

УДК 553.981:622.279

**Гафаров Н.А., Баранов Ю.Б., Ванярхо М.А., Филатов Д.М.,
Денисевич Е.В., Кан-миров Ю.И., Кулапов С.М., Фейгин А.Е.,
Горяйнов М.С., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э.** Использование
космической информации в газовой промышленности. - М.: ООО
«Газпром экспо», 2010. - 132с.

Рассмотрены вопросы по космическому мониторингу современных движений земной поверхности и опасным геокриологическим процессам в зоне распространения многолетних мерзлых пород для обеспечения безопасного функционирования объектов иной системы газоснабжения. Даны анализ поиска месторождений нефти и газа и оценка перспективности лицензионных участков с использованием космической информации. Представлена классификация месторождений нефти и газа по степени природной и технической опасности. Описаны вопросы выявления и оценки разрывов и зон трещиноватости по материалам космических съемок.

ПРЕДИСЛОВИЕ

С конца 60-х гг. XX в. к традиционным методам изучения строения Земли добавились новые, прежде казавшиеся экзотическими. Среди них особо выделяются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

К настоящему времени, благодаря быстрым темпам развития технологий, можно говорить уже о целом мультидисциплинарном направлении исследований, основанном на результатах космической съемки. Сегодня данные ДЗЗ успешно применяются в таких областях науки, как геология, океанология, география, экология и т.д.

Настоящая монография в большей степени посвящена геологическим приложениям использования космической информации в газовой промышленности, а именно поискам месторождений углеводородов и обеспечению промышленной безопасности их освоения. В частности, представлены работы, посвященные использованию данных дистанционного зондирования Земли для изучения строения участков недр на предмет наличия в них углеводородного сырья, а также для идентификации опасных природных процессов различного происхождения. Эти работы являются результатами исследований группы авторов, общей целью которых было стремление

разносторонне показать возможности применения данных космической съемки при решении различных задач нефтегазового сектора.

Поиски любых месторождений полезных ископаемых, в том числе и месторождений нефти и газа, начинаются с построения геологических моделей территорий. Ранее это были геологические карты, сопровождавшиеся геологическими разрезами и стратиграфическими колонками. Сегодня это комплексные трехмерные компьютерные модели нефтегазовых территорий. Использованию космической информации при построении таких моделей посвящена первая глава монографии.

В недавнем прошлом практически все компьютерные модели как нефтегазовых территорий, так и отдельных месторождений были пликативными. Сегодня приходит понимание весомой роли разрывных нарушений в геологическом строении нефтегазовых объектов. Поэтому вторая глава посвящена дистанционным методам выявления и оценке разрывов и зон трещиноватости.

Движения земной поверхности, в том числе и связанные с разрывными нарушениями, геокриологическими и другими экзогенными процессами, представляют реальную угрозу безопасному функционированию зданий и сооружений нефтегазовых промыслов. В третьей главе описан опыт авторов по идентификации природных и техногенных движений. Изложены теоретические основы и приведены примеры использования новейшей технологии космической радарной интерферометрии в комплексе с ГЛОНАСС/GPS-наблюдениями, которая позволяет не только на качественном, но и на количественном уровне оценить интенсивность и направленность смещений современного рельефа.

Большинство месторождений углеводородов, в том числе крупнейшие из них, расположены в зонах распространения вечной мерзлоты. Четвертая глава посвящена технологии космического мониторинга геокриологических процессов, представляющих реальную опасность как для объектов инфраструктуры месторождений, так и для трубопроводов, построенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Обеспечение безопасного функционирования систем трубопроводного транспорта и эксплуатации месторождений требует значительных объемов геолого-маркшейдерских наблюдений. С учетом значительных размеров территорий, на которых такие наблюдения следует выполнять, в пятой главе сделана попытка классифицировать месторождения нефти и газа по степени природной и техногенной опасности для оптимизации последующих мониторинговых работ. Естественно, что

месторождения, находящиеся в наиболее опасных условиях, требуют более пристального геолого-маркшейдерского контроля.

С недавних пор космическая съемка применяется наравне с классическими геофизическими и геохимическими методами для поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Более того, некоторые из методов дистанционного зондирования, например, многоканальную съемку, применительно к поискам месторождений углеводородов на сегодняшний день уже можно считать классикой. В связи с этим стоит особо отметить, что в последнее время неуклонно растет значение таких технологий ДЗЗ, как дифференциальная радарная интерферометрия, лазерная съемка и др. Именно вопросам поиска новых месторождений углеводородов и оценке перспективности лицензионных участков посвящена шестая глава настоящей работы.

В заключение изложен авторский взгляд на перспективы использования космической информации в газовой промышленности.

На сегодняшний день на русском языке имеется определенное количество книг, посвященных использованию материалов ДЗЗ. Вместе с тем, по причине растущего интереса научной общественности к данной тематике, а также ввиду бурно развивающихся и совершенствующихся технологий ДЗЗ, нельзя сказать, что объем имеющейся на данный момент информации по методам дистанционного зондирования позволяет найти ответы на все интересующие исследователей вопросы.

Настоящая монография призвана отчасти ответить на ряд, по мнению авторов, наиболее актуальных вопросов, с которыми им доводилось сталкиваться на национальных и международных конференциях и семинарах, посвященных данной теме. Кроме того, особенностью данной монографии является демонстрация возможностей применения данных дистанционного зондирования Земли на конкретных примерах. При написании отдельных глав за основу брались результаты отчетов по научно-исследовательским работам, выполненным за последнее время в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», - головном научно-исследовательском институте ОАО «Газпром», в котором ведутся как исследования по разработке новых технологий, основанных на применении материалов дистанционного зондирования Земли, так и работы по использованию уже готовых ДЗЗ-методик при решении различных научно-производственных задач Общества.

Книга предназначена для научных и практических работников, занимающихся проблемой комплексного изучения и рационального

освоения углеводородных природных ресурсов. Она также может быть использована для обучения студентов высших учебных заведений природоресурсных специальностей.

ГЛАВА 1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЯХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Решение задач геологоразведки на значительных территориях, обустройство месторождений углеводородов в экстремальных климатических условиях, добыча нефти, газа и газового конденсата требуют большого объема геометрически точных и актуальных картографических данных и их своевременного предоставления на всех уровнях планирования и управления нефтегазовой отраслью.

Длительное время осуществление картографического обеспечения производственной деятельности нефтегазовых компаний, как и развитие технологии тематической картографии в целом, шло экстенсивным путем за счет привлечения новых источников косвенных сведений об объектах картографирования. Объемы информации и затраты на ее получение и обработку росли, а доля реально используемых данных и практическая отдача - снижались. Выход из сложившейся ситуации заключается в применении принципиально новых компьютерных технологий комплексного моделирования нефтегазоносных территорий на базе объективной информационной основы — космического изображения земной поверхности, каждая точка (пиксел) которого имеет реальные географические координаты. Это приводит к необходимости создания геоинформационной системы (ГИС).

Геоинформационное моделирование на основе ГИС

Геоинформационная модель нефтегазоносной территории — это интегрированная система, предназначенная для сбора, хранения, анализа и визуализации пространственных данных и связанной с ними информации о природных, технических и техногенных объектах, базирующаяся на совокупности программных инструментов и вычислительной техники.

Геоинформационное моделирование позволяет оценить степень аномальности исходных природных физических полей и наличие связи локальных аномалий поля с известными месторождениями углеводородов. На этой основе базируются прогнозные оценки наличия месторождений в том или ином регионе, выявление перспективных структур, их ранжирования для ввода в дальнейшие геологоразведочные работы.

Глава 1. Использование космической информации в комплексных моделях...

Геоинформационное моделирование по комплексу данных позволяет провести оптимизацию размещения производственных объектов при проектировании поисков, разведки, добычи и транспорта углеводородов (в том числе выработать рекомендации по корректировке местоположения кустов скважин на основании результатов мерзлотного параметрического бурения и космических съемок с целью переноса кустов в наиболее благоприятные геокриологические условия).

Геоинформационное моделирование с использованием технологии радарной дифференциальной интерферометрии позволяет провести обоснование и картографирование зон возможных просадок земной поверхности при разработке залежей углеводородов и создать горно-геологическое обоснование маркшейдерско-геодезического мониторинга.

Процесс моделирования состоит из нескольких этапов и включает, в частности, линеаментный анализ. Линеаментный анализ космических изображений позволяет выявить структурный каркас территории, оценить геодинамическую активность разрывных нарушений, их флюидопроницаемость, а также дать оценку влияния тектонических и современных геодинамических факторов на темпы внедрения подошвенных и законтурных пластовых вод в залежи месторождений.

Создание на базе современных геоинформационных систем прогнозных аэрокосмических моделей месторождений углеводородов и нефтегазоносных бассейнов способствует оценке потенциальной газоносности новых территорий и составлению рекомендаций по производству геолого-разведочных работ.

Особенно интересна технологическая возможность прогнозирования глубинных структур и пространственного моделирования на уровне газоносности. Информация о глубинных уровнях нефтегазоносных бассейнов проявляется на космических изображениях через различные компоненты ландшафта, выявление которых выдвигает повышенные требования к геометрической и спектральной разрешающей способности материалов съемок, подбору и комплексированию видов съемок и диапазонов спектра, обеспечивающих выявление, картографирование и интерпретацию геологических данных.

Исследования по применению материалов дистанционных зондирований Земли в геоинформационных проектах показали, что в

комплексе с топографическими, геолого-геофизическими и промысловыми данными результаты дешифрирования материалов космических съемок являются надежной информационной основой устойчивого функционирования и интенсификации производственных процессов нефтегазовых компаний.

Комплексные модели нефтегазоносных территорий создаются на базе ГИС — геоинформационных систем (рис. 1.1).

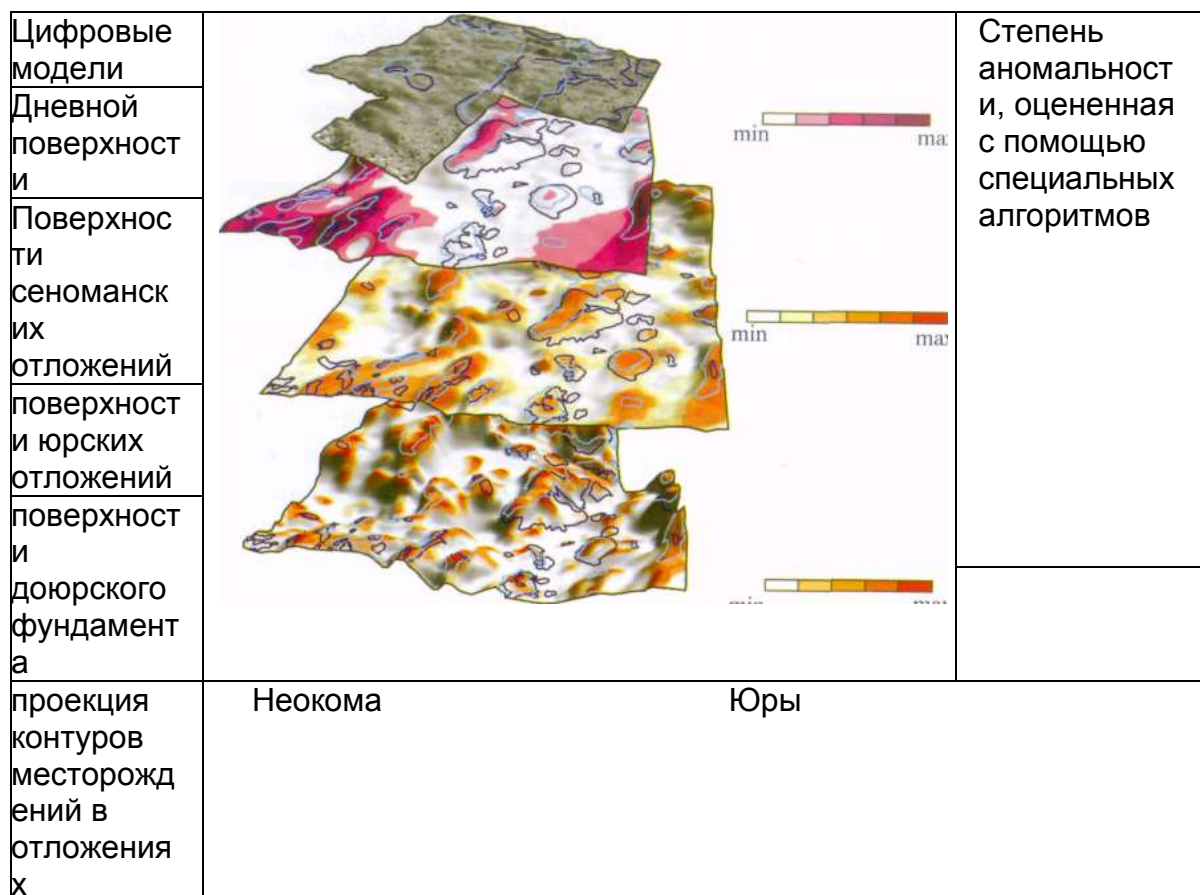


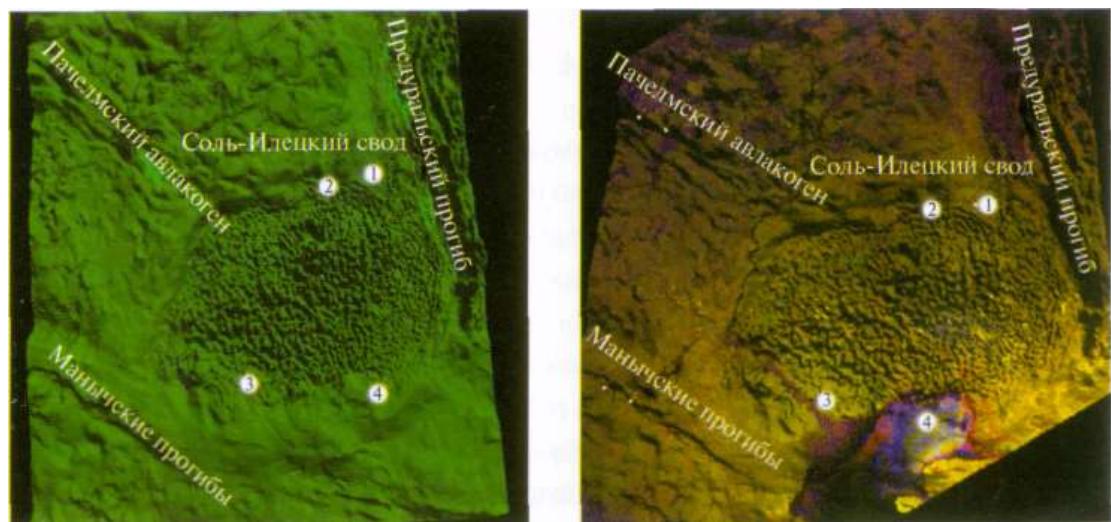
Рис. 1.1. Комплексная геоинформационная модель одной из нефтегазоносных территорий

Первые ГИС были созданы в Канаде и США около 30 лет назад. Сейчас в промышленно развитых странах существуют тысячи ГИС, используемых в экономике, политике, науке и образовании, управлении ресурсами и охране окружающей среды и т.д. [1]. В создании ГИС участвуют международные организации, крупнейшие государственные структуры, университеты, частные фирмы.

Геоинформационная модель нефтегазоносной территории, в отличие от геоинформационной системы, например лицензирования недропользования, объединяет два генеральных направления использования ГИС-технологий: информационное (создание и наполнение баз данных, визуализация информации) и

прогнозно-аналитическое (интегрированная обработка данных, моделирование и прогноз) - сразу в нескольких предметных областях. Например, установленные методами радарной интерферометрии просадки земной поверхности (маркшейдерия) требуют перераспределения отборов газа по эксплуатационным скважинам (системы разработки) в целях обеспечения безопасной эксплуатации месторождения. Этот пример иллюстрирует необходимость наличия в геоинформационной модели месторождения (для решения всего лишь одной из задач обеспечения промышленной безопасности) пространственных данных о его ифраструктуре, информации об отборах газа по скважинам за разные периоды времени, разновременных космических изображений и результатов их интерферометрической обработки, цифровых моделей рельефа.

Многообразие задач восполнения минерально-сырьевой базы, эксплуатации месторождений, транспорта и хранения углеводородов существенно увеличивает номенклатуру необходимых данных в геоинформационных моделях месторождений, трубопроводов и подземных хранилищ газа для комплексного обеспечения производственной деятельности нефтегазовых компаний (рис.1.2).



1.2. Дополняющее геоинформационную модель трехмерное представление гравитационного поля (на примере Прикаспийского региона). Цифрами обозначены месторождения углеводородов: 1 — Оренбургское, 2 — Карачаганакское, 3 — Астраханское, 4 — группа месторождений акватории северного Каспия

Практика показывает, что нерационально создавать единую

ГИС, охватывающую все направления производственной деятельности нефтегазовой компании. Решением этой сложнейшей задачи является предварительное создание инфраструктуры пространственных данных (ИПД) с распределенной структурой хранилищ данных, многочисленными моделями различных предметных областей, наличием метаданных и соответствующих сервисов их использования. Это создает условия для тематического моделирования пространственно распределенных процессов и явлений и прогнозирования их изменений во времени.

Процесс создания ГИС и, соответственно, геоинформационной модели включает в себя последовательных технологических этапов: предварительное определение круга решаемых задач и, как следствие, используемых материалов, разработку ИПД, ее создание и наполнение.

Создание информационного ресурса в виде тематических карт осуществляется на основе сформированных баз данных, которые включают в себя аэрокосмические изображения, геологические, геофизические, топографические, маркшейдерские, промысловые данные в виде электронных таблиц, привязанные к векторным картографическим изображениям границ лицензионных участков, разведочных и эксплуатационных скважин, объектов инфраструктуры месторождений. Космические изображения выступают в роли пространственной основы, к которой географически привязывается и на фоне которой визуализируется вся остальная информация.

Космические снимки как важная составляющая ГИС-проекта

На основе анализа космических изображений производятся обнаружение, картографирование, оценка и мониторинг природных и техногенных процессов, влияющих на безопасность объектов добычи и транспорта углеводородов.

Однако «сырые» данные дистанционного зондирования требуют технологической обработки и для извлечения содержательной информации из космических изображений используется геоинформационное дешифрирование. Геоинформационное дешифрирование космической информации - это создание компьютерной картографической базы данных обнаруженных и распознанных на космических снимках объектов, организованной в виде тематических слоев, которые трансформированы в единую с геоинформационной моделью координатную систему.

Аэрокосмические (а сегодня преимущественно - космические) изображения несут интегральную информацию о поверхности и

состоянии недр обширных территорий и в силу этого своего свойства являются удобной, а иногда и безальтернативной информационной основой.

Космическое изображение (КИ) - реальное интегральное отображение местности, построенное на основе закономерного отражения и поглощения электромагнитных волн природными и техногенными объектами в видимом, тепловом и радиодиапазонах электромагнитного спектра. На космическом изображении видны (за счет соответствующих дешифровочных признаков) поверхностные явления и объекты ландшафта, техногенные объекты, а также глубинные структуры земной коры. Существующий эффект проявления глубинных структур на изображениях, снятых с высоких орбит, позволяет с использованием космических снимков разной стадии генерализации выявлять информацию различных глубинных уровней.

Под генерализацией понимается объединение мелких геологических (или ландшафтных) элементов в более крупные. Поскольку величина одного элемента космического изображения является более или менее постоянной, то при изменении масштаба съемки в нем отображаются разные по величине участки местности: яркостные характеристики участков, отвечающие деталям ландшафтного строения, усредняются, меняя информативность изображения (рис. 1.3).

Качественная смена информативности происходит при изменении масштаба изображения в 3-5 раз. Это означает, что основные объекты дешифрирования имеют различный ранг, например, слои, складки, антиклинории и синклинории, складчатые хребты и межгорные впадины, складчатые пояса и платформы. Это не исключает того, что в каждом из этих случаев объекты более низкого ранга могут наблюдаться в качестве деталей высокоранговых образований.

Специфика использования космических изображений обусловлена геологическими особенностями нефтегазоносных территорий [2]. Так, для территорий арктических районов Западно-Сибирской мегапровинции и сопредельных районов это седиментационные бассейны, заполненные осадочными толщами большой мощности, где продуктивные залежи находятся на значительной глубине и приурочены к ловушкам структурного, тектонического, литологического типов.

Имеется специфика в использовании космических данных не только в зависимости от природно-климатических зон и конкретных съемочных систем, но и от объектов изучения (месторождения, линейная часть трубопроводов, подземные хранилища газа).

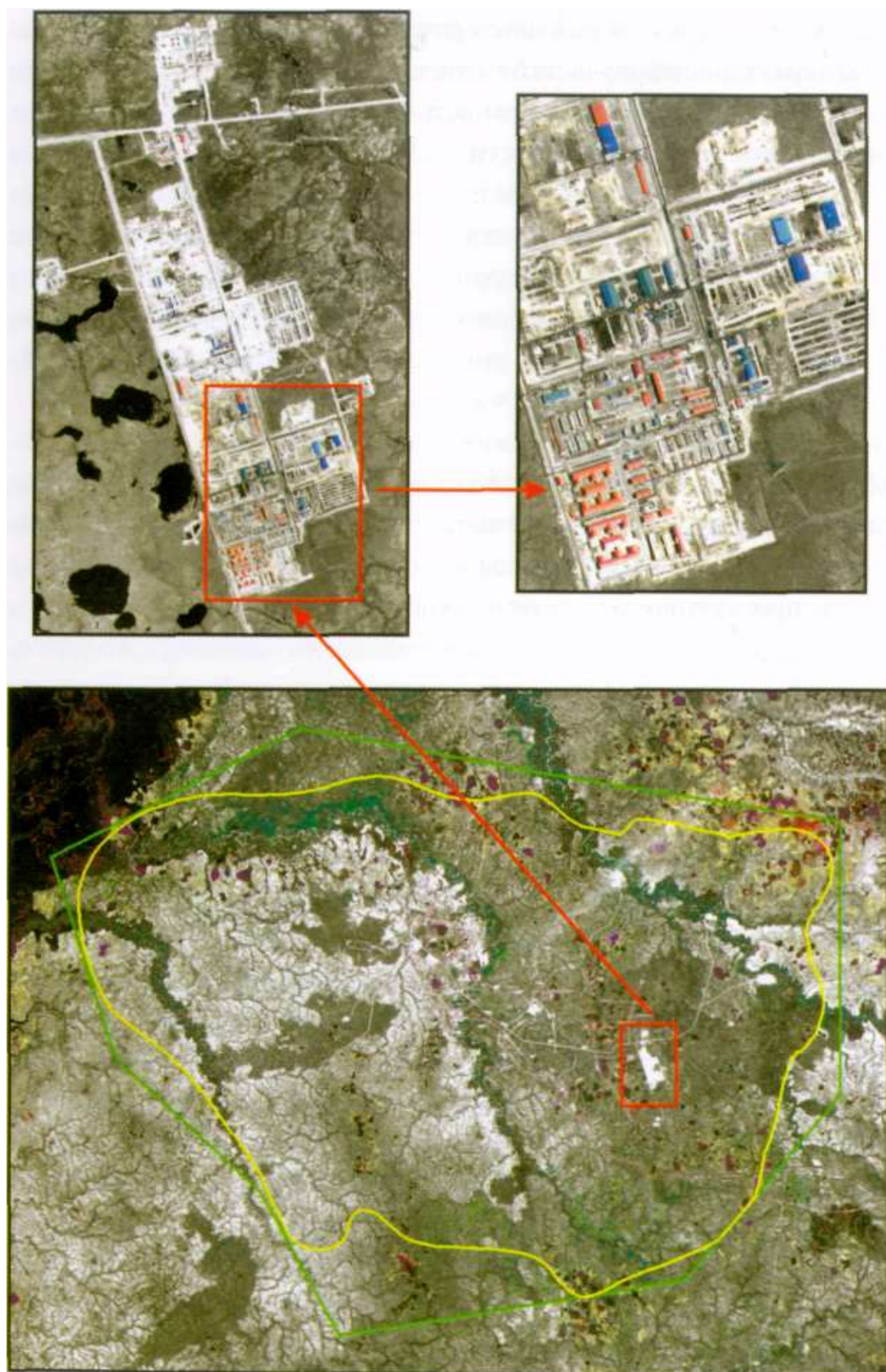


Рис. 1.3. Иерархические уровни космических изображений на примере инфраструктуры месторождения в Западно-Сибирской мегапровинции

В большинстве случаев геологические объекты дешифрируются на материалах дистанционного зондирования по совокупности природных индикаторов, размеры каждого из которых могут быть на порядок меньше, чем сам объект. Дешифрирование космических изображений базируется на геоиндикационной концепции о взаимосвязи всех компонентов ландшафта. Ландшафтные компоненты как результат взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов содержат информацию о структуре, составе и состоянии глубинных геологических объектов, являясь их индикаторами.

Космические изображения широко используются в мировой практике геолого-разведочных работ на стадиях прогноза, оценки рудоносных зон и зон нефтегазоаккумуляции, при выявлении и подготовке объектов к поисковому бурению и на стадии эксплуатации месторождений. Это обусловлено высокой информативностью космических изображений в части выявления геоструктурных элементов, геохимических аномалий, элементов инфраструктуры месторождений и транспортных систем, активных, а значит опасных, геодинамических и экзогенных процессов.

В комплексе с геофизическими данными результаты дешифрирования материалов космической съемки являются основой прогнозирования глубинных структур и пространственного моделирования, в частности, на уровне нефте-газоносности.

Особые требования к периодичности поступления дистанционных материалов предъявляют выполняемые по заданной программе наблюдения (мониторинг) природной среды, окружающей горные промыслы и транспортные коммуникации. При этом проблемы геоэкологии в недропользовании следует рассматривать в двух аспектах. Во-первых, это наблюдение за промышленными объектами и их воздействием на окружающую среду (например, сейсмические процессы, инициированные разработкой месторождений), во-вторых, оценка потенциальных рисков, связанных с воздействием на промышленные объекты опасных геологических процессов (карст, оползни, подвижки по разрывным нарушениям и пр.).

Дистанционное зондирование Земли в широком смысле — это получение любыми неконтактными методами информации о поверхности Земли, объектах на ней или в ее недрах обычно в виде изображения земной поверхности в определенных участках электромагнитного спектра [3]. Информация, полученная в виде фотографического, сканерного, радиолокационного или иного изображения в цифровом либо аналоговом виде, получила название материалов ДЗЗ. Характеристики такого изображения зависят от множества природных и технических условий. Поскольку при

дешифрировании основными объектами исследования являются элементы ландшафта, правильный выбор технических и природных условий съемки имеет определяющее значение.

Относительно невысокое пространственное разрешение материалов космической съемки (МКС) обеспечивает естественную генерализацию и большую обзорность изображения, что в сочетании с аэроснимками дает незаменимые средства для решения задач изучения как крупных регионов, например нефтегазоносных бассейнов [4,5], так и отдельных месторождений и даже деталей их геологического строения. В современных региональных геологических исследованиях использование материалов ДДЗ в виде дистанционной основы проводимых работ является обязательным и регламентируется соответствующими инструктивными документами Минприроды России [6].

Видимый диапазон (примерно от 400 до 700 нм; 400-500 нм - синяя зона, 500-600 нм - зеленая, 600-700 нм - красная) - это очень небольшая часть электромагнитного спектра, который представляет интерес для ДЗЗ. Более короткие длины волн — ультрафиолетовая область — мало используются в дистанционном зондировании из-за очень сильного поглощения в атмосфере. Зато инфракрасная область, занимающая огромный участок спектра - от 700 до 15 000 нм, очень информативна из-за того, что именно в этой области расположены многие характерные пики спектров отражения природных сред, позволяющих их распознавать методами ДЭЗ. По этой причине в последнее время представляют основной интерес и имеют наибольшее применение цифровые съемочные многозональные системы: IKONOS, QuickBird, EROS, IRS, SPOT, Landsat TM и ETM+, ASTER, MODIS и NOAA. Число каналов (спектральных зон), снимаемых цифровыми системами, колеблется от одного-трех (SPOT) до восьми (Landsat ETM+) и даже до многих десятков и нескольких сотен. Последние системы получили название гиперспектральные.

Радиолокационные, как и цифровые гиперспектральные съемки, сегодня самые быстро развивающиеся и перспективные методы ДЗЗ.

Важным требованием является показатель облачности на изображениях. Обычно он не должен превышать 5—10 % при условии, что территории, занятые облаками, дублируются на других изображениях, которые используются для реставрации основных материалов. В противном случае затраты на изготовление дистанционной основы геологических исследований, на 100 % свободной от облаков территории, слишком велики.

Информация, получаемая по материалам космической

съемки, определяется их разрешающей способностью, генерализацией и обзорностью.

В настоящее время по разрешающей способности выделяются: панхроматические, многозональные, радиолокационные и гиперспектральные съемочные системы высокого (QuickBird и им подобные), среднего (Landsat, ASTER и др.) и низкого (NOAA, MODIS) разрешения.

Уровень генерализации определяется высотой съемки, а обзорность зависит от ширины полосы захвата съемочной системы. В целом МКС высокого разрешения характеризуются меньшей генерализацией и обзорностью по сравнению с МКС среднего и низкого разрешения.

Съемка низкого разрешения (100 м и более) континентального уровня генерализации типа NOAA позволяет исследовать глобальные критерии нефтегазоносности. Ее используют для уточнения границ осадочных бассейнов, выявления трансконтинентальных и трансрегиональных линеаментов, разрывных нарушений глубокого заложения, участков с единым характером геоморфологического строения, соответствующих надпорядковым тектоническим структурам (щитам, антеклизам, синеклизам, тектоническим ступеням). Получаемая в результате дешифрирования геологическая информация носит оценочный характер в рамках региональных исследований.

По МКС среднего разрешения (5—45 м) регионального и локального уровня генерализации устанавливаются границы седиментационных бассейнов, их структурный план и блоковое строение. Эти же материалы позволяют детализировать внутреннее строение нефтегазоносных бассейнов, исследовать закономерности пространственного распределения залежей по площади, разрезу и обводненности, выявить в результате изучения типов ландшафта особенности строения их тектонических блоков и структур второго порядка (сводов, валов, авлакогенов, впадин). Возможно выявление наиболее приподнятых блоков, а в их пределах основных разрывных дислокаций, контролирующих размещение цепей локальных структур и блоковую фрагментацию зон нефтегазонакопления; судить о движениях новейшего тектонического этапа, влияющего на перераспределение углеводородов в недрах.

На МКС высокого разрешения (лучше 2 м) локального уровня генерализации и аэроснимках устанавливаются детали складчатых и разрывных дислокаций, расположения ландшафтных аномалий, соответствующих погребенным локальным структурам, в том числе по нефтегазоносным горизонтам. При этом важную роль играет статистический анализ линейных элементов ландшафта,

позволяющий прогнозировать степень тектонической нарушенности горных пород, обнаруживать разрывные нарушения, разделяющие нефтегазовые залежи на отдельные блоки, выявлять зоны уплотнения-разуплотнения и получать информацию о напряженном состоянии массивов недр.

Изучение изменений в характере микрорельефа, растительности, поверхностных отложений, степени обводненности и других факторов позволяет давать оценку состояния многолетнемерзлых пород, определять места просачивания флюидов и т.д.

В последнее время некоторые исследователи рассматривают дешифрирование материалов высокого разрешения, особенно гиперспектральных изображений, как метод прямого поиска залежей углеводородов. Основой для этого служат представления о переносе ферромагнитных минералов в восстановительной среде вместе с углеводородными эманациями по трещинам и разломам или же их образованием при циркуляции гидротерм [7]. Обладая необходимой геологической информацией, удастся выделить геохимические аномалии, рассматриваемые как поисковый признак продуктивных коллекторских толщ. По оценке специалистов американской фирмы Geoscience and Technology, эффективность такого прогнозирования составляет 85 %.

Для решения задач газовой геологии особенно важны данные в диапазонах 2,0—2,4 мкм, так как на них наилучшим образом отражаются минералы, образующиеся под действием мигрирующих от залежей флюидов, а диапазон 2,27—2,46 мкм является интервалом абсорбции углеводородов. Эти данные касаются использования изображений в видимом и инфракрасном диапазонах. Однако гиперспектральная съемка в этом отношении представляется более информативной.

В России гиперспектральные съемочные системы пока не распространены. Тем не менее, используемые за рубежом подходы к материалам их обработки реализуются у нас для поиска нефти и газа в результате применения многоспектральных данных с высоким пространственным разрешением в комплексе с радиолокационными и тепловыми изображениями. Обработанные по специальной методике, они позволяют выявлять слабые ландшафтные аномалии, связанные с миграцией углеводородных флюидов, формирующих в почве и растительности аномальные содержания микроэлементов (марганец, никель, титан, ванадий), минералов, содержащих железо в окисной форме (магнетит, гетит), кальцита, доломита, халцедона, пирита.

МКС среднего и высокого разрешения играют большую роль в

расшифровке геоморфологических и неотектонических условий нефтегазоносных районов. По ним устанавливаются распространение различных генетических типов четвертичных отложений, особенности эрозионно-денудационного рельефа в связи с характером неотектонических движений, строение гидрографической сети, связанное с проявлением горизонтальных и вертикальных неотектонических подвижек.

При проведении экологических исследований базовыми являются спектральные особенности отражения электромагнитного излучения пятнами углеводородов в холодной и теплой частях спектра. Аналогично проводится диагностика разлива вдоль аварийной части трубопровода, если она проходит по геологически открытой поверхности или по песчаной отсыпке. В случае когда аварийный сегмент трубопровода проходит по торфяным грунтам, выявление разлива углеводородов становится сложнее. Если авария устранена, но не проведены рекультивационные мероприятия, то с течением времени отмечается смена цветности торфяно-болотных массивов на цветосинтезированном изображении (RGB-синтез с использованием соответственно 3, 2 и 1-го каналов). Для верховых сфагновых крупнобугристых торфяников цвет изменяется от соломенно-желтого (до аварии) до интенсивно-зеленого (после нее), что связано с деградацией сфагновых мхов и эвтрофикацией периферии пятна загрязнения. Мониторинг остальных мест локализации и источников загрязнения целесообразно проводить по материалам ранних сезонов съемки (зимнего и весеннего).

Особо следует отметить изображения 3-го канала прибора спутника NOAA. На них оптимальным образом выделяются участки на поверхности земли с температурой около 300 °С. Это источники открытого пламени (лесные и степные пожары, извержения вулканов, факелы на нефтегазовых месторождениях).

В большинстве районов интенсивной разведки и эксплуатации месторождений и трасс трубопроводов оперативная оценка экологической ситуации затруднена в силу огромных территорий, подлежащих контролю. В такой ситуации нет альтернативы использованию МКС, а их стоимость, качество и быстрота получения весьма приемлемы.

Из приведенного обзора становятся ясны задачи нефтегазовой промышленности, решаемые с применением аэрокосмических данных:

- тектоническое и нефтегазоперспективное районирование территорий с выделением основных разрывов, блоковой структуры и нефтегазоперспективных участков (космическая съемка низкого и среднего разрешения);

- выявление ловушек газа различных типов (антиклинальных, рифовых, приразломных) с определением первоочередных объектов для постановки сейсморазведочных работ и поискового бурения (космическая съемка среднего и высокого разрешения);

- детальное изучение геодинамики нефтегазоперспективных площадей для наиболее рационального размещения разведочных скважин и выявления участков, где возможны осложнения при бурении (космическая съемка высокого разрешения и аэросъемка);

- формирование информационной системы контроля технического состояния объектов, в том числе магистральных трубопроводов (космическая съемка высокого разрешения, радарная космосъемка и аэросъемка);

- определение точного пространственного месторасположения объектов газовой промышленности, в том числе буровых скважин (космическая съемка высокого разрешения и аэросъемка).

При выборе аэрокосмических материалов для решения конкретных задач газовой промышленности (кроме геометрического или пространственного разрешения) следует учитывать спектральное (глубина цвета, или количество бит на пиксел) и временное (периодичность съемки) разрешение.

Важным параметром является также обзорность космических изображений. Правило обзорности гласит, что снимки должны обеспечивать такой охват земной поверхности, чтобы отображать положение изучаемой площади в общей структуре региона. Это вызывает необходимость при изучении газоносных территорий использовать изображения низкого разрешения и высокой генерализации типа NOAA или MODIS.

С учетом того, что одни и те же геологические объекты по-разному отражают и поглощают электромагнитное излучение разной длины волны, число и конкретные величины диапазонов съемки имеют существенное значение для успешного решения геологических задач. Еще раз отметим, что особо перспективным для поиска новых месторождений является использование гиперспектральной съемки.

В табл. 1.1, 1.2 представлены данные о некоторых используемых в настоящее время космических спутниковых системах

Современные космические спутниковые системы (видимый и инфракрасный диапазоны)

Таблица 1.1

Параметры	Длина волны, МКМ	IKONOS	LANDSAT-7 (ETM+)	РЕСУРС-ДК1	Rapid Eye	ASTER			WorldView-2	Hyperion
		Quickbird Orbview-3				VNIR	SWIR	TIR		
Разрешение, м		0,5-1	15-60	1	5	15	30	90	1,8	30
Полоса съемки,		8-16,5	185	4,7-28,3	77	60	60	60	16,4	77
Видимый и ближний инфракрасный	0,4	1 канал	1 канал		1 канал				1 канал	
	0,5	2 канал	2 канал	1 канал	2 канал	1 канал			2 канал	
	0,6	3 канал	3 канал	2 канал	3 канал	2 канал			4 канал	
	0,7			3 канал	4 канал				6 канал	
	0,8		4 канал						7 канал	
	0,9								8 канал	
Средний инфракрасный	1,5									
	1,6		5 канал				4 канал			220 каналов
	1,7									
	1,8									
	1,9									
	2,0									
	2,1		7 канал				5 канал			
	2,2						6 канал			
	2,3						8 канал			
	2,4						9 канал			
Тепловой инфракрасный	7,0									
	8,0							30 канал		
	9,0							12 канал		
	10,0							13 канал		
	11,0		6 канал					14 канал		
	12,0									

Таблица 1.2

Современные космические спутниковые системы (радиолока		Длина волны, см	ERