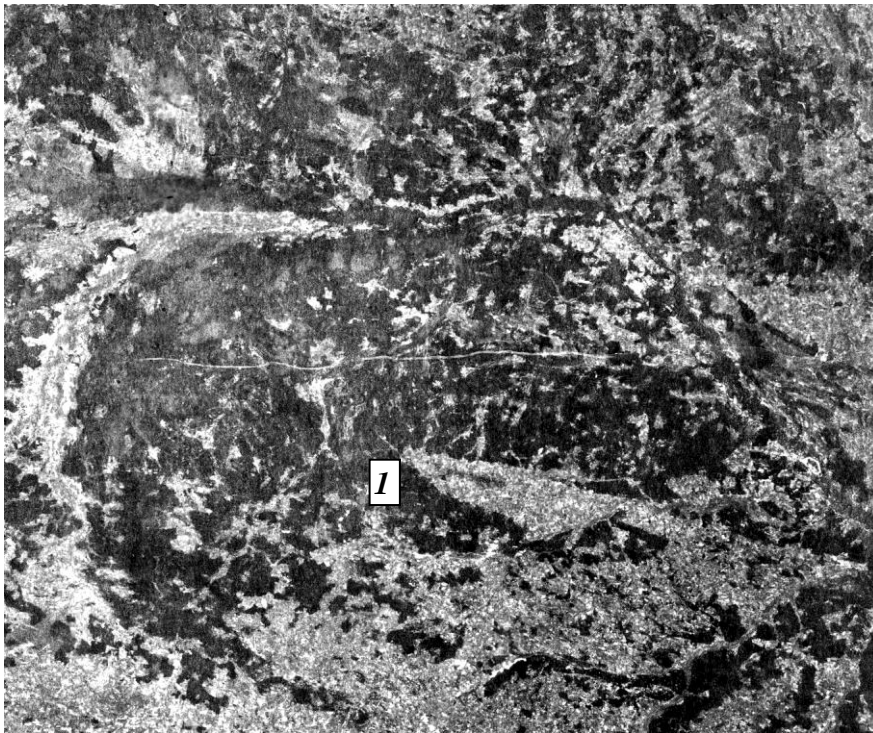
Системы *локальных линеаментов* диагонального и ортогонального простираний сопряжены с разломами, проникающими в «гранитный» и «осадочный» слои литосферы. Субмеридиональные линейные структуры довольно отчетливо дешифрируются в пределах Белорусской антеклизы, где они тяготеют к зонам дорифейской тектоно-магматической активизации. На территории Припятского прогиба локальные линеаменты нередко сопряжены с малоамплитудными дизъюнктивами, проявленными даже в верхней соленосной толще. Они устанавливаются как космогеологическими и сейсмическими методами, так и шахтными выработками в пределах Старобинского месторождения калийных солей. Достоверность выделения разрывных нарушений в породах чехла амплитудой до 50 м и безамплитудных дислокаций повышается на основе комплексной интерпретации данных дешифрирования КС и результатов сейсморазведочных работ МОГТ. Следует отметить, что на формирование линеаментов длиной до первых сотен метров в большей степени оказали воздействие поверхностные экзодинамические процессы, в том числе вызванные техногенным фактором. Этим можно объяснить плановое несоответствие значительной части коротких линеаментов разломам, установленным геолого-геофизическими методами.



a



б



в

Рис. 13. Отображение Полесской Кольцевой мегаструктуры (1) на разномасштабных космических снимках, выполненных с ИСЗ «Метеор» (а) и ПОС «Салют-4» (б,в)

Новые сведения о характере соотношения дешифрируемых линейных структур с особенностями разломной тектоники платформенного чехла получены картографо-статистическим методом. На примере Старобинской центриклинали Припятского прогиба выполнен анализ карт изокоррелят, отражающих взаимосвязи между густотой линеаментов и структурными поверхностями подсолевых и надсолевых девонских отложений. Наличие областей с существенной прямой и обратной корреляционной связью между изучаемыми явлениями подтверждает блоковое строение подсолевого ложа, дифференцированные движения которого заложили основной каркас разрывных нарушений. Последние, по видимому, проявляются в соленосных отложениях, перекрывающих пластичными массами структурные неоднородности подсолевых образований, а также трассируются в виде малоамплитудных разрывов, зон трещиноватости через мезо-кайнозойскую толщу и находят отражение в линеаментном поле земной поверхности.

При космогеологическом изучении линеаментной тектоники Белорусского региона обращается внимание на узлы пересечения линеаментов, или *кентрогенные структуры*. Такие участки литосферы характеризуются повышенной трещиноватостью и проницаемостью для флюидов, растворов, магматических образований, а также дифференцированностью новейших тектонических движений и высокой эрозионной расчлененностью земной поверхности. Кинематическими особенностями кентрогенов определяется их выраженность в отрицательных либо положительных формах современного рельефа. В первом случае активность узловых структур проявляется в режиме растяжения слоев литосферы, что создает условия для интенсивной циркуляции флюидов и подземных вод, высокой обводненности верхних горизонтов платформенного чехла и широкого развития гидроморфных ландшафтов. Кентрогены второго типа активно развиваются в состоянии динамического сжатия горных пород под воздействием положительных движений блоков фундамента, новейшей активизации интрузий, магматических тел и купольных образований. Рассмотренные соотношения кентрогенных структур с геоморфологическими формами устанавливаются, например, на территории Припятского прогиба и Микашевичско-Житковичского выступа фундамента.

4.3. Изучение кольцевых структур литосферы

Выявленные методами дистанционного зондирования кольцевые структуры, представляют собой геологические тела различного генезиса

и структурные формы (начиная с уровня локальных структур и выше), характеризующиеся наличием центра симметрии в сечении этого тела или структуры. Такие уникальные геологические объекты установлены в различных областях Земли, в том числе в пределах равнинно-платформенных территорий, затронутых плейстоценовыми оледенениями. К проблеме кольцевых структур обращено внимание в Белорусском регионе, где ведутся космогеологические исследования на протяжении двух последних десятилетий.

На территории Беларуси все многообразие дешифрируемых по МДС кольцевых структур разделено по латеральным размерам на четыре класса – крупнейшие, или мегаструктуры диаметром более 200 км, крупные – 50–200 км, средние – 25–50 км и мелкие структуры – менее 25 км (см. рис. 10, 11). Диаметр кольцевых объектов связывается с их геологической природой и глубиной заложения. Среди разнообразных генетических типов кольцевых структур возможно выделение по классификации В. А. Буша тектоногенных, метаморфогенных, магматогенных, экзогенных, космогенных и полигенных (сложного строения) структурных форм.

Полигенные кольцевые структуры. К данному типу элементов литосферы отнесены Полесская, Клинцовская и Витебская мегаструктуры. Анализ геодинамических особенностей формирования крупнейших кольцевых структур Белорусского региона позволяет предположить их длительный многоэтапный характер развития. Возникшие возможно на нуклеарной стадии эволюции Земли такие объекты определяли морфологию развивавшихся структурных форм на протяжении всей геологической истории. Так, в позднем девоне северный сегмент Полесской мегаструктуры контролировал формирование Припятского палеорифта (рис. 13, 14). На неотектоническом этапе в пределах рассматриваемой кольцевой структуры преобладали восходящие движения, характеризующиеся суммарной амплитудой преимущественно от 100 до 150 м.

В Белорусском регионе выделяются также *тектоногенные* кольцевые структуры, формирование которых обусловлено в основном процессами платформенного тектогенеза. С прогибанием участков земной коры связано образование крупных Березовской и Туровской кольцевых структур. Фрагментами активных разломов контролируется положение Ельской структуры. К другим объектам тектонического генезиса следует отнести Лунинецкую и Микашевичскую структуры. Природа Браславской кольцевой структуры проблематична в связи со слабой изученностью северо-западной части Беларуси геолого-геофизическими методами.

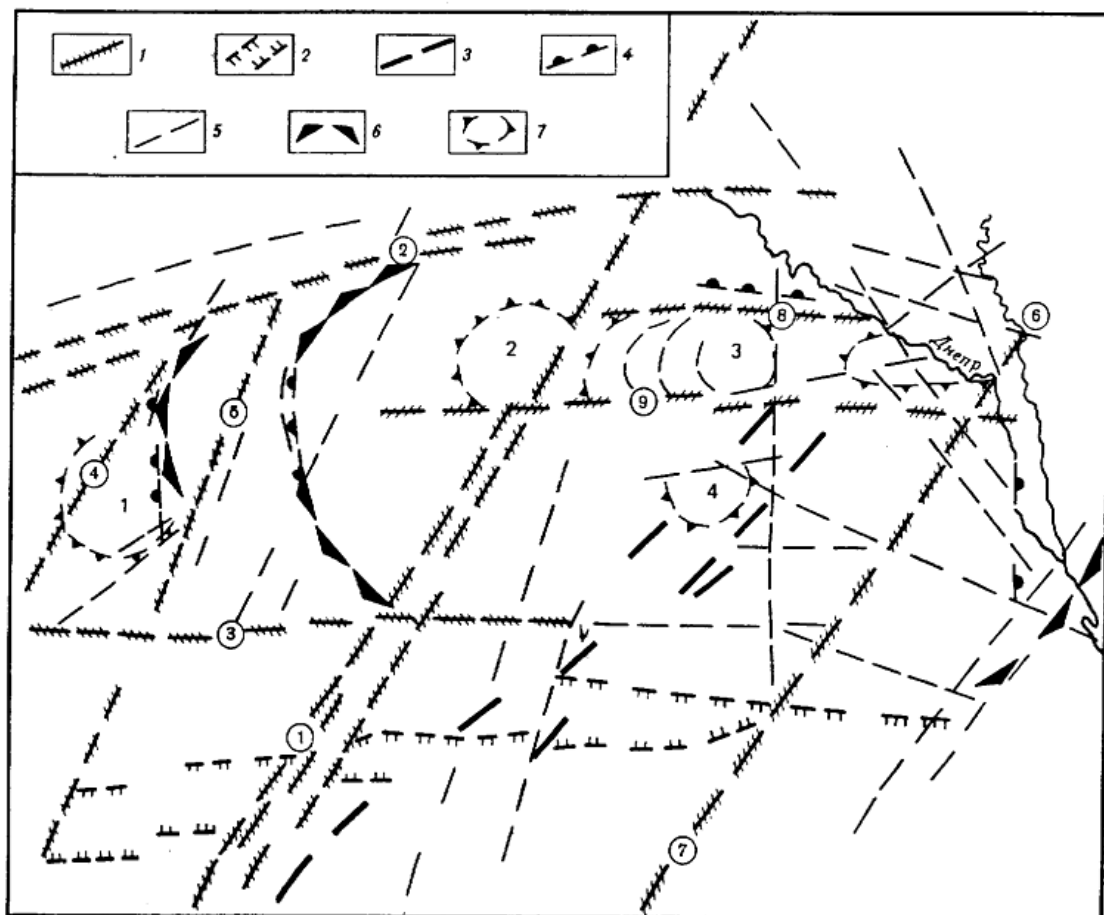


Рис. 14. Схема структурного дешифрирования космического снимка, полученного с ПОС «Салют-4»: 1 – трансрегиональные межблоковые разломы (1 – Сущано-Пержанский, 2 – Припятский, 3 – Новоград-Волынский, 4 – Владимир-Волынский, 5 – Горынский, 6 – Тетеревский, 7 – Здвижский, 8 – Припятский, 9 – Овручский); 2 – условное ограничение Днепровско-Лабской ослабленной зоны; 3 – региональные разломы 1 порядка; 4 – краевые разломы; 5 – региональные разломы 2 порядка; 6 – Полесская кольцевая мегаструктура; 7 – региональные кольцевые структуры (1 – Маневичская, 2 – Рокитнянская, 3 – Овручская, 4 – Обиходовская)

Средние кольцевые структуры, широко развитые в пределах Белорусской антеклизы, оконтуривают поднятия, реже – впадины кристаллического фундамента, сопряжены с кольцевыми дизъюнктивами, а также совпадают с гранито-гнейсовыми куполами и магматогенными образованиями. Примером изометричных объектов данного класса в районах неглубокого (первые сотни метров) залегания фундамента служит Новоградская кольцевая структура диаметром около 30 км, выделенная по материалам высотной аэрофотосъемки в сводовой части Белорусской антеклизы.

Путем комплексного анализа МДС и геолого-геофизических материалов наиболее полно изучены кольцевые структуры диаметром менее 25 км. На территории Белорусской антеклизы среди кольцевых образований данного класса размерности развиты в основном тектоногенные структуры, обнаруживающие связь с малоамплитудными поднятиями по поверхности кристаллического фундамента. Кольцевые объекты часто выражены в рельефе ложа антропогенных отложений в виде изометричных возвышенностей амплитудой в несколько десятков метров. На новейшем этапе мелкие кольцевые структуры испытывали в основном положительные деформации.

На территории Припятского прогиба выявляется большая группа кольцевых форм диаметром от первых километров до 8–12 км, обусловленных развитием погребенных локальных структур как в фундаменте, так и в платформенном чехле. Среди таких структур доминируют купола и брахиантиклинали в верхнесоленосных и надсолевых отложениях верхнего девона. Преобладающая часть поднятий тяготеет к разломным зонам или локализуется над выступающими блоками поверхности фундамента и подсолевых образований чехла.

Происхождение *метаморфогенных* кольцевых структур связано с основным этапом гранитизации протокоры в раннепротерозойское время. Среди объектов подобного генезиса наиболее изучена Велешинская структура диаметром 17 км, расположенная в сводовой части Бобовнянского выступа Белорусской антеклизы. Устанавливается сопряженность дешифрируемого объекта с соразмерной антиклинальной складкой фундамента. Причиной образования Велешинской структуры явилась региональная гранитизация вмещающих кристаллических пород, вызвавшая формирование зон трещиноватости и систем кольцевых дизъюнктивов. Во многих случаях древние докембрийские гранито-гнейсовые купола, дешифрируемые на МДС, обнаруживаются в современном рельефе в виде изометричных блоков.

Магматогенные кольцевые структуры. Их формирование вызвано активизацией процессов подкорового магматизма в раннем протерозое. Магматогенными образованиями возможно являются кольцевые структуры в северо-восточной части Припятского прогиба, отражающие погребенные вулканические сооружения. К кольцевым объектам магматогенной природы в пределах Белорусской антеклизы следует отнести Каменецкую и Аргеловщинскую структуры с размерами в поперечнике соответственно около 9 и 0,4 км.

Магматогенные кольцевые структуры хорошо изучены на ВЕП и в пределах Африканско-Аравийского кратона. Одной из наиболее известных кольцевых образований подобного генезиса является структура Ришат, расположенная в пределах запада Сахарской плиты. Она имеет четко выраженное концентрическое строение, связанное с выходами твердых преимущественно песчаных образований различного возраста (рис. 15). Д. М. Трофимовым на основании полевых исследований установлено, что структура Ришат связана с диапировой интрузией долеритов, частично обнажающихся в ее пределах.

Класс мелких структур широко представлен *экзогенными* кольцевыми образованиями. Подобные объекты в области древнематерикового оледенения выражены изометричными очертаниями каменных массивов, реликтовых криогенных форм, озерных котловин, напорных конечных морен, термокарстовых и суффозионных западин и т. п.

Довольно отчетливое выражение в современном рельефе имеет Боровненская кольцевая структура, представляющая собой образование криогенной природы – пинго. Кольцевой объект выделен по данным дешифрирования на западе Лучесинского лимногляциального бассейна. Морфологически пинго представляет собой узкий (0,1–0,6 км) кольцевой вал (гряды), окаймляющий оз. Боровно, с размерами по длинной оси 2,6 км, короткой – 1,8 км. Гряда сложена лимногляциальными песками с тонкими ритмически повторяющимися прослоями супесей и суглинков. Образование подобных объектов, по-видимому, происходило во время последнего позднеледникового под воздействием криостатического давления в условиях промерзания неглубоких (средняя глубина 5–8 м) озерных водоемов.

Среди *космогенных* кольцевых образований, возникших в результате падения метеоритов, на территории Беларуси выделена Логойская астроблема (рис. 16). Ее импактное происхождение установлено геолого-геофизическими методами по присутствию следов ударного метаморфизма в скальных породах девона, венда и нижнего протерозоя. Обнаруженный в кристаллических образованиях фундамента взрывной кратер диаметром около 6,5 км перекрыт осадочным чехлом мощностью в несколько сотен метров. Вместе с тем контур астроблемы отражается ореолом повышенной трещиноватости покровных (четвертичных) отложений, но существенно большим по диаметру (около 13 км), чем погребенный кратер. Образованная в результате ударного воздействия зона дробления пород чехла и фундамента, по-видимому, унаследована развивалась под влиянием эрозионных процессов на неотектоническом этапе,

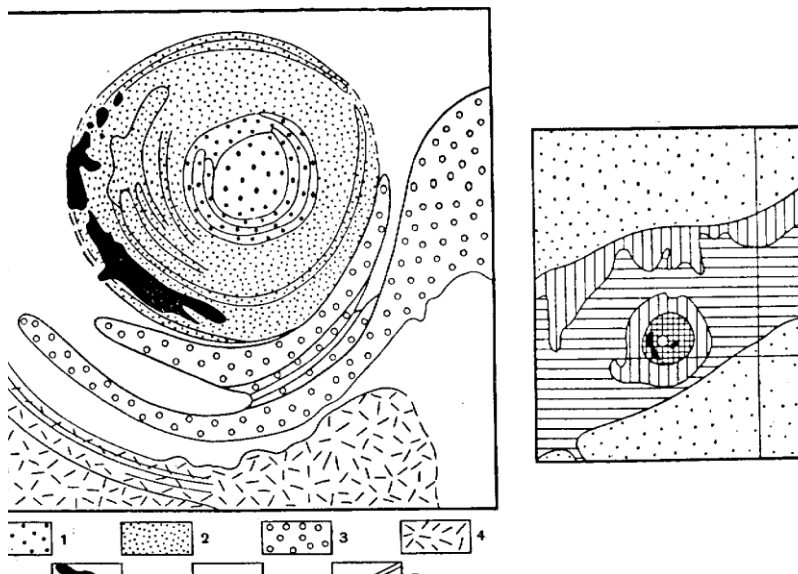
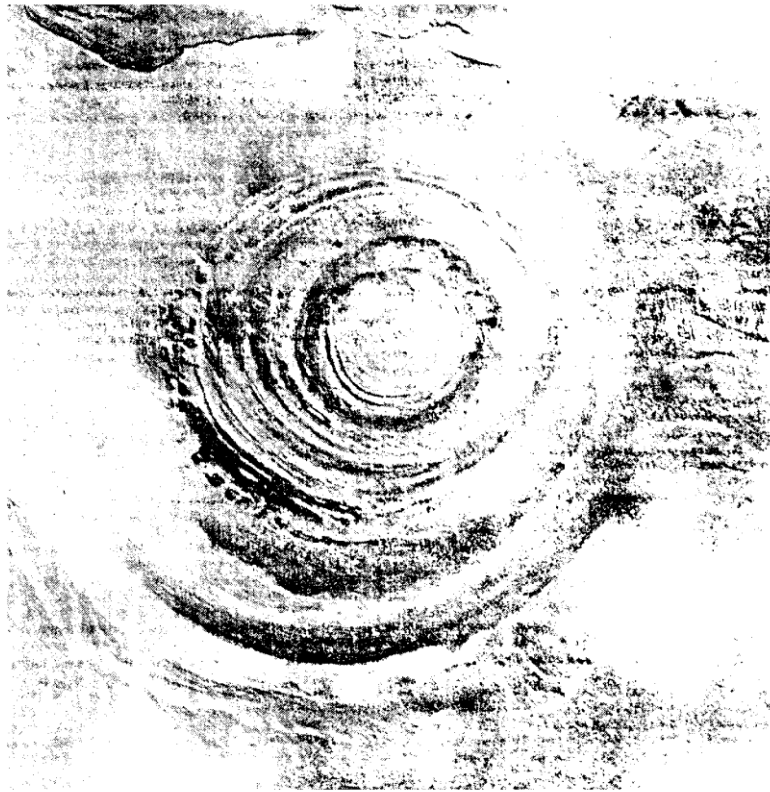
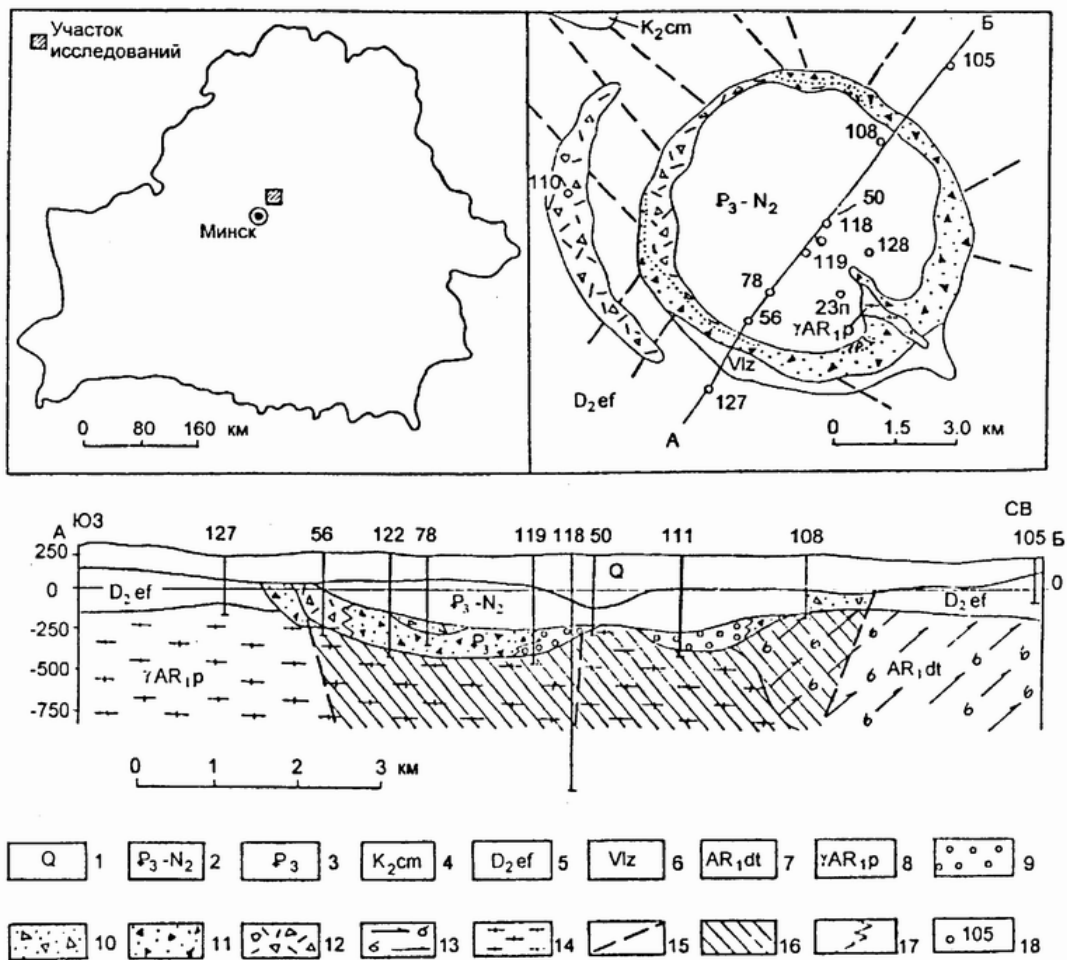


Рис. 16. Космический снимок кольцевой структуры Ришат, полученный с ПКК «Союз-9» (а), схема дешифрирования по Д. М. Трофимову (б) и фрагмент геологической карты, изображающий ту же структуру (в): 1 – рифей; 2 – венд; 3 – кембрий; 4 – ордовик; 5 – долериты; 6 – пески; 7 – отдешифрированные маркирующие горизонты



что способствовало проявлению Логойской импактной структуры в современном рельефе в виде систем изометричных линеаментов.

Рис. 17. Геологическая карта дочетвертичных отложений Логойского метеоритного кратера (по Е. И. Громову): 1 – квартал; 2 – олигоцен–плиоцен; 3 – олигоцен; 4 – верхний мел, сенманский ярус; 5 – средний девон, эйфельский ярус; 6 – венд, лиозненская свита волынской серии; 7 – нижний архей, щучинская серия, дитвинская толща; 8 – нижний архей, полонский интрузивный комплекс. Породы коптогенного комплекса: 9 – зювиты; 10–12 – аллогенные брекчии из обломков и глыб гранитогнейсов (10), верхнепротерозойских (11) и девонских (12) пород; 13 – гнейсы биотитовые, амфибол–биотитовые; 14 – гранитогнейсы биотитовые, порфиробластовые; 15 – разрывные нарушения; 16 – зона вторичной трещиноватости пород; 17 – границы фациальных подразделений одновозрастных пород; 18 – буровые скважины и их номера

К настоящему времени на Земле обнаружено около 200 метеоритных кратеров. Самый большой из них – кратер Чиксулуб (Мексика, полуостров Юкатан) имеет диаметр 180 км. Многие ученые предполагают, что некоторые гигантские кольцевые структуры имеют импактную природу. Возможно, именно метеориты образовали такие заливы, как Гудзонов (диаметр 400 км) или Святого Лаврентия (290 км), Прибалхашско-Существующие различия кольцевых форм в классе размерности и особенностях геологической природы определили характер их распределения в пределах Беларуси и сопредельных территорий. Крупнейшие мантийно-очаговые Полесская и Клинцовская структуры, оказавшие влияние на формирование мегаблоков земной коры, на протяжении фанерозоя контролировали развитие соответственно Припятского прогиба и Воронежской антеклизы. К глубоко погруженной части Оршанской впадины тяготеет Витебская мегаструктура тектоногенного типа. С процессами платформенного тектогенеза связано также образование крупной Березовской кольцевой структуры, занимающей северную область Подляско-Брестской впадины и западный склон Полесской седловины. Микашевичско-Житковичский выступ охватывает Лунинецкая структура. Отмечается соотношение крупных Микашевичской, Туровской и Ельской кольцевых форм со структурными элементами Припятского прогиба.

К области неглубокого (до минус 0,5 км) залегания поверхности фундамента Белорусской антеклизы приурочены кольцевые структуры среднего класса размерности. Здесь они отражают главным образом выступы, реже депрессии погребенного фундамента и кольцевые дизъюнктивы. Сходные по размерам структуры дешифрируются в пределах других приподнятых и тектонически консервативных участков земной коры (Полесская седловина, Суражский погребенный выступ и др.).

Заложение ядер многих гетерогенных кольцевых форм Белорусского региона тесно связано с активизацией процессов тектогенеза, метаморфизма, магматизма, либо совокупностей этих явлений, образующих структурно-вещественные неоднородности литосферы изометричных очертаний. В результате многократных геодинамических напряжений по периферии кольцевых объектов формировались зоны повышенной трещиноватости пород фундамента и платформенного чехла, в которых заметно усиливались экзодинамические процессы, осуществлялся активный массоперенос глубинного вещества. Вследствие значительных различий в физико-механических свойствах погребенных концентрических в плане геологических тел (структур) и окружающего субстрата, неотектонические движения способствовали образованию пликативных де-

формаций в приповерхностной толще чехла и кольцевой ориентировки элементов ландшафта. Косвенно это подтверждается характером изменения суммарных амплитуд позднеолигоцен-антропогенных деформаций, наибольшие значения которых достигают в пределах многих кольцевых структур.

4.4. Исследование динамики плейстоценовых оледенений

Гляциодинамическая структура и ее изменения в процессе деградации оледенений отразились на земной поверхности в размещении комплексов форм и типов ледниковой скульптуры. Это позволяет фиксировать проявления гляциодинамики на МДС путем анализа ландшафтных индикаторов, дешифровочных признаков и геолого-геоморфологических данных.

Гляциодинамические реконструкции области древнематерикового оледенения по комплексу дистанционных и геолого-геоморфологических данных позволяют раскрыть региональные закономерности в размещении краевых ледниковых комплексов, гляциодислокаций, в локализации проявлений гляциоизостазии и криогенных процессов, а также установить роль неотектоники в развитии ледниковых покровов и гляциоморфогенезе.

Среди гляциодинамических структур, выявленных дистанционными методами, наиболее отчетливое выражение в ландшафтных индикаторах и на МДС получили гляциодислокации складчато-чешуйчатого типа. По мнению Э. А. Левкова они представляют собой закономерно построенные комплексы, сформированные под воздействием вертикальной и горизонтальной составляющих движущегося льда. Такие структуры слагают большинство возвышенностей Беларуси и морфологически лучше всего выражены в краевой ледниковой зоне. На земной поверхности подобные гляциодислокации обнаруживаются в виде дугообразных форм рельефа различных размеров, что позволяет надежно фиксировать их по параллельно-полосчатому рисунку аэрокосмического фотоизображения. Благодаря многоступенчатой генерализации МДС достигается возможность дистанционного изучения складчато-чешуйчатых сооружений различных уровней.

Элементарные комплексы напорных образований, сформированные в результате экзарационно-аккумулятивной деятельности одного ледникового языка, представляют собой *скибовые сооружения*. Они образованы системами складок и чешуи (скиб), сопряженных по надвиго-

вым плоскостям. Скибовые сооружения обычно проявляются на земной поверхности в форме параллельно-грядового рельефа. Гряды вытянуты по простиранию на расстояние от нескольких сотен метров до 1–3 км. Их ширина около 100–350 м, высота до 10–15 м. Склоны гряд более пологие (до 10–20 град.) во внутренней (проксимальной) части и на 3–5 град. круче с дистальной стороны.

Такие гряды как бы нанизаны на осевые ледниковые ложбины, которые имеют длину от первых сотен метров до 30–50 км и ширину от нескольких десятков метров до 5–8 км. С дистальной стороны напорные образования примыкают к поперечным ледниковым ложбинам. Расположенные здесь озера имеют вытянутую форму в плане и характеризуются значительными глубинами (оз. Долгое – 53,6 м, оз. Плисса – 32,9 м, оз. Сенно – 31,5 м). Котловины этих водоемов парагенетически связаны с соседними положительными формами рельефа и представляют собой ложбины ледникового выдавливания. Ориентировка переуглублений гляциогенного генезиса соответствует направлению движения ледяных масс (рис. 18).

Отличительной чертой напорных образований на МДС являются их приуроченность к системам ледниковых ложбин и дугообразная форма в плане. Внутренняя структура конечноморенных гряд прослеживается на АФС благодаря проявлению в ландшафте торцовых частей погружающихся скиб-чешуй и гребней скиб-складок. При индикации скибовых нарушений в условиях залесенных территорий важны выявление аномальных по производительности древостоев и учет обилия ксерофильных видов и видовой насыщенности в напочвенном покрове.

С площадями распространения конечноморенных скиб обычно совпадают поля развития отторженцев. Их дешифрирование возможно в том случае, если пластины перемещенных образований выступают над кровлей моренного горизонта и выходят на земную поверхность. По периферии напорных образований на АФС удастся различить крупные валуны, ориентировка длинной оси которых обычно совпадает с направлением движения ледникового языка, подчеркивая напорный характер его внешних дуг.

На МДС диагностируются инъективные формы, или гляциодиапиры, образованные разного рода внедрениями материала одних слоев ледникового субстрата в пространство других. Уверенно дешифрируются крупные диапиры, получившие прямое отображение в рельефе. Обычно они выражены в виде холмов, гряд и других возвышений относительной высотой до 30–80 м и протяженностью до нескольких километров.

Языковые комплексы краевых образований. На КС локального уровня генерализации заметно, что элементарные конечноморенные гряды выстраиваются в виде дуг шириной 1–5 км и протяженностью от нескольких до 60–80 км. В осевых частях и на крыльях дуг нередко наблюдаются разрывы, разбивая такие сооружения на отдельные сегменты. Дешифрируемые на КС дуговидные цепи конечных морен образуют языковые комплексы шириной внешних дуг около 15–30 км. В свою очередь сближенные гирлянды формируют более массивные краевые пояса (Ошмянско-Минский, Гродненско-Новогрудский и др.), различимые в основном на региональных КС.

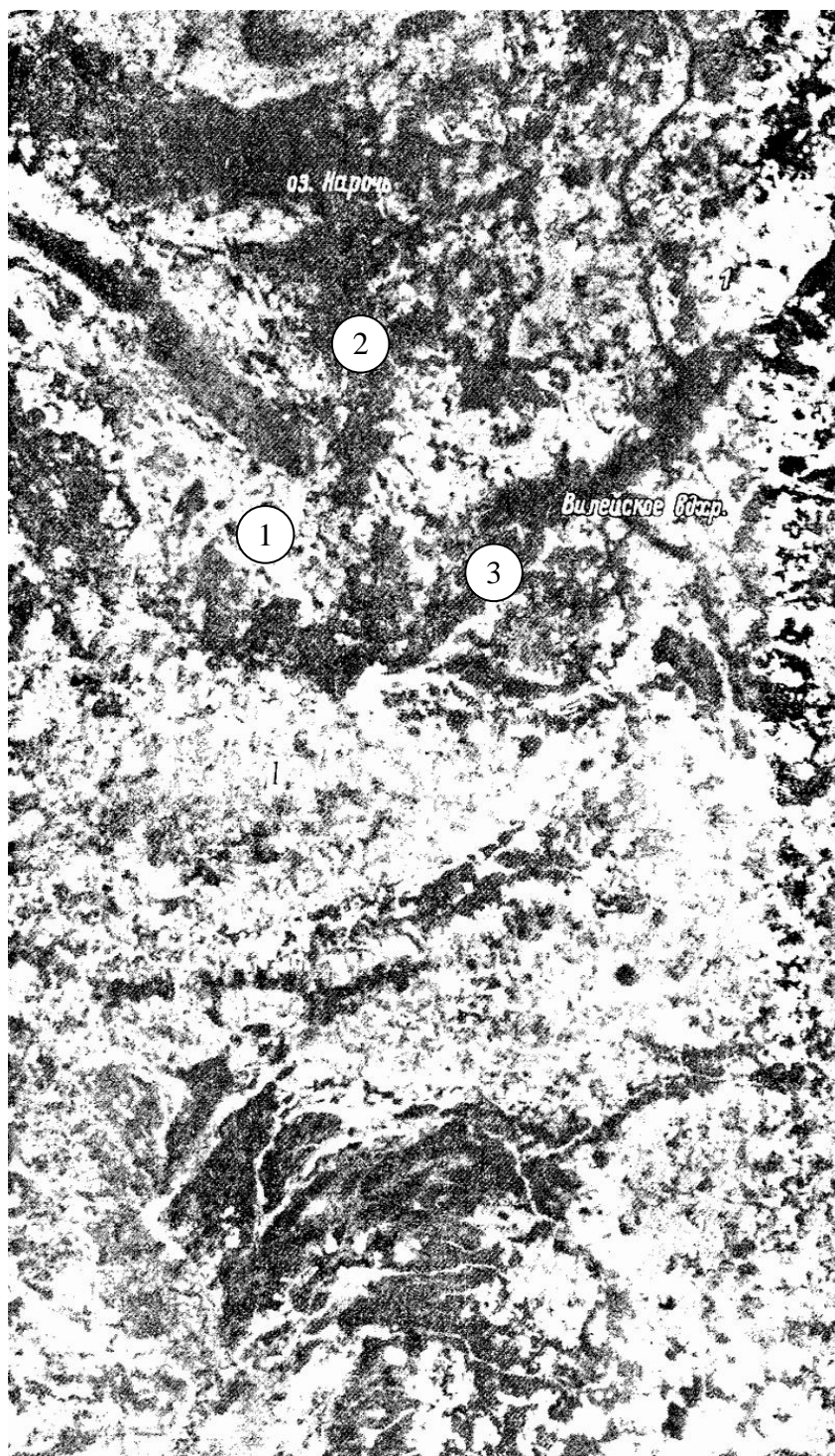


Рис. 18. Отражение структуры дисненской ледниковой лопасти поозерского оледенения на космическом снимке, полученном с ИСЗ «Лэндсат» в спектральном диапазоне 0,8-1,1 мкм: 1 - конечноморенные комплексы; 2, 3 - ложбины ледникового выпахивания (2) и выдавливания (3)

Признаки *гляциоизостатических движений*. Если краевые ледниковые комплексы, получившие прямое отражение в рельефе современной поверхности, дешифрируются в той или иной степени однозначно, то обнаружение по МДС проявлений гляциоизостазии, вызванных нагрузкой значительных масс льда, сопряжено со значительными трудностями. По данным Э. А. Левкова и А. К. Карабанова, современное гляциоизостатическое воздымание земной поверхности, до сих пор сказывающееся в Фенноскандии и узкой зоне ее сочленения с Русской плитой, на территории Беларуси не проявляется даже в Поозерье, покрывавшемся льдом всего несколько десятков тысяч лет назад. Поэтому оценка подобных явлений в этом регионе на основе дешифрирования МДС информативна в том случае, если гляциоизостатические движения отражены в геолого-геоморфологических особенностях. Причем геоиндикаторы наиболее достоверны в области последнего поозерского оледенения и в перигляциальной зоне непосредственно у края ледника.

В периферической полосе последнего оледенения ландшафтные признаки гляциоизостазии обнаруживаются в пределах локальных неотектонических структур. В плейстоцене последние отличались повышенной активностью, в значительной мере обусловленной гляциоизостатическим фактором. Дешифровочными критериями рассматриваемых гляциодеформаций служат разрывы рек на потоки, текущие в противоположных направлениях, изменения в ориентировке водотоков, подпруживание рек и образование озер. Инверсия речного стока отчетливо диагностируется на МДС в полосе предельного распространения поозерского ледника. Здесь многие реки, принадлежащие бассейнам Днепра и Западной Двины, имеют уплощенные водоразделы с относительным превышением около 10–20 м, а сама водораздельная линия в общем близка границе оледенения. Сходные аномалии в строении гидросети дешифрируются на участках Черноморско-Балтийского водораздела.

О характере гляциоизостазии можно судить на основе геоиндикационного изучения морфологии озерно-ледниковых и речных террас. Дешифрирование особенностей строения террасовых уровней Полоцкой озерно-ледниковой низины позволило И. Э. Павловской установить заметный региональный перекося этой территории, образовавшийся после снятия нагрузки периферической части поозерского ледника. Судя по амплитуде высот верхних террасовых поверхностей, гляциоизостатическое поднятие составило около 20 м. В пользу воздымания территории, оставленной последним ледниковым покровом, говорит также тот факт, что в Белорусском Поозерье в долинах крупнейших рек (Западная Двина,

Неман, Виляя) верхние голоценовые террасы приподняты до 6–10 м, тогда как на запредельной площади (примерно в 100 км южнее) одновозрастная им высокая пойма только иногда достигает 3–4 м.

Реликтовые криогенные структуры, образованные мерзлотными процессами, широко развиты в условиях Беларуси к югу от границы поозерского оледенения. В ходе дистанционных исследований предельных краевых образований последнего ледника южнее Лепеля, Новолукомля и Ушач Витебской области выявлены площади распространения полигонально-блочного рельефа и установлены соотношения этих структур с ледниковыми комплексами. Криогенный микрорельеф, формирующий ячеисто-мозаичный рисунок аэрокосмоизображения, представлен 4–6-угольными полигонами с размерами сторон от 30–40 до 150–200 м.

Среди типичных форм криогенного генезиса в пределах лимногляциальных равнин по МДС впервые обнаружены реликтовые пинго (гидролакколиты). Высота таких форм колеблется от 3 до 70 м, а их диаметр в большинстве случаев – от 30 до 800 м. Данные дешифрирования свидетельствуют о том, что пинго образуют непрерывную полосу по периферии поозерского ледникового покрова. На КС криогенные формы выглядят в виде систем кольцевых структур общей протяженностью от 1,5 до 7–8 км, составленных из наложенных друг на друга либо слившихся пинго и термокарстовых просадок. В каждой из этих групп присутствует крупная кольцевая форма размерами в поперечнике от 0,3 до 3 км с заболоченной низиной или озером в центре. В качестве эталона для дешифрирования реликтовых пинго может быть приведен наиболее крупный из них – Боровненский кольцевой объект, расположенный в Белорусском Поозерье. Его морфология описана выше в разделе 4.3.

Роль неотектоники в динамике покровных оледенений. Заметное воздействие на распределение плейстоценовых ледниковых покровов и интенсивность гляциоморфогенеза оказали новейшие тектонические процессы. В Белорусском регионе установлены пространственные соотношения активных в плейстоцене структур платформенного чехла и фундамента с особенностями древнеледниковой морфоскульптуры.

Ведущую роль в накоплении мощных моренных толщ и образовании основных макроформ Белорусской гряды сыграло высокое положение кристаллического фундамента (абс. отм. от 50 до –500 м). Ледниковая аккумуляция усиливалась, как указывает А. В. Матвеев, также в районах Беларуси с устойчивым тектоническим прогибанием. Давление от нагрузки ледяных масс создавало в недрах обширное поле напряжений. При незначительной мощности платформенного чехла ледниковый по-

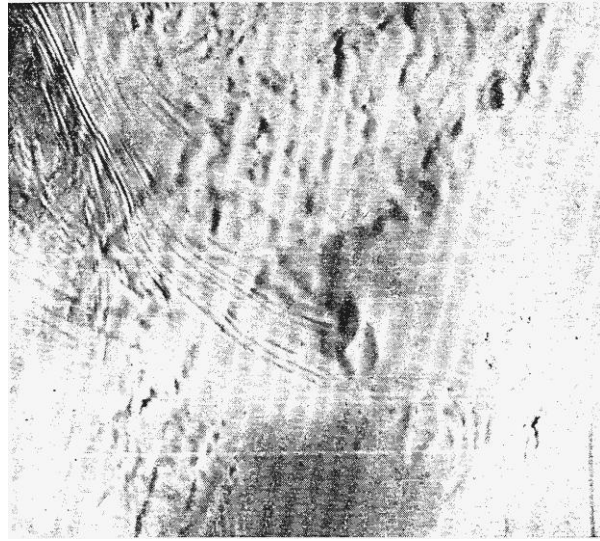
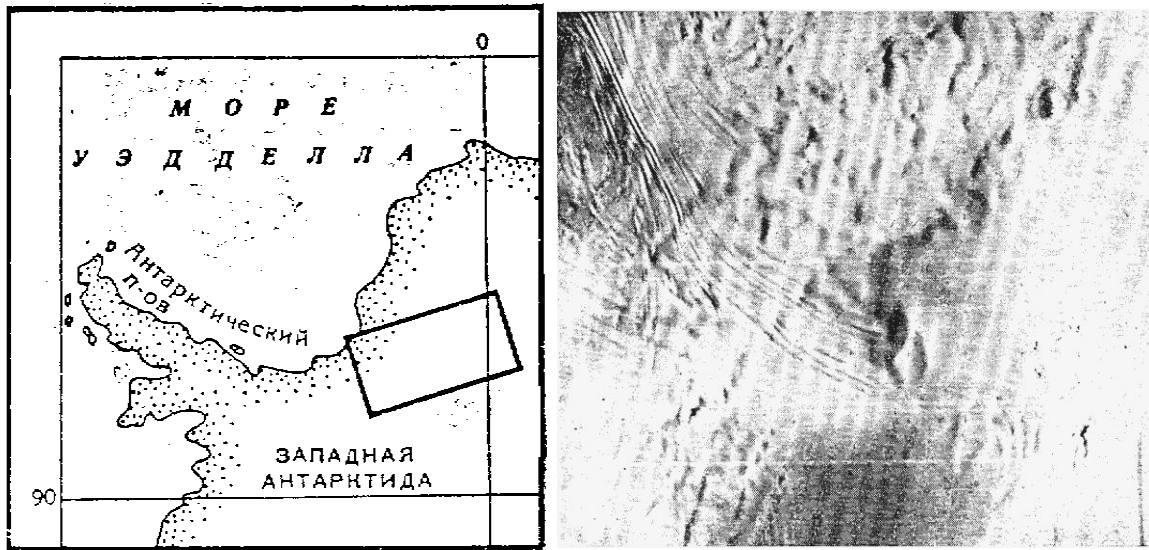
кров способствовал активизации движений блоков консолидированного фундамента, приводящих к интенсивному расчленению доплейстоценового рельефа и, как следствие, высокой степени воздействия ледника на ложе.

При аэрокосмическом изучении влияния неотектоники на динамику плейстоценовых оледенений обращается внимание на пространственное соотношение ледниковых комплексов с кольцевыми и линейными структурами. Подобные структурные формы являются показателями тектонической делимости и гетерогенной неоднородности земной коры, а их проявление в ландшафтах области древнематерикового оледенения в большинстве случаев носит опосредованный характер.

Структурные элементы контролируют также развитие современных ледниковых покровов. Это наглядно подтверждено В. М. Будько путем анализа КС Западной Антарктиды. Здесь в структуре ледяных масс находят отражение разломы, кольцевые структуры и блоки земной коры (рис. 19).

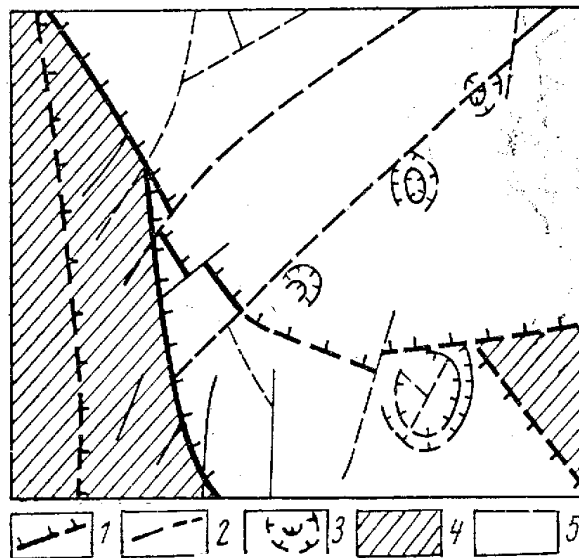
Среди разнообразных генетических типов кольцевых образований для выяснения гляциодинамики анализируются тектоногенные структуры диаметром до 50 км. Последние во многих случаях отражают контуры погребенных мелких выступов, либо депрессий фундамента, локальные тектонические структуры (положительные и отрицательные) чехла, изометричные формы рельефа ложа антропогенного покрова, а также кольцевые дизъюнктивы.

На территории Беларуси участки земной поверхности, испытавшие неотектоническое воздымание амплитудой от нескольких десятков до 150–170 м, сопряжены с проявлением в современном рельефе в основном положительных тектонических кольцевых структур. Отмечается связь таких кольцевых объектов с ледораздельными зонами, контролировавшими движение ледниковых потоков в дистальном направлении. Межпотоковые ледоразделы тяготеют к положительным тектоническим структурам диаметром 25–30 км: Новогрудской, Гродненской, Минской и др., связанным с поднятием поверхности фундамента и плейстоценового рельефа. Обычно к ним приурочены конечно-моренные комплексы, образованные мощными дислоцированными толщами. С группой кольцевых структур диаметром 15–25 км связано размещение межлопастных ледораздельных зон, отличающихся повышенной мощностью морен ранних этапов оледенений. Дешифрируемые межъязыковые ледоразделы сопряжены с кольцевыми структурами с размерами в поперечнике до 15 км и представляют собой радиальные конечно-моренные комплексы локализующиеся в пределах моренного цоколя.



а

б



в

Рис. 19. Ледниковая область Западной Антарктиды. Особенности отражения структурных форм на поверхности выводного ледника при его мощности 500–700 м:

А – обзорная схема региона; Б – фрагмент космического снимка масштаба 1:1 300 000, полученного с ИСЗ “Космос”; В – схема дешифрирования по В.М. Будько: 1, 2 – разломы: 1 – региональные, 2 – локальные; 3 – кольцевые структуры; 4, 5 – тектонические блоки: 4 – приподнятые, 5 – погруженные

Среди большой группы кольцевых структур, контролирующей формирование ледораздельных зон устойчивыми положительными движениями на протяжении всего плейстоцена характеризовались изометричные объекты тектоногенного типа диаметром порядка 25–30 км.

На таких участках земной поверхности происходило торможение или полная остановка ледяных масс, что способствовало накоплению мощных ледниковых толщ и образованию значительно расчлененного рельефа.

Существенное воздействие на развитие ледниковых покровов оказали активные на неотектоническом этапе разломы, в том числе системы линейных дислокаций ротационно-планетарной природы. В плейстоцене зоны активных разломов отличались разуплотнением и высокой трещиноватостью доплейстоценовых пород. Вследствие избирательной гляциальной экзарации в пределах таких участков земной коры формировались ложбины ледникового выпахивания и размыва. По данным дешифрирования КС устанавливается взаимосвязь ряда разломов с ориентировкой ледниковых ложбин. Гляциодинамика усиливалась в местах проявления системы линейных дислокаций с азимутами простираций $17-287^\circ$ и $62-332^\circ$.

Региональный космогляциодинамический анализ. Высокой информативностью отличаются МДС при реконструкции динамической структуры последнего (поозерского) ледникового покрова, проникавшего на территорию севера Беларуси 17–20 тыс. лет назад. На основе комплексной интерпретации результатов дешифрирования и геолого-геоморфологических материалов удалось выяснить региональные черты распределения главнейших гляциодинамических комплексов, их пространственное соотношение с неотектоническими структурами и элементами ротационной геодинамики (рис. 20).

Установленная на КС полоса фронтальных ледниковых комплексов в основном совпадает с проведенной ранее границей максимального распространения поозерского ледника. Наибольшие отклонения от этой границы составляют 15–25 км (правобережье Вилии в районе Вилейки и Сморгони, а также территория между Лиозно и Смоленском).

Краевые ледниковые комплексы в плане образуют три крупных различных на КС дуговидных выступа шириной до 100 км и протяженностью порядка 150–170 км. Их формирование связано с развитием дисненской, полоцкой и витебской ледниковых лопастей. Причем дисненская и витебская лопасти отличаются правильными дугообразными очертаниями, а внешний край полоцкой лопасти состоит из серии мелких выступов шириной 25–30 км и протяженностью 40–50 км. Последние представляют собой краевые образования ледниковых языков: ушачского, лепельского и селявского.

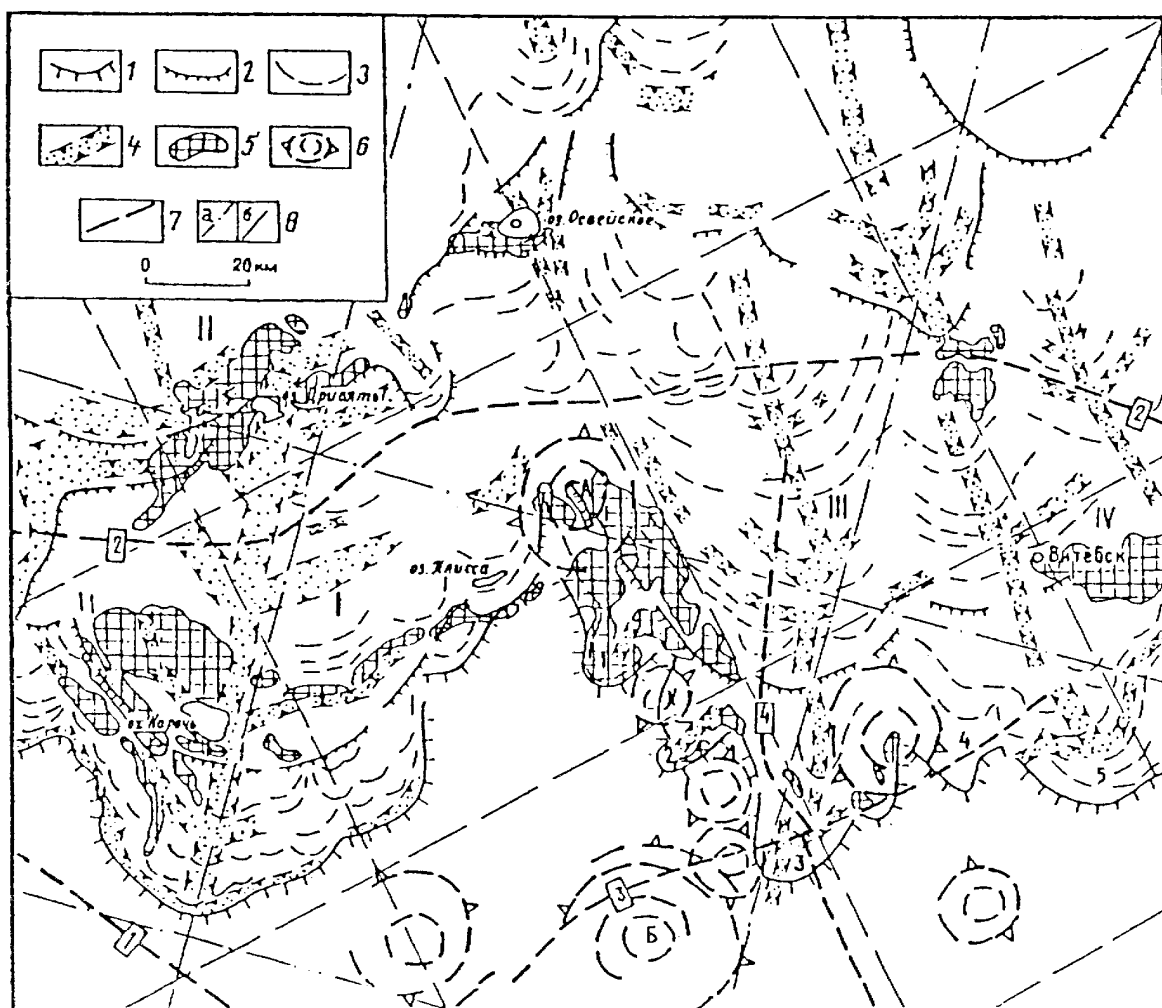


Рис. 20. Динамическая структура поозерского ледникового покрова по данным дешифрирования космических снимков:
 1-3 – границы поозерского оледенения: 1 – максимальная, 2 – стадий и фаз, 3 – отдельных осцилляций; 4 – ледниковые ложбины; 5 – конечноморенные комплексы; 6 – кольцевые структуры: А – Ветринская, Б – Борисовская; 7 – разломы (цифры в прямоугольниках): 1 – Ошмянский, 2 – Полоцкий, 3 – Выжевско-Минский, 4 – Чашникский; 8 – регматические системы линейментов с азимутами простираций 17 и 287°(а), 62 и 332° (б). Ледниковые лопасти: I – дисненская, II – восточно-латвийская, III – полоцкая, IV – витебская; ледниковые языки: 1 – ушачский, 2 – лепельский, 3 – селявский, 4 – сенненский, 5 – ореховский

По КС удалось выявить угловые несогласия в плановом расположении краевых ледниковых комплексов, что позволяет предположить разновременность их формирования в ходе активного развития поозерского ледника. Резкие несогласия, или «срезания», зафиксированы в районе Швенчениса (Литва), западнее и восточнее оз. Освейского, севернее оз. Свино и к востоку от Невеля. Такой характер пространственного со-

отношения краевых форм свидетельствует о нескольких значительных этапах в развитии ледникового покрова, соответствующих трем-четырем стадиям или фазам наступания ледника и сопровождающихся существенной перестройкой структуры и динамики поозерского оледенения. Данные дешифрирования пространственного распределения конечных морен подтверждают вывод о том, что динамика ледниковых лопастей и отдельных языков была в значительной степени автономной.

По МДС выявляются закономерности внутреннего строения лопастных и языковых комплексов ледниковых образований, подчеркивающих гляциодинамическую структуру поозерского оледенения. Маргинальные элементы этих форм, как правило, располагаются относительно друг друга и субпараллельно главным фронтальным полосам краевых комплексов.

Существенное влияние на структуру и динамику последнего ледникового покрова в Беларуси оказали переуглубления доплейстоценового рельефа, дешифрируемые на КС в виде протяженных (150–200 км) линейных элементов и определяющих их звеньев длиной 5–25, реже 45–50 км. На таких участках земной поверхности усиливалась экзарация и формировались ложбины ледникового выпахивания и размыва шириной 5–15 км. Подобные формы контролировали развитие лопастных и языковых комплексов рельефа поозерского ледника (рис. 18, 20).

На основе космогляциодинамических построений возможно установить взаимосвязи между структурой последнего ледникового покрова и проявлениями эндогенного и ротационного режимов земной коры в позднеплейстоценовое время. Например, кольцевые структурные формы, испытавшие положительные неотектонические движения, служили ледораздельными зонами различных рангов. Между дисненской и полоцкой ледниковыми лопастями располагается Ветринская структура с поперечником 25 км. Она сопряжена с локальным поднятием поверхности ложа плейстоценовых пород, кровли днепровской и сожской морен и выражена в современном рельефе как одноименное поднятие – угловой массив, сложенный напорными конечно-моренными образованиями. Сходные размеры и особенности геодинамического режима имеет кольцевая структура на стыке полоцкой и витебской лопастей. К ледоразделам ушачского, лепельского и селявского языковых комплексов приурочены изометричные объекты диаметром до 15 км.

Активные на неотектоническом этапе разрывные нарушения контролировали движение поозерского ледника в дистальном направлении. Под воздействием ледяных масс над ослабленными участками земной коры

происходила интенсивная экзарация. Зона Чашникского регионального разлома, отличающаяся повышенной трещиноватостью пород платформенного чехла, определяла магистральное направление полоцкой ледниковой лопасти. Развитие краевых комплексов в зоне максимального распространения поозерского ледника контролировалось тектонодинамическими процессами на участках новейшей активизации Ошмянского и Выжевско-Минского разломов, Борисовской кольцевой структуры (см. рис. 20).

Планетарные системы линейных дислокаций с азимутами $17-287^\circ$ определили развитие дисненской и полоцкой ледниковых лопастей. На динамику витебской лопасти оказали влияние линеаменты направлений $62-332^\circ$. С этими системами связаны направления главнейших ледниковых языков.

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПОИСКАХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Дистанционные методы перспективны при выявлении особенностей размещения полезных ископаемых. На основе комплексной интерпретации данных дешифрирования и материалов геолого-геофизических съемок могут быть установлены поисковые геологические критерии распределения залежей нефти, бурых углей, железных и полиметаллических руд, мергельно-меловых пород и других видов минерального сырья.

Нефть. Определенные успехи достигнуты в дистанционном прогнозировании и поисках залежей нефти. Это наглядно подтверждено на примере Припятского прогиба, расположенного в пределах запада Русской плиты. Здесь основной объем притоков нефти сконцентрирован в межсолевом и подсолевом карбонатном нефтеносных комплексах девонских отложений. К настоящему времени выявлено 62 промышленных месторождения нефти, большая часть из которых сосредоточена в Северо-Припятском регионе в четырех зонах нефтенакпления: Судовицко-Березинской, Оземлинско-Первомайской, Александровско-Дубровской, Речицко-Вишанской и Червонослободско-Малодушинской.

Анализ материалов дистанционного зондирования при нефтепоисковых работах в условиях Припятского прогиба позволяет уточнить положение неотектонически активных разломов разного ранга, выделить блоки подсолевых отложений и локальные структуры, различающиеся по амплитуде и направлению позднеолигоцен-антропогеновых движений, а также наметить зоны повышенной трещиноватости чехла, с которыми связано улучшение коллекторских свойств продуктивных горизонтов.

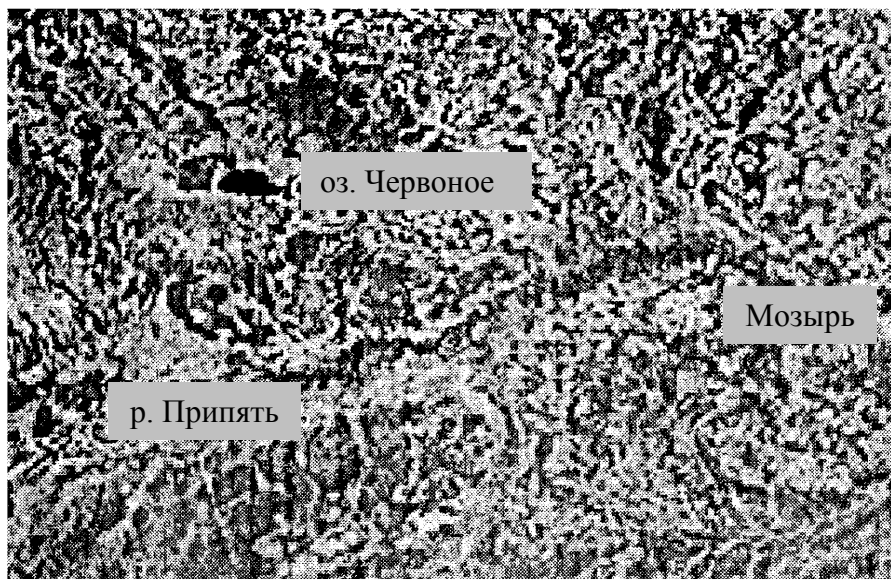
В. И. Гридиным, а позднее Н. А. Капельщиковым, А. В. Матвеевым и др., на основе аэрокосмогеологических построений выполнено неотектоническое районирование территории Припятского прогиба, установлены структурные формы, контролирующие залежи углеводородов. В отличие от традиционных геолого-геофизических материалов по данным интерпретации КС Северо- и Южно-Припятский суперрегиональные разломы фиксируются в виде зон линеаментов шириной в несколько километров. Обнаруживается закономерное распределение линеаментной сети в Припятском прогибе. Сопоставляемые с герцинскими разломами линеаменты в большинстве случаев имеют традиционное для прогиба субширотное (287°) и северо-западное (304°) направления. Другое устойчивое их

простирается – северо-восточное (34°), хотя количество таких линеаментов значительно меньше. Устанавливается ритмичность в распределении региональных линейных структур, подчеркиваемая делимостью земной коры с "шагом" 20–35 км для субширотных и северо-западных и 30–50 км для северо-восточных систем.

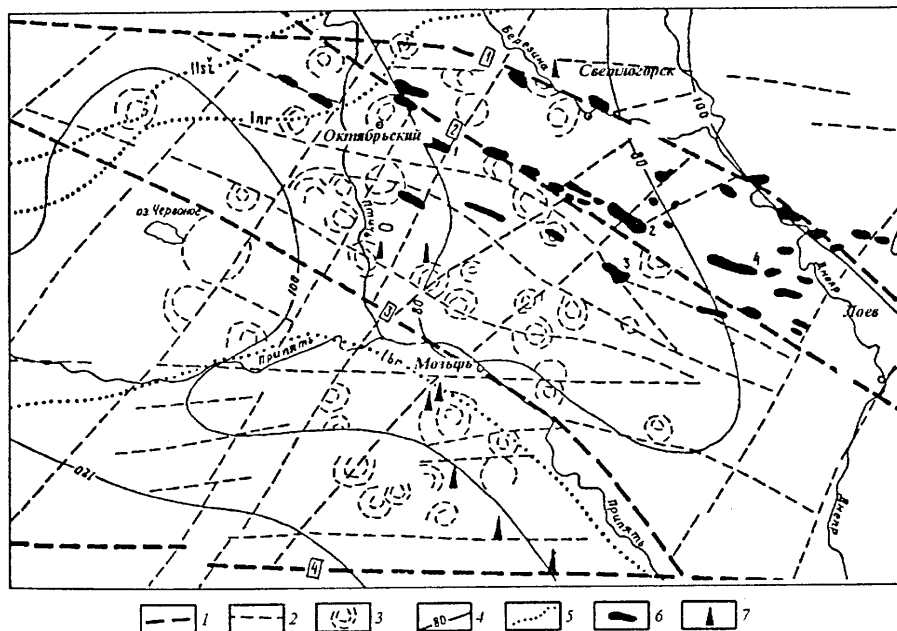
Линейные структуры расчленяют Припятский прогиб на крупные блоки, испытывающие дифференцированные позднеолигоцен-антропогеновые деформации суммарной амплитудой до 150–170 м. По мнению В. И. Гридина при эффективной мощности продуктивных горизонтов в первые десятки метров подобные движения могли оказать определенное влияние на переформирование залежей углеводородов. Л. Н. Розановым установлена ведущая роль новейшей разломной тектоники в формировании современного плана размещения месторождений нефти и газа. В связи с этим, выявленные по данным дешифрирования особенности неотектонической активности структурных форм чехла, следует учитывать при оценке нефтеносности Припятского прогиба.

Региональными аэрокосмогеологическими исследованиями установлена приуроченность известных месторождений нефти к умеренно активной неотектонической зоне, ограниченной Северо-Припятской и Гродненско-Мозырской субрегиональными линейными структурами (рис. 21). В тектоническом плане ей соответствует Речицко-Шатилковская и северная часть Червонослободско-Малодушинской ступени. Суммарные амплитуды позднеолигоцен-антропогеновых движений составляют на этой территории 60–90 м. Такой размах деформаций заметно ниже по сравнению с южной структурной зоной Припятского прогиба, где амплитуды подобных движений достигают 100–120 м и более.

По-видимому, умеренная активность неотектонических процессов способствует оптимальной раздробленности платформенного чехла и как следствие – концентрации нефти и газа при наличии изолирующих осадочных толщ. Интенсивные новейшие деформации нарушают герметичность чехла, что приводит к расформированию месторождений. Экспериментальными исследованиями путем высокоточного нивелирования на геодинамических полигонах Припятского прогиба установлено, что разломы, контролируемые залежи углеводородов, отличаются современной активностью. На земной поверхности в подобных зонах наблюдаются сосредоточенные в узкой полосе аномальные изменения градиентов вертикальных движений.



а



б

Рис. 21. Припятская нефтегазоносная область: а – фрагмент космического снимка; б – схема структурного дешифрирования и основных геологических элементов. 1 – суперрегиональные линеаменты (цифры в квадратах): 1 – Северо–Припятский, 2 – Ошмянско–Речицкий, 3 – Гродненско–Мозырский, 4 – Южно–Припятский); 2 – региональные и локальные линеаменты; 3 – кольцевые структуры, отражающие локальные поднятия чехла; 4 – изогипсы суммарных амплитуд неотектонических деформаций (в м); 5 – границы предельного распространения плейстоценовых ледников (Inr – наревского, Ibr – березинского, IIsz – сожского); 6 – месторождения нефти (1 – Вишанское, 2 – Осташковичское, 3 – Золотухинское, 4 – Речицкое); 7 – притоки нефти в единичных скважинах

В рассматриваемой неотектонической зоне структуры подсолевого и межсолевого карбонатных комплексов, с которыми связаны нефтяные месторождения, отражаются в виде локальных новейших структурных форм. Последние обнаруживаются на МДС фотоаномалиями, в современном рельефе которым в основном соответствуют положительные деформации геоморфологических уровней надпойменных террас Припяти, Днепра и Березины. На КС системой фотоаномалий, соответствующих Речицкой, Тишковской, Осташковичской, Сосновской, Давыдовской локальным структурам, подчеркивается Речицко-Вишанская зона поднятий. По результатам дешифрирования выявляются также ранее неизвестные системы продольных неотектонических аномалий, интерпретируемые как возможные зоны нефтенакпления.

При аэрокосмогеологических построениях в связи с поисками нефтяных залежей помимо новейшего эндогенного режима следует учитывать особенности проявлений гляцигенных процессов. По данным А. А. Трофимука, В. И. Астахова и других исследователей региональные оледенения и связанные с ними зоны гидратообразования существенно воздействовали на ход процессов миграции и аккумуляции углеводородов. Ледниковые нагрузки приводили к отжатию флюидов из глинистых и других пород и перемещению пластовых вод, нефти и газов в проницаемых толщах в направлении движения ледников. На территории Припятского прогиба такие явления возможно оказали заметное влияние на формирование известных нефтяных залежей по периферии наревского, березинского и сожского ледниковых покровов.

В Центральноевропейском нефтегазоносном бассейне большинство выявленных к настоящему времени крупнейших месторождений нефти (в области Северного моря – Статфьорд, Брент, Найниан и др.) расположены в пределах осевой зоны валообразного гляциоизостатического поднятия, существовавшего 18–12,5 тыс. лет назад. Менее крупные залежи нефти концентрируются в подобных зонах вдоль рек Нейсе, Одра и Варта, а также в Люблинско-Львовской области. Приуроченность нефтяных залежей к периферии плейстоценовых оледенений и осевым зонам валообразных поднятий свидетельствует о перспективной нефтегазоносности этих территорий.

Детальными аэрокосмогеологическими исследованиями выявляются зоны трещиноватости, которые контролируют распределение продуктивных отложений подсолевых и межсолевых комплексов с повышенными коллекторскими свойствами. Установлена определенная зависимость между такими локальными структурными осложнениями чехла и

новейшими тектоно-геодинамическими процессами. Более высокие коллекторские свойства отложений терригенного подсолевого комплекса отмечены в основном в сводовых частях поднятий, а подсолевого карбонатного и межсолевого – в зонах разломов, отличающихся заметной активизацией в позднеолигоцен-антропогенное время. Участки возможного развития коллекторов, связанные с трещиноватостью пород, в определенной степени находят свое отражение в новейшем структурном плане и тем самым проявляются в особенностях ландшафта земной поверхности и на МДС.

Бурый уголь. Практическое значение имеют дистанционные методы при прогнозе залежей бурого угля. Подобный анализ выполнен по МДС на территории юго-запада Беларуси, охватывающей в тектоническом отношении западную часть Припятского прогиба, Полесскую седловину и юго-восток Подляско-Брестской впадины. Буроугольные формации (мощность 1–80 м) данного региона датируются верхним олигоценом, средним миоценом и приурочены к депрессионным зонам палеозойских, среднеюрских и неогеновых отложений. Образование таких зон связано с активизацией локальных структурных форм чехла, проявлениями соляного тектогенеза и карстовыми процессами, обусловившими характер предугленосной поверхности.

Характер новейшего структурного плана региона оказывал заметное влияние на условия образования и сохранения залежей бурого угля, а также на отражение в ландшафте этих особенностей. Поэтому структурное дешифрирование МДС перспективно для выяснения закономерностей формирования буроугольных формаций.

Региональными аэрокосмогеологическими исследованиями установлены новейшие тектонические структуры, представляющие интерес для целенаправленного поиска угольных залежей. На западном склоне Полесской седловины оконтуривается узел Балтийско-Украинского суперрегионального линеамента субмеридианального простирания с Березовской кольцевой структурой высокого порядка. В рельефе кровли донеогеновой поверхности этой территории соответствуют замкнутые понижения с амплитудами 20 м и более, связанные с развитием карстовых воронок, а также фрагмент древней долины сходной амплитуды. Рассматриваемый структурный узел приурочен к площади распространения верхнеолигоцен-миоценовых отложений, где в местах сочленения линеаментов отмечаются углепроявления.

В зоне широтного Припятского суперрегионального линеамента системы эшелонированных локальных разрывных нарушений контролируют

Житковичскую, Бриневскую и Погост-Хвоенскую угольные залежи, в пределах которых расположены Пасековская и другие мелкие кольцевые структуры. В узле пересечения Припятского разлома с Луинецкой кольцевой структурой среднего диаметра по данным бурения установлена серия изометричных в плане понижений донеогенового рельефа с амплитудой 20–40 м. В рассматриваемой зоне неотектонические движения носили малоамплитудный положительный характер, что привело к отложению маломощных осадков верхнего олигоцена и миоцена с редкими углепроявлениями.

В связи с прогнозом угленосности поисковое значение приобретает зона, контролируемая Свислочно-Паричским и Старобинским региональными разломами, фиксируемыми на КС, в гравиметрических полях и приуроченная к системе известных локальных тектонических нарушений. С разломами согласуется распределение погребенных речных долин и древнего карста. Широкое развитие здесь локальных кольцевых структур, по-видимому, связано с активизацией пликативных дислокаций платформенного чехла. На востоке исследуемой территории в пределах распространения фаменской соленосной толщи устанавливается довольно четкая связь углепроявлений с присклоновыми частями поднятий по кровле соленосных отложений.

Региональный анализ особенностей новейшей тектоники на основе космической информации и геолого-геофизических материалов позволили наметить в юго-западной части Беларуси перспективные площади на выявление бурогоугольных залежей, в пределах которых могут быть проведены детальные исследования с использованием АФС и морфометрических построений.

В качестве примера рассмотрим район Погост-Хвоенской угольной залежи (рис. 22). В пределах выделенной здесь по АФС кольцевой структуры обращает на себя внимание секущий по своду структуры локальный разлом, слабо проявившийся в чехле, но оказавший заметное влияние на образование и сохранение бурогоугольной залежи. Скважинами на своде и крыльях этой структуры вскрыта деформированная поверхность неоген-палеогеновых отложений, отражающаяся в ландшафте. По-видимому, на новейшем этапе развития рассматриваемый участок испытывал дифференцированные трансформации. Причем, в конце палеогенового – начале неогенового периодов данная структура находилась под влиянием отрицательных движений, о чем свидетельствует бурогоугольная залежь, образовавшаяся в ее периферийной части.

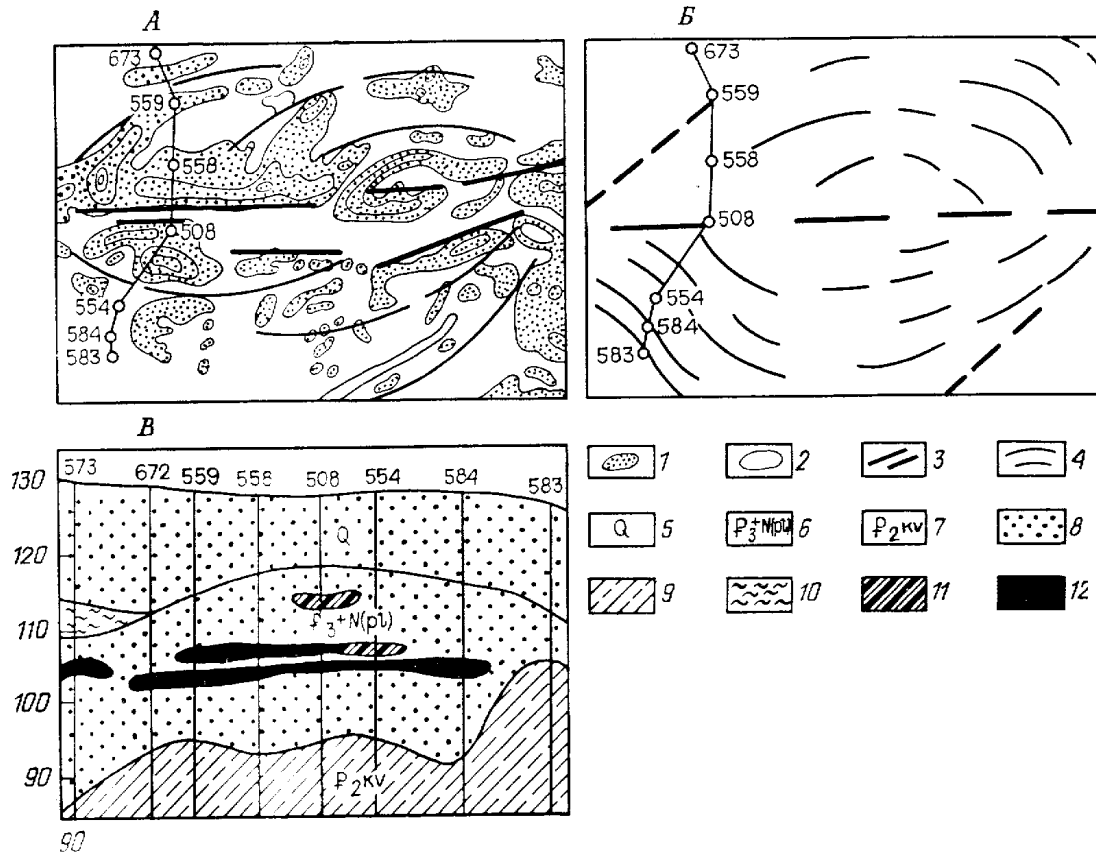


Рис. 22. Припятский прогиб. Отражение Пасековской кольцевой структуры в районе Погост-Хвоенской угольной залежи на карте остаточного рельефа (А), схеме дешифрирования аэрофотоснимков (Б) и геологическом профиле (В): 1 – остаточный рельеф; 2 – западины; структурные линии, отображающие деформации: 3 – дизъюнктивные; 4 – пликативные отложения; 5 – четвертичные; 6 – олигоцен–миоценовые; 7 – среднепалеогеновые; 8 – пески; 9 – алевриты; 10 – глина; 11 – углистость; 12 – бурый уголь

Металлические полезные ископаемые. Структурные построения на основе геолого-геофизической интерпретации аэрокосмических данных эффективны при прогнозировании железных и полиметаллических рудопроявлений в кристаллическом фундаменте. Поисковое значение в пределах Белорусской антеклизы представляет центральный фрагмент зоны сочленения Белорусско-Прибалтийского чарнокит-гранулитового пояса с Центрально-Белорусским протопрогибом и примыкающая к нему Околовская протогеосинклиналь. Здесь выявлены Новоселковское месторождение и ряд рудопроявлений ильменит-магнетитовых руд, Околовское месторождение и Рубежевическое проявление железистых кварцитов, ряд колчеданных проявлений и многочисленные геохимические аномалии. Несмотря на повсеместное перекрытие фундамента осадоч-

ными породами от верхнепротерозойского до четвертичного возраста мощностью 120–650 м, его структурные формы проявляются в геодинамических особенностях современного рельефа и на МДС.

На основе дистанционного изучения новейшей тектоники и особенностей локализации рудных проявлений в кристаллическом фундаменте Белорусской антеклизы сделан вывод об унаследованном развитии древних рудоконтролирующих структур. Конформность структурных планов наиболее отчетливо обнаруживается в наиболее приподнятой сводовой части антеклизы, где фундамент во многих местах залегает непосредственно под четвертичным покровом.

Унаследованный характер развития структур фундамента отмечается и в других областях древнематерикового оледенения, в частности, в Карело-Кольском регионе. Здесь выделенные на КС новейшие структурные формы в главнейших чертах повторяют размещение архейских и протерозойских структур фундамента, а также девонских рифтогенных образований с месторождениями железа, флогопита и апатит-нефелиновых руд.

В пределах Белорусской антеклизы, фиксируемые на КС суперрегиональные линейные структуры, ограничивают крупные блоки кристаллического фундамента. Структурообразующее значение имеет Балтийско-Украинский суперлинеамент. Его фрагмент вдоль линии Ивацевичи – Кореличи – Вилейка – Постава, разделяет Центрально-Белорусский протопрогиб и Белорусско-Прибалтийский чарнокит-гранулитовый пояс.

Балтийско-Украинский и Брестско-Велижский суперрегиональные линеаменты контролируют положение Околовской грабен-синклинали, прослеживаемой с юго-запада на северо-восток на расстояние порядка 100 км. Это наиболее продуктивная на магнетитовые и колчеданные руды структура Белорусской антеклизы. С ней связаны Околовское месторождение железистых кварцитов, Рудмянское, Деревнянское, Униховское, Мирское, Рубежовичское, Столбцовское, Раевщинское и Пуховщинское рудопроявления железа, меди, никеля, цинка, свинца и других цветных и редких металлов.

Отмечается связь рудопроявлений прежде всего с региональными линейными структурами, имеющими азимуты простираний 34° и 45° . К разломам с подобным направлением приурочены практически все известные проявления руд в пределах Околовской грабен-синклинали. При этом наибольшей перспективностью отличаются участки пересечения северо-восточных линейных структур с Налибокской линеаментной зоной, трассирующейся вдоль линии Столбцы – Ивье по азимуту 315° . Эта зона шириной около 14 км объединяет Налибокский, Неманский и Са-

вонский региональные разломы, установленные по комплексу аэрокосмических и геолого-геофизических материалов.

По данным бурения в пределах рассматриваемых дизъюнктивов наряду с брекчированием, расланцеванием и милонитизацией наблюдается интенсивная порфиробластическая калишпатизация и карбонатизация пород. Важным фактом является обнаружение здесь магнетитовых сульфидных и редкометалльных проявлений. К последним можно отнести Рудьянское в Столбцовском районе Минской области перспективное на магнетитовые руды. Рудопроявление расположено в одноименной структурно-формационной зоне и приурочено к участку пересечения Неманского разлома с северо-восточным дизъюнктивом.

Тектоническая активность линейных структур в пределах Рудьянского рудоуправления подчеркивается наложенными гидротермально-метасоматическими процессами, проявившимися здесь в широком развитии скарнирования вмещающих толщ. Пройденными в пределах рудопроявления скважинами встречены окисленные железные руды в верхней части фундамента и тела колчеданных, сульфидных и магнетитовых руд. При изучении керна установлены проявления мышьяка, благородных металлов, никеля, кобальта, меди и свинца.

К региональному разлому северо-восточного направления (азимут 34 и 45°) приурочено Околовское месторождение железистых кварцитов (Столбцовский район Минской области). Структура месторождения представляет собой синклиналь и проявляется в новейшем структурном плане в виде зоны эшелонированных линеаментов шириной до 1,5–2 км, трассирующей на северо-восток на расстояние порядка 10 км. В магнитном поле эта зона выражена серией локальных положительных аномалий такой же ориентировки. Отмечается сопряженность зоны линеаментов с положительной аномалией гравитационного поля.

Ведущее направление рудоконтролирующих структур в пределах Кореличского блока – субмеридиональное. Одноименная группа железорудных проявлений локализуется на участках пересечений разломов, ориентированных по азимуту 17° с линейными структурами, имеющими простирание 270 и 287°. Известное Новоселковское месторождение ильменит-магнетитовых руд приурочено к системе дизъюнктивов 17 и 270°.

К поисковым критериям железных и полиметаллических рудопроявлений в кристаллическом фундаменте относятся кольцевые структуры магматогенной природы. Дешифрируемые на территории исследований подобные объекты имеют диаметр порядка 6–13 км и контролируют плановое расположение интрузивных образований, залегающих на неко-

торой глубине от поверхности фундамента. Кольцевые структуры сходного генезиса (Мирская, Боровиковская и т. п.) тяготеют к области распространения амфиболитов гуменовщинской толщи, где широко развиты интрузии гранитов, плагиогранитов жуховичского комплекса. В пределах развития плагиогнейсов яченской толщи интрузивные породы встречаются реже и изометричные объекты представлены здесь единично. Магматогенные кольцевые структуры контролируют положение ряда точек минерализации колчеданных формаций и, в частности, Мирского рудопроявления (Кореличский район Гродненской области).

Мел и мергель. Дистанционными исследованиями устанавливаются геологические критерии размещения мергельно-меловых залежей. В Беларуси последние приурочены к местам неглубокого залегания коренных верхнемеловых отложений, а также связаны с вторичными выходами мергельно-меловых пород в виде отторженцев (гляциодислокаций) среди антропогенных образований.

Залежи первого типа известны в юго-восточной части Оршанской впадины (месторождение цементного сырья «Коммунарское»), где мергельно-меловые породы перекрыты песчано-глинистыми отложениями палеоген-неогенового и четвертичного возраста мощностью от 2,5 до 25 м. Здесь широко развиты карстовые формы современного рельефа диаметром 10–50 м и глубиной до 3,5 м.

На основе дешифрирования АФС масштаба 1:10 000 и данных бурения выявлена связь между карстом земной поверхности и погребенными карстовыми формами. Последние необходимо учитывать при подсчете запасов полезного ископаемого и оценке горнотехнических условий его добычи.

Фиксируемые на МДС скопления западин тяготеет к площадям неглубокого залегания карстующихся толщ. Причем, глубина карстовых форм в приповерхностном слое мергельно-меловых пород обычно не превышает нескольких метров и в целом соответствует глубине механических воронок в современном рельефе. Количество воронок на единицу площади можно использовать в качестве показателя глубины залегания поверхности карстующихся пород: глубина меньше там, где плотность западин увеличена. Наиболее отчетливо эта закономерность проявляется на участках со значительным расчленением поверхности мергельно-меловых отложений.

Другие поисковые критерии мергельно-меловых залежей для площадей, подвергшихся значительному гляцигенному воздействию. По данным Э. А. Левкова такие месторождения в западной и центральной частях Беларуси имеют длину до 1–3,5 км, ширину от нескольких десятков

до 200–400 м и мощность до 40–60 м. Вскрышные породы представляют собой разнообразные антропогенные или находящиеся во вторичном залегании палеоген-неогеновые отложения мощностью от первых дециметров до 15–25 м.

Для обнаружения подобных мергельно-меловых залежей следует учитывать особенности локализации гляциодислокаций на участках положительных структурных форм фундамента и чехла, в приразломных зонах. Среди гляцигенных геодинамических признаков можно выделить фрагменты ледниковых ложбин, скибовые формы и отторженцы, достаточно отчетливо проявляющиеся в рельефе и на АФС. Ведущее поисковое значение имеют складчато-чешуйчатые дислокации с крупными запасами мергельно-меловых пород. Подобные залежи выявлены у Волковыска, Порозово, Мира, Березы и в других местах Республики Беларусь.

Другие полезные ископаемые. Аэрокосмическими исследованиями устанавливаются в современном рельефе Припятского прогиба проявления структурных форм девонских соленосных формаций, к которым приурочены залежи каменных и калийных солей. В пределах Старобинского месторождения калийных солей И. А. Тяшкевичем на основе дешифрирования МДС (радиолокационных, многозональных) выявлены неотектонические блоки, разрывные и складчатые дислокации верхней толщи чехла, сопоставляемые со структурными формами верхнефаменских соленосных отложений. В данном случае поисковый интерес представляют новейшие структуры, обнаруживающие связь с синклиналиями и мульдами, интенсивно развивавшимися одновременно с накоплением калийных солей.

Перспективными в отношении поисков подземных минеральных вод являются участки значительной трещиноватости кристаллического фундамента Белорусской антеклизы, дешифрируемые в виде фотоаномалий эшелонированных систем линеаментов. Признаками артезианских пресных вод нередко служат погребенные ложбины ледникового выпахивания и, входящие в их состав, замкнутые переуглубления. Водоносные горизонты здесь обычно перекрыты и подстилаются водоупорными моренными пластами. Ледниковые ложбины, заполненные разновозрастными четвертичными отложениями, имеют поисковое значение при прогнозе песков, песчано-гравийного материала, глин и иного строительного сырья.

Таким образом, комплексный анализ аэрокосмических и геолого-геофизических данных позволяет выявить новые геологические критерии размещения залежей нефти, бурых углей, железных и полиметаллических руд, мергельно-меловых пород и других полезных ископаемых.

6. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ

В последние годы отмечается все возрастающее воздействие техногенеза на геологическую среду. Существенные изменения верхней части литосферы вызваны интенсивной разработкой полезных ископаемых шахтным (калийные соли, каменный уголь и др.) и карьерным (минеральные стройматериалы, карбонатное сырье и др.) способами, добычей нефти и газа, эксплуатацией подземных вод, проведением широкомасштабной мелиорации земель, сооружением водохранилищ и иной инженерно-хозяйственной деятельностью. В пределах таких территорий создавалась напряженная ситуация, а в некоторых – экологически кризисная.

Для оценки эколого-геологической обстановки, в первую очередь в районах с высокой техногенной нагрузкой, широко применяются методы дистанционного зондирования. Они позволяют получить объективную информацию о состоянии и ходе развития геологической среды. По МДС устанавливаются просадки земной поверхности над шахтными выработками, изменения геосистем в районах добычи полезных ископаемых карьерным способом, экзогенные процессы в зонах водохранилищ и в районах мелиорации земель, а также другие проявления техногенеза, протекающие в ряде случаев с большой скоростью. Составленные по аэрокосмическим данным эколого-геологические карты являются необходимым картографическим обеспечением в решении проблем геоэкологии и рационального природопользования.

Дистанционные эколого-геологические исследования обеспечиваются информативным комплектом МДС. КС регионального уровня генерализации позволяют изучать крупные тектонические структуры с ярко выраженной современной геодинамикой и наложенной хозяйственной деятельностью. Космическая информация пригодна в основном для целей обзорного и мелкомасштабного картографирования. При создании эколого-геологических карт среднего масштаба используются КС и высотные АФС локального уровня оптической генерализации, обеспечивающие построение моделей отдельных элементов структурных форм с проявлениями техногенной экзодинамики, а также зон экологических катастроф на значительных площадях. Детальные АФС способствуют проведению крупномасштабного картографирования отдельных районов с развитием активных экзогенных процессов, в том числе вызванных интенсивной хозяйственной деятельностью, участков городских агломераций, экологически опасных очагов, зон катастроф и крупных аварий.

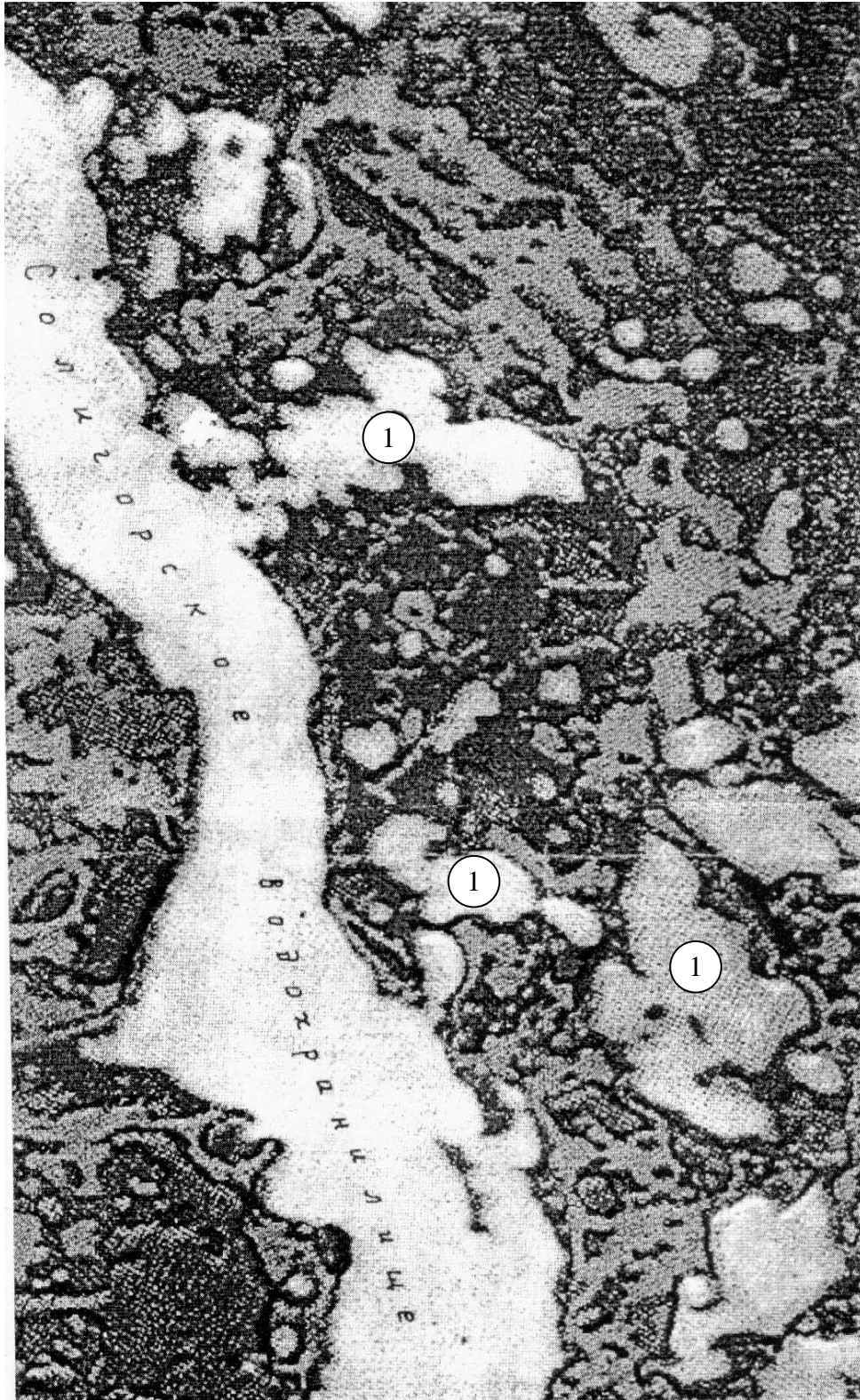


Рис. 23. Заболачивание геосистем (1) над шахтными выработками в зоне подтопления Солигорского водохранилища. Фрагмент цветокодированного космического снимка

Главный методический принцип дистанционных эколого-геологических исследований состоит в пространственно-временном подходе к дешифрированию техногенных трансформаций геологической среды на основе всестороннего использования разновременной и многоуровневой аэрокосмической информации. Такой подход предполагает: 1) анализ МДС, полученный при аэрофотосъемке и космическом фотографировании в различных спектральных диапазонах; 2) исследование разновременных, особенно разносезонных снимков одного года съемки; 3) изучение разногодичных изображений с интервалом 5–7 лет, выполненных для одного сезона при одинаковых технических параметрах. По данным дешифрирования составляются карты современного состояния геологической среды, динамики техногенных процессов, служащие базой для создания геоэкологических моделей, комплексных схем рекомендуемых мероприятий по охране и рациональному использованию природной среды.

Дешифрируемые техногенные процессы разделяются по характеру участия в них человека, ареалу распространения, степени воздействия на геологическую среду и особенностям отражения на МДС. И. В. Кузьминой выделены две группы процессов, вызванные хозяйственной деятельностью: эуантропогенные и семиантропогенные. Явления первой группы от начала и до конца управляются и направляются человеком (сооружение шахт, дамб, выемка грунта и т. п.). В группе семиантропогенных процессов техногенные элементы создают лишь исходную ситуацию, а дальнейшее их развитие протекает под влиянием естественных факторов (например, процессы заболачивания в зоне водохранилища). Наиболее информативны методы дистанционной индикации при изучении семиантропогенных процессов, развивающихся по подобию природных явлений.

В зависимости от пространственного соотношения очага нарушений с геологической средой определены сферы непосредственного и опосредованного влияния техногенных процессов. Непосредственное воздействие наблюдается в том случае, если экологический фон не имеет каких-либо искусственных границ (сооружений) между собой и источником процесса. При опосредованном влиянии такие рубежи существуют.

Воздействие техногенеза на геологическую среду проявляется неодинаково. Слабое влияние ограничивается трансформацией почвенно-растительного покрова. В этом случае внутриландшафтные взаимосвязи существенно не нарушаются. Активная хозяйственная деятельность связана со значительными изменениями геолого-геоморфологической осно-

вы природного комплекса, приводящими к перестройке всей его структуры. Разная степень генерализации аэрокосмических фотоизображений обеспечивает плавность перехода от изучения техногенных трансформаций в отдельных очагах до картографирования подобных нарушений в пределах целых регионов.

Б. В. Виноградовым установлены три категории техногенных воздействий, различающихся по особенностям отражения на МДС. Первая включает процессы синхронные со съемкой: подтопление территории вблизи дамб и т. п. Техногенные формы, образовавшиеся в течение предшествующих съемке сроков – карьеры, водохранилища и другие, отнесены ко второй категории. Для третьей типичны древние антропогенные ландшафты, сформировавшиеся за длительный период времени, например, массивы оврагов в пределах Новогрудской возвышенности, появившиеся в результате нерационального землепользования на протяжении последних столетий.

С. А. Сладкопечев, оценивая дистанционные методы эколого-геологических исследований, подчеркивает, что информация о техногенном загрязнении и нарушении глубоко залегающих горных пород и подземных вод на МДС практически отсутствует. Весьма эффективны результаты дешифрирования только почв и особенности рельефа. Аэрокосмические снимки дают ценные сведения главным образом о нарушении таких компонентов геологической среды, как рельеф, покровные отложения, грунтовые воды и почвы; гораздо менее информативны в отношении техногенного загрязнения поверхности литосферы.

В качестве примера эколого-геологического дешифрирования МДС рассмотрим оценку экодинамики геосистем прибрежной зоны Солигорского водохранилища, расположенного на юге Минской области. Техногенные процессы вблизи этого искусственного водоема изучались по материалам разновременных аэро- и космических снимков, полученных в видимом, инфракрасном и радиоволновом спектральных диапазонах в период с 1969 по 2002 г. Подобный подход позволил выявить пространственно-временные закономерности эволюции геосистем под влиянием водоема.

Солигорское водохранилище создано в 1967 г. и является источником производственного водоснабжения РУП "Беларуськалий". Искусственный водоем имеет длину 24 км, ширину около 1,5 км и при нормальном подпорном уровне площадь водного зеркала составляет около 23,1 км². Следует отметить, что ведение горных работ под самим водохранилищем и прилегающей к нему территории привело к активизации

экзогенных процессов в геосистемах. Среди широкой группы экзодинамических явлений высокой мобильностью отличаются процессы антропогенного (вторичного) заболачивания над шахтными выработками (рис. 23). В данном случае естественное подтопление прибрежных геосистем усиливается оседанием земной поверхности в пределах мульды сдвижения горных пород.

В области непосредственного влияния Солигорского водохранилища на прибрежные геосистемы отчетливо выделяется площадь водоема, дешифрирующаяся по темно-серому, почти черному тону аэрокосмоизображения. В прибрежной полосе отмечаются луговозлаковые сообщества: частуха подорожниковая (*Alisma plantago-aquatica* L.), манник водный (*Glyceria aquatica* L.) и др., произрастающие на тонко- и мелкозернистых частично наносных песках. Уровень грунтовых вод залегает здесь на глубине около 0,2–0,3 м. Подобные геосистемы различаются на фотоснимках в виде узких светлых полос однородного рисунка аэрокосмоизображения.

Процессы антропогенного заболачивания наиболее отчетливо обнаруживаются по комплексу ландшафтных индикаторов на участках проявления мульды сдвижения горных пород. В этом случае в днищах понижений, образовавшихся над отработанным геологическим пространством, наблюдается усиление процесса болотообразования. В геосистемах формируются осоково-пушицевые и крупноосоковые сообщества, дешифрирующиеся по однородному рисунку и светло-серому тону аэрокосмоизображения.

По данным дистанционного зондирования отчетливо выделяются геосистемы в пределах подтопленной поймы р. Случь. Процессы подтопления и заболачивания обнаруживаются на снимках по различному фототону, который изменяется от темно-серого, почти черного до серого. На участке поймы, залитой водой (глубина 0,5–1,5 м), формируются растения с плавающими на поверхности листьями: кувшинка белая (*Nymphaea alba* L.), кубышка желтая (*Nuphar luteum* L.), горец земноводный (*Polygonum amphibium* L.) и др.

В условиях низкой поймы, не залитой водой, развиваются разнотравно-осоковые сообщества: осока острая, дернистая, пузырчатая (*Carex acuta* L., *C. caespitosa* L., *C. vesicaria* L.), хвощ топяной (*Equisetum palustre* L.) и др. Мощность торфа здесь 0,3–1,0 м, уровень грунтовых вод залегает на глубине 0,2–0,5 м. На снимках геосистемы низкой поймы различаются по однородному, иногда с мелким крапом (за счет кочкарникового нанорельефа) рисунку и темно-серому фототону.

Преобразование геологической среды, вызванное техногенезом, требует внедрения систематических последовательных наблюдений за ее состоянием. Важнейшим направлением в этой системе является *аэрокосмический мониторинг*, предусматривающий регламентированные периодические дистанционные исследования пространственно-временных изменений геологической среды под воздействием природных и техногенных факторов. Современный этап развития дистанционных эколого-геологических исследований характеризуется внедрением автоматизированных методов дешифрирования аэро- и космических снимков. Для количественной оценки состояния природной среды предпочтение отдается обработке исходной цифровой дистанционной информации.

Эколого-геологическое картографирование. Развитие дистанционных методов в экогеологии тесно связано с разработкой на основе аэрокосмической информации картографических моделей состояния геологической среды в условиях техногенеза. *Эколого-геологическое картографирование* – процесс создания карт (моделей) экологического содержания по данным дистанционного зондирования, геолого-съёмочным материалам и другим источникам экогеоинформации (графическим, цифровым, текстовым), характеризующим состояние и тенденции изменения верхней части литосферы. В данном случае достигается возможность получения наглядных высокоинформативных документов, отражающих эколого-геологическую обстановку, и служащих основой для прогноза техногенных процессов, разработки рекомендаций и мероприятий по их предупреждению, ослаблению и ликвидации нежелательных инженерно-геологических и экологических явлений и их последствий.

Применительно к области древнематерикового оледенения методические приемы эколого-геологического картографирования будут различными для следующих регионов: 1) с мощной (50–250 м и более) четвертичной толщей; 2) с маломощной (до 50 м) четвертичной толщей, залегающей на дочетвертичных осадочных породах; 3) с маломощной (до 50 м) четвертичной толщей, залегающей на протерозой-архейских породах кристаллического фундамента.

Назначение и содержание эколого-геологических карт определяются прежде всего масштабом картографирования и объектом экологического анализа. Составление таких карт осуществляется на трех масштабных уровнях: 1) региональном (мелкомасштабном); 2) локальном (среднемасштабном); 3) детальном (крупномасштабном). Первый уровень предполагает создание карт геоэкологического содержания масштаба 1:1 000 000–1:500 000 в пределах крупных регионов на основе мелко-

масштабной тематической геоинформации ранее проведенных работ с использованием дистанционных методов исследований. Подобные карты могут быть полезными для выработки стратегии природопользования в регионах. Эколого-геологические карты масштаба 1:200 000–1:100 000 составляют второй уровень. Они создаются на основе средне-масштабных эколого-съёмочных работ и другой информации. Эти модели служат для выявления проблемных ареалов, где целесообразно проводить более детальные исследования.

Третий уровень объединяет крупномасштабные (1:50 000–1:25 000 и крупнее) карты геоэкологического содержания, которые составляются как во время крупномасштабных специализированных эколого-съёмочных работ, так и на основе материала ранее проведенных исследований. На базе таких карт могут быть выделены экологически опасные очаги или конфликтные участки, требующие более углубленного изучения. Детальные карты составляются для горнорудных и промышленных районов, крупных инженерных сооружений (АЭС, химзаводы и т. п.) при различных экологических ситуациях.

Особую роль играют дистанционные методы при среднемасштабном эколого-геологическом картографировании отдельных территорий, испытывающих заметную техногенную нагрузку на геологическую среду. Итоговой моделью подобных построений является *эколого-геологическая карта* масштаба 1:200 000, основу которой представляет районирование территории по ее экологическим параметрам с учетом природных и техногенных трансформаций геологической среды. Такая карта является синтетической, обобщающей многочисленные характеристики геологической среды и техногенного воздействия.

Сведения эколого-геологического содержания могут быть получены путем анализа предварительно составленных вспомогательных картографических моделей: 1) геодинамической схемы новейшего этапа; 2) ландшафтно-геоморфологических комплексов; 3) проявлений экзогенных геологических процессов; 4) защищенности подземных вод; 5) объектов техногенного воздействия и изменений различных компонентов природной среды (атмосферного воздуха, почв, пород зоны аэрации, поверхностных и подземных вод и др.). При этом создание эколого-геологической карты заключается не в механическом суммировании отдельных геопараметров, а в системном анализе разнородной информации о пространственно-временных закономерностях развития геологической среды.

Основное содержание эколого-геологической карты масштаба 1:200 000 и легенды к ней в общем виде сводится к картографическому

отображению природных и техногенных факторов динамики геологической среды, показу районов (областей) с различной экологической обстановкой, а также охраняемых природных территорий и объектов. Легенда к карте строится в виде матрицы.

Эколого-геологическая карта отражает четыре блока экогеоинформации: 1) ведущие факторы динамики геологической среды; 2) состояние геологической среды по природным факторам; 3) состояние геологической среды по техногенным факторам; 4) охраняемые природные территории и объекты. Главную смысловую нагрузку на карте определяют три степени состояния геологической среды: 1) благоприятное; 2) умеренно благоприятное; 3) неблагоприятное.

Основным объектом среднemasштабного картографирования является геозкологический район, объединяющий территории с ландшафтами одного вида, одинаковым характером мезоформ рельефа, определенными типами почвогрунтов и растительными группировками на уровне групп ассоциаций, а также с однообразным экологическим состоянием геологической среды. В свою очередь, районы объединяются в геозкологическую область, которая представляет собой территорию с общими ландшафтными особенностями (ландшафты одного рода, однообразные по генезису и времени образования) и одинаковой экологической обстановкой, сформировавшейся в результате однотипного техногенного воздействия. В завершенном виде эколого-геологическая карта отражает ведущие природные факторы динамики геологической среды, характер ее экологического состояния как по природным показателям, так и по интенсивности проявления техногенеза.

7. ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ

Изучение закономерностей строения литосферы Земли тесно связано с отдельными проблемами геологии других планет. Познание небесных тел с помощью космической техники способствует формированию новых представлений в геологической истории нашей планеты. С началом космической эры к планетам Солнечной системы устремлялись автоматические межпланетные станции, а на Луне были проложены первые геологические маршруты. Во второй половине XX в. возникло новое направление в геологической науке – космическая планетология.

Методы дистанционного зондирования позволили выяснить особенности строения отдельных планет Солнечной системы. Накоплен значительный объем космической информации о Луне, Марсе, Венере, Меркурии, Юпитере и его спутниках. Сравнительный анализ этих данных с геологией нашей планеты способствует изучению процессов формирования первичной коры Земли, ее состава, образования океанов, возникновения линеаментных зон, рифтов, очагов проявления вулканизма и сейсмичности. Сравнительно-планетологический метод позволяет также выявить новые закономерности в размещении месторождений полезных ископаемых.

Луна. Совершившие посадку на лунную поверхность советские АМС «Луна-16, -20, -24» отобрали колонки лунного грунта и доставили его на Землю. Самоходные лаборатории «Луноход-1 и -2», оборудованные приборами для анализа горных пород, передали с помощью аппаратуры ценную информацию о составе грунта и других особенностях Луны.

Побывали на лунной поверхности экипажи американских космических кораблей «Аполлон-11, -12, -14, -15, -16 и -17». Первыми на Луне были астронавты Нил Армстронг и Эдвин Олдрин. Они и Майкл Коллинз составили экипаж космического корабля «Аполлон-11», прилунившегося 20 июля 1969 г. у западной окраины Моря Спокойствия. Астронавты собрали около 25 кг образцов горных пород и установили на поверхности Луны аппаратуру, среди которых был сейсмограф.

На основе геологических данных, полученных с самоходных лабораторий серии «Луноход» и космических кораблей «Аполлон», выявлен генезис горных пород на поверхности Луны. Сделан вывод, что они имеют магматическое происхождение и очень древний возраст образования – от 4,6 до 3,16 млрд лет. Представления о внутреннем строении Луны базируются на материалах сейсмического зондирования. До глубины порядка 30 км развиты анортозиты, далее расположена мантия, представленная лунным базальтом, переходящим в нижней мантии к дуниту.

Ядро Луны имеет радиус 1400 км и состоит из основных пород при большом участии оливина и пироксена.

На фотографиях Луны отображаются крупнейшие формы ее поверхности. Большую часть лунного рельефа занимают возвышенные пространства – материковые области. Они соответствуют первичной анортозитовой коре, возраст которой определен в 4,6–4,0 млрд лет. В пределах материков выделяют горы – Апеннины, Карпаты и др. Обширные прогибы, или «морские» бассейны (Море Дождей, Море Спокойствия и др.) являются более поздними образованиями. Они заполнены застывшей базальтовой лавой в период от 3,9 до 3,16 млрд лет назад. По отношению ко всей лунной поверхности материковые области занимают 83,1 % ее площади, «моря» – 16,9 %. Максимальная амплитуда высот на Луне 11 км, а по регионам колебания превышений рельефа в пределах 4–6 км.

Характерной формой рельефа лунной поверхности являются метеоритные кратеры. Их размеры составляют от десятков и даже первых сотен километров в поперечнике до малых долей миллиметра. Ярким примером морфологии крупных метеоритных образований служит кратер Коперник. На фотографиях, выполненных с автоматических станций, видно широкое дно кратера с центральной горкой, обрамленное крупными склонами с оползневыми террасами. Диаметр кратера составляет 93 км, максимальная высота стенок над днищем 3,8 км. Возраст метеоритного кратера Коперник и образующих его кольцевых гор оценивается в 0,8–1,0 млрд лет. На Земле же подобная форма рельефа при современном темпе денудации была бы полностью уничтожена процессами разрушения и сноса за несколько миллионов лет.

Космическая съемка Луны подтвердила наличие на ее поверхности извилистых русел, напоминающих земные временные реки аридных областей. Природа сухих русел на Луне пока не разгадана. При сейсмическом изучении лунных недр установлено, что они чрезвычайно сухи и свободной воды не содержат.

Марс. В результате геологических исследований Марса космическими станциями серии «Маринер», «Марс», «Викинг», «Фобос» и «Марс–Глобал–Сервейер» (работает в XXI в.) установлено, что отдельные районы этой планеты формировались преимущественно под действием метеоритной бомбардировки либо вулканизма. В других частях поверхности Марса, по-видимому, преобладали тектонические явления, эрозия и осадочные процессы.

Фотографии, полученные советскими космическими аппаратами «Марс-4 и 5» и «Маринарами-4,6 и 7» (США) позволили сделать вывод,

что большая часть Марса плотно покрыта кратерами, подобно южным материкам Луны и ее обратной стороне. Несмотря на то что «Маринер-9» обнаружил обширные районы с относительно малым числом кратеров, все же представляется, что образование кратеров, по-видимому, было основным процессом в геологической истории Марса. Марсианские кратеры в общем сходны с лунными кратерами сравнимого размера, и основные различия между ними связаны лишь с сильным разрушением марсианских кратеров.

Возможно, большая часть кратеров на Марсе так же, как и на Луне, образовалась в результате ударов метеоритов. Это обнаруживается из их морфологии и распределения по размерам. Определенная часть кратеров имеет вулканическое происхождение. Однако отличить вулканогенные кратеры от ударных, когда и те и другие сильно разрушены, крайне сложно.

С помощью аппарата «Маринер-9» удалось получить фототелевизионные изображения всей планеты, причем разрешение при съемках некоторых участков достигло 100 метров. Один из наиболее важных результатов исследований «Маринера-9» – выявление значительной роли вулканических процессов в формировании поверхности Марса. Самые примечательные вулканические образования – четыре огромных щитовых вулкана гавайского типа. Эти вулканы по крайней мере вдвое крупнее земных вулканических сооружений.

Среди подобных образований наиболее отчетливо выделяется гигантское сводовое поднятие Фарсида, имеющее округлые очертания. Поперечник поднятия равен 5–6 тыс. км. В центре Фарсида находятся основные вулканические сооружения Марса.

Самый крупный щитовой вулкан района Фарсида – Гора Олимп с поперечником около 600 км. Над окружающей местностью вулкан возвышается на 24 км. (рис. 24, 25). Вершина Олимпа – обширная кальдера диаметром 65 км. Во внутренней части кальдеры видны крутые уступы и два кратера диаметром около 20 км. С внешней стороны кальдера окружена сравнительно крутым конусом, по периферии которого расстилаются лавовые потоки радиального рисунка. Более молодые потоки располагаются ближе к вершине, что указывает на постепенное угасание вулканической активности. Щитовой вулкан Олимп окружен крутыми и довольно высокими уступами, формирование которых можно объяснить повышенной вязкостью магмы вулкана. Такое предположение согласуется с данными о его большей высоте по сравнению с близко расположенными вулканами гор Фарсида.

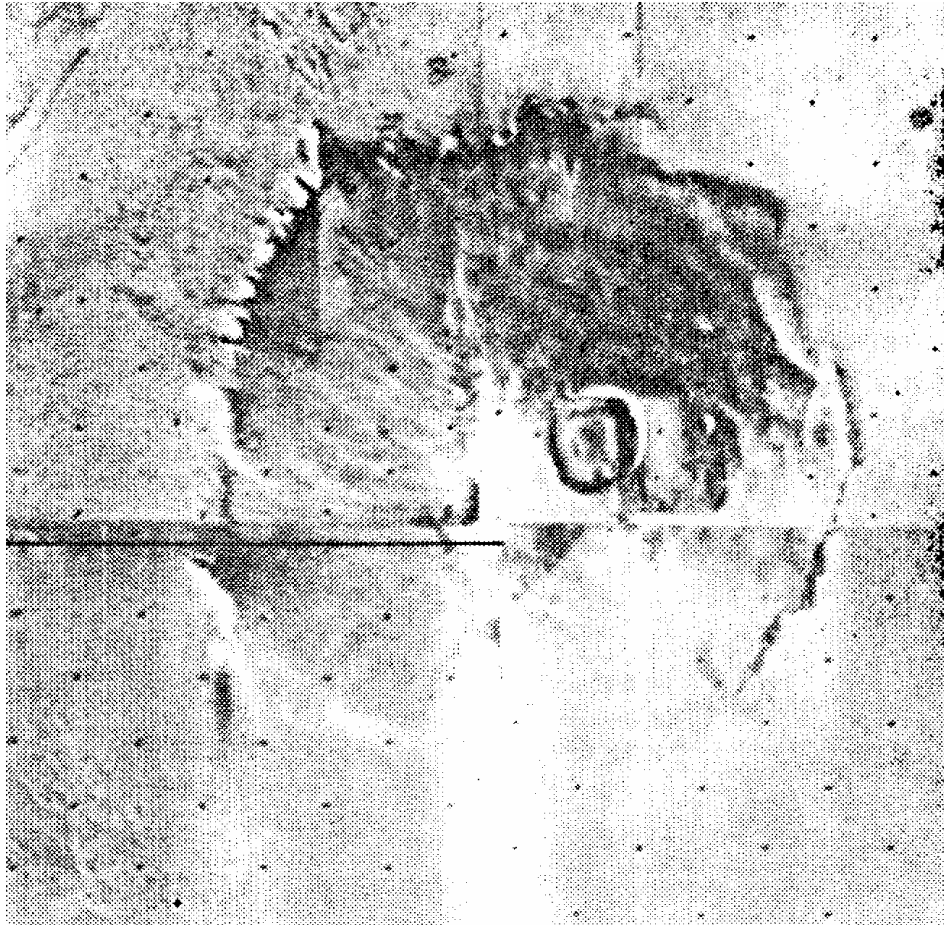


Рис. 24. Космический снимок марсианского вулкана-гиганта Олимп, полученный с АМС «Маринер-9»



Рис. 25. Вулкан-гигант Олимп и некоторые земные вулканы

У щитовых вулканов свода Фарсида намечаются дуговые разломы по периферии. Образование подобных трещин объясняется напряжениями, которые вызваны процессом извержения. Дуговидные разломы, характерные для многих вулканических областей Земли, приводят к формированию многочисленных вулканотектонических кольцевых структур.

На Земле вулканические аппараты и рифтовые зоны часто образуют единую вулканотектоническую область. Подобная закономерность проявилась и на Марсе. Так, система разломов, названная по наиболее крупному грабену системой Копрат, прослеживается в широтном направлении вдоль экватора на расстоянии 2500–2700 км. Ширина этой системы достигает 500 км, а состоит она из ряда рифтообразных грабенов шириной до 100–250 км и глубиной 1–6 км.

К юго-западу от сводового поднятия Фарсида на космических фотографиях обнаруживаются системы разломов, уходящие далеко в глубь континентальной области. Они представляют собой ряд четких, почти параллельных линий и имеют протяженность 1800 км при ширине 700–800 км. Разломы эти сгруппированы в четыре зоны примерно с равными интервалами между ними. На поверхности разломы выражены уступами, иногда бороздами. Не исключено, что эта система образована разломами древнего происхождения, обновленными в процессе развития свода Фарсида.

Разломы и трещины в континентальных областях Марса ориентированы преимущественно в северо-восточном и северо-западном направлениях. На космических фотографиях эти линии выражены не очень отчетливо, что свидетельствует об их древнем заложении. Большинство разломов имеет протяженность в несколько десятков километров. Местами они группируются в линеаменты значительной протяженности. Отчетливо проявленная ориентировка таких линеаментов под углом 45° к меридиану позволяет связывать их образование влиянием вращающих сил. Вероятно, линеаменты могли возникнуть еще на стадии формирования первичной коры. Следует отметить, что линеаменты Марса сходны с планетарной трещиноватостью земной коры.

Космическое зондирование Марса позволило сделать вывод, что тектоника этой планеты имеет много общих черт со строением литосферы Земли. Лабораторией космической геологии МГУ была составлена первая тектоническая карта Марса масштаба 1:20 000 000.

Многие заметные на космических фотографиях Марса «каналы» весьма похожи на русла земных рек. Это волнистые многоруслые образования, содержащие береговые террасы, острова и возможно, наносы. Кажется бесспорным, что эти марсианские каналы вырыты потоком

жидкости. В общепринятой рабочей гипотезе считается, что эта жидкость – вода, хотя следует рассмотреть и возможность эрозионного действия систем, подобных жидкостям и включающих газ и твердое вещество. На Марсе явно отсутствуют связанные системы стоков, аналогичные существующим на Земле речным долинам.

Система марсианских каналов, большая часть которых не обнаруживает существенных изменений строения от истоков до устья, напоминают образования, созданные эпизодическими паводками на Земле. Их форма характерна для иногда возникающих веерных потоков в пустынных областях или – что ближе по масштабам к марсианским каналам – для русел, образующихся при катастрофических паводках озер, запруженных ледяными дамбами. Такие русла свойственны и потокам, возникшим в результате таяния льда при подледном извержении. Заметный во многих каналах плетеный узор указывает на сильные изменения режима течения потоков.

Возникает вопрос об источнике огромного количества воды (или другой жидкости), необходимого, чтобы прорезать русла каналов, иногда достигающих 1500 км в длину и более 200 км в ширину. С теоретических позиций атмосфера Марса не могла бы дать необходимый объем воды. Однако можно предположить, что подходящее количество воды эпизодически освобождается из полярных шапок. Источник жидкости, вероятнее всего, находится в литосфере Марса.

Новые карты марсианской поверхности получены с помощью лазерной космической съемки прибором «Марс Орбитер». Он установлен на американском спутнике «Марс-Глобал-Сервейер», который с 1997 г. совершает облет Марса на высоте 400 км. Прибор непрерывно посылает к поверхности планеты короткие лазерные импульсы и измеряет время до возвращения отраженного сигнала. Подобное зондирование способствует довольно точному картографированию рельефа Марса между 55° южной широты.

Принято считать, что Марс возник примерно 4,6–5 млрд лет назад, одновременно с другими планетами Солнечной системы, в процессе уплотнения протопланетного облака. В результате дифференциации вещества выделялись ядро, мантия и первичная марсианская кора. Ядро Марса, вероятно, меньше земного, поскольку меньше и общая плотность планеты. Состав первичной коры был, по-видимому, анортозитово-габбровым (т. е. из магматических пород основного состава), как и на Луне.

Первичная марсианская кора может быть обнаружена в тех местах каждого полушария, которые буквально испещрены кратерами. Эти кра-

теры, имеющие такой же облик, как кольцевые структуры Луны и Меркурия, возникли, по мнению большинства исследователей, в результате ударов метеоритов. На Луне основная часть кратеров образовалась около 4 млрд. лет назад в связи с так называемой «тяжелой бомбардировкой» из метеоритового роя, окружавшего формирувавшееся планетное тело.

Венера. Первой советской космической станцией, достигнувшей венерианской поверхности, была «Венера-3». Станциями «Венера-13 и -14» удалось впервые отснять цветные панорамы поверхности планеты и при помощи буровой установки, соединенной с рентгенофлюоресцентным спектрометром, проанализировать химический состав грунта Венеры. Были получены спектры образца породы и установлено, что грунт Венеры похож на земные щелочные базальты.

Радиолокационное зондирование планеты проведено «Венерой-15». Получено изображение приполярной области площадью более миллиона квадратных километров, имеющий вид полосы длиной 9 тыс. и шириной 150 км. Дважды пролетел и выполнял ТВ-съемку венерианской поверхности «Маринер-10». Применяя радарное устройство в сочетании с использованием наземных радиотелескопов, спутник «Пионер-Венера-1» (США) проводил съемку поверхности планеты между шестидесятью параллелями.

С помощью спускаемых аппаратов-лабораторий удалось выяснить, что горные породы Венеры оказались такими, как на Земле, Луне, Марсе и Меркурии, излившимися магматическими породами основного состава. Порода богата калием, ураном и торием, что свидетельствует об ее вторичной экзогенной переработке. Обнаружено наличие маломощных слоистых толщ, образование которых связывается с осаждением из атмосферы вулканического пепла и метеоритной пыли.

Методами радарной космосъемки получены данные о макрорельефе венерианской поверхности. Так, вблизи экватора выявлен линейный трог протяженностью 1500 км, шириной 150 км и глубиной 2 км. По своей морфологии он напоминает Восточно-Африканскую систему рифтов на Земле и гигантский грабен Копрат в экваториальном поясе Марса. В пределах тропических широт Венеры выделяются три крупные зоны разломов, трассирующихся на многие тысячи километров.

На венерианской поверхности широко представлены щитовые вулканы. Крупнейший из них напоминает марсианский вулканический гигант Олимп. Поперечник его от 300 до 400 км, однако высота намного уступает Олимпу – всего один километр. Венера осложнена системами кратеров, особенно в экваториальной зоне. Крупные кратеры имеют разме-

ры в поперечнике от нескольких десятков километров до 150 км. Наряду с кратерами на Венере имеются гигантские овальные впадины-депрессии, подобные Морю дождей на Луне, диаметром до одной тысячи километров. У Венеры в отличие от Земли и Марса преобладают преимущественно сглаженные формы рельефа.

Меркурий – самая близкая к Солнцу планета. Первые фотографии Меркурия были получены с космического аппарата «Маринер-10». Двумя ТВ-камерами высокого разрешения на Землю было передано более 2 тыс. кадров о «загадочной» планете. Съемкой была охвачена преимущественно полярная область южной полусферы, составляющая 37 % от площади всей поверхности планеты.

ТВ-снимки Меркурия показывают, что его поверхность осложнена метеоритными кратерами, имеющими высоту обрамляющих их кольцевых валов до 2 – 4 км. Подобно тому как это происходит на Луне, поток падающих на поверхность планеты космических тел создает в меркурианской коре радиально-концентрические структуры и формирует зону дробления горных пород, свиту ударных брекчий и, наконец, поверхностный слой микробрекчий – реголит. Ударные кратеры на Меркурии более уплощены, чем лунные, имеют меньшую глубину и высоту кольцевых валов. Причиной их меньшей выразительности считается сила тяжести планеты, которая в 2 раза превосходит лунную.

На поверхности Меркурия помимо ударных кратеров распространены огромные уступы высотой до 2–3 км и протяженностью в сотни и даже первые тысячи километров. Их формирование, по-видимому, связано с сжатием планеты после фазы расплавления внешней сферы, которое обусловлено уменьшением объема вещества после перехода его из жидкой фазы в твердую. Подобные «уступы» отсутствуют на поверхности Луны.

Спутники Юпитера. В целом планета – гигант Юпитер со своими 39 спутниками представляет собой небольшую планетную систему. К внутренним спутникам относятся четыре самых крупных (диаметр от 3 до 5 тыс. км) – это Ио, Европа, Ганимед и Каллисто, открытые Галилеем в 1610 г. Данные о поверхности и глубинном строении юпитерианских спутников получены благодаря съемкам автоматических космических станций «Вояджер-1,-2» и «Галилео».

На изображениях самого близкого к Юпитеру спутника Ио заметны следы активной вулканической деятельности. Совсем недавно «Галилео» получил новые фотографии извержения вулкана, происходящего на Ио.

С помощью снимков поверхности и измерений гравитационного и магнитного полей, выполненных «Галилео», геологическое строение Евро-

пы ученые интерпретируют в виде двух моделей. Первая предполагает, что под 15-километровым слоем холодного льда расположен слой более теплых ледяных масс. Согласно второй модели, под верхним слоем льда залегает слой воды глубиной до 100 км. По данным космического зондирования на Европе выделяются области геологической активности и системы линеаментов длиной до 300 км. Существует мнение, что Европа разогревается, а затем охлаждается под действием приливного цикла, связанного с Юпитером.

Космические изображения свидетельствуют, что поверхность Каллисто обладает самой высокой в Солнечной системе плотностью ударных кратеров. Магнитные измерения, проведенные «Галилео» с малой высоты, показывают, что магнитное поле Каллисто меняется так же, как и магнитное поле Европы, что может найти свое объяснение в том случае, если предположить наличие под поверхностью слоя соленой воды.

Спутник Ганимед больше похож на планеты земной группы, чем на Юпитер, и отличается от них наличием льда, слагающего твердую верхнюю его оболочку. О присутствии ледяного покрова на Ганимеде свидетельствуют также спектрофотометрические данные и характерные потоковидные выбросы из кратеров, которые ранее были обнаружены на Марсе. Ганимед вслед за Каллисто и Европой стал третьим спутником Юпитера, где, как предполагается, под слоем льда может существовать вода в жидком состоянии.

На Ганимеде выделяются два типа поверхности: темные области, покрытые кратерами, и светлые области, пересеченные сложными системами линеаментов. По космическим снимкам, полученным со станций «Вояджер», В. Б. Нейманом составлена тектоническая схема Ганимеда масштаба 1:25 000 000. На ней он показал палео-, мезо- и кайнозоны и пришел к выводу о широком развитии диагональных систем трещин, а для кайнозоны установил доминирующее субширотное направление разломов. В пределах мезо- и кайнозон им выделены молодые вулканические очаги с радиально-лучистыми системами линеаментов.

Благодаря космической планетологии появилась возможность создать тектонические карты Луны, Марса, Венеры, Меркурия и спутника Юпитера – Ганимеда. Установлено, что у планет земной группы имеется много сходного: все они имеют ядро, мантию и кору. Планеты характеризуются глобальной асимметрией в распределении континентальной и океанической коры. В литосфере этих планет и у Луны обнаружены системы разломов, отчетливо видны трещины растяжения, приведшие к образованию на Земле, Марсе и Венере рифтовых систем. Только на Земле

и Меркурии пока установлены структуры сжатия. Лишь на нашей планете выделяются складчатые пояса, гигантские сдвиги и шарьяжи. В дальнейшем предстоит выяснить причину различия в строении коры Земли и других планет, определить, связано ли это с внутренней энергией или обусловлено чем-то другим.

Сравнительно-планетологический анализ показал, что в литосфере планет земной группы можно выделить континентальные, океанические области и области переходные. Мощность коры на Земле, Луне, Марсе и других планетах земной группы по расчетам геофизиков не превышает 50 км.

Обнаружение древних вулканов на Марсе, Венере и современного вулканизма на спутниках Юпитера показало общность процессов образования литосферы и ее последующих преобразований. Сходными оказались даже формы вулканических аппаратов.

Изучение метеоритных кратеров Луны, Марса Венеры и Меркурия привлекло внимание к поискам подобных образований на Земле. Сейчас выявлены десятки древних метеоритных кратеров – астроблем – диаметром до 100 км. Если о подобных лунных кратерах долго шла дискуссия по поводу их вулканического или метеорного происхождения, то после обнаружения аналогичных кратеров на спутниках Марса Фобосе и Деймосе предпочтение отдается метеорной гипотезе.

Космическая планетология имеет большое практическое значение для геологии. При поисках полезных ископаемых в недрах Земли, геологи все теснее сталкиваются с проблемами образования рифтовых зон и разломов литосферы. Отмечается связь рудных месторождений со строением кольцевых структур. Существует гипотеза, что первичный кольцевой рисунок земной коры, возникший почти 4 млрд лет назад, мог определять неравномерность процессов теплопереноса из недр к поверхностным слоям земной коры. Такие геологические условия должны были влиять на распределение магматических пород, рудных месторождений, на формирование залежей нефти и газа.

Литература

- Аковецкий В. И.* Дешифрирование снимков: Учеб. для вузов. М., 1983. 374 с.
- Брюханов А. В., Господинов Г. В., Книжников Ю. Ф.* Аэрокосмические методы в географических исследованиях: Учеб. пособие. М., 1982. 232 с.
- Визуальные методы дешифрирования: Учеб. пособие. / Т. В. Верещака, А. Т. Зверев, С. А. Сладкопечев, С. С. Судакова. М., 1990. 341 с.
- Виноградов Б. В.* Космические методы изучения природной среды. М., 1976. 286 с.
- География из космоса: Учеб.-метод. пособие / В. П. Савиных, В. А. Малинников, С. А. Сладкопечев, Э. М. Цыпина. М., 2000. 224 с.
- Губин В. Н.* Космическая геология Беларуси // *Працы Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта. Т. 7. Біялогія, геаграфія.* Мн., 2001. 223–242 с.
- Губин В. Н., Ковалев А. А., Коркин В. Д.* Аэрокосмическое изучение экзогенных процессов в условиях техногенеза. Мн., 2003. 142 с.
- Гудилин И. С., Комаров И. С.* Применение аэрометодов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях: Учеб. пособие. М., 1978. 319 с.
- Дистанционное картографирование природной среды / А. А. Ковалев, В. Н. Губин, А. И. Павловский и др. Мн., 1995. 176 с.
- Кац Я. Г., Рябухин А. Г., Трофимов Д. М.* Космические методы в геологии: Учеб. пособие. М., 1976. 246 с.
- Кац Я. Г., Тевелев А. В., Полетаев А. И.* Основы космической геологии: Учеб. пособие. М., 1988. 235 с.
- Книжников Ю. Ф.* Аэрокосмическое зондирование. Методология, принципы, проблемы. М., 1997. 129 с.
- Космическая информация в геологии / Отв. ред. В. Г. Трифонов и др. М., 1983. 536 с.
- Космическая фотосъемка и геологические исследования / Под ред. Г. Б. Гонина и С. И. Стрельникова. Л., 1975. 416 с.
- Кравцова В. И.* Космические методы картографирования. М., 1995. 240 с.
- Криволицкий А. Е.* Голубая планета: Земля среди планет. Географический аспект. М., 1985. 335 с.
- Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии / Пер. с нем. М., 1988. 343 с.
- Михайлов А. Е., Рамм Н. С.* Аэрометоды при геологических исследованиях: Учеб. пособие. М., 1975. 198 с.
- Мониторинг природной среды дистанционными и геодезическими методами / В. Н. Губин, А. А. Ковалев, М. В. Белоконов и др. Мн., 1996. 156 с.
- Обуховский Ю. М., Губин В. Н., Марцинкевич Г. И.* Аэрокосмические исследования ландшафтов Беларуси. Мн., 1994. 175 с.
- Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф.* Аэрокосмическая фотосъемка: Учеб. для вузов. М., 1997. 378 с.
- Садов А. В., Бурлешин М. И., Викторов А. С.* Аэрокосмические методы поисков подземных вод. М., 1985. 144 с.
- Сладкопечев С. А.* Изучение и картографирование рельефа с использованием аэрокосмической информации. М., 1982. 216 с.
- Физические основы дистанционного зондирования / К. С. Адзерихо, Л. И. Киселевский, С. Б. Костюкевич, В. В. Краснопрошин. Мн., 1991. 293 с.

Содержание

Предисловие.....	3
1. Введение в дистанционное зондирование Земли.....	4
1.1. Основные понятия, терминология.....	4
1.2. Развитие аэрокосмогеологических исследований....	6
2. Методы дистанционного изучения литосферы.....	12
2.1. Физические основы и техника аэрокосмических съемок.....	12
2.2. Фотографические методы.....	18
2.3. Оптико-электронные методы.....	25
2.4. Визуально-инструментальные наблюдения.....	34
3. Геологическое дешифрирование материалов дистан- ционного зондирования.....	39
3.1. Принципы дешифрирования аэрокосмических снимков.....	39
3.2. Визуальное геологическое дешифрирование.....	44
3.3. Автоматизированное геологическое дешифрирова- ние.....	61
3.4. Технологическая схема дешифровочного процес- са.....	69
4. Применение дистанционных методов в геологических исследованиях.....	74
4.1. Геоинформативность аэрокосмических снимков.....	74
4.2. Анализ линеаментной тектоники.....	80
4.3. Изучение кольцевых структур литосферы.....	88
4.4. Исследование динамики плейстоценовых оледене- ний.....	95
5. Использование материалов дистанционного зондирования при прогнозе и поисках полезных ископаемых.....	107
6. Дистанционные методы в эколого-геологическом картографировании.....	118
7. Проблемы космической планетологии.....	126
Литература.....	136

Валерий Николаевич Губин - доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой динамической геологии Белорусского государственного университета. Автор более 160 научных работ, в том числе 7 монографий и четырех учебных пособий для вузов. Основные труды: Палеогеодинамические реконструкции платформенных бассейнов. Мн., 1991 (в соавт.); Мониторинг природной среды дистанционными и геодезическими методами. Мн., 1996 (в соавт.); Геологическая съемка и картографирование. Полевая практика: Учебное пособие. Мн., 2002 (в соавт.).

Область научных интересов В. Н. Губина: теория и методы космической геологии, новейшая тектоника и геодинамика платформ, проблемы экологической геологии, геологическое образование.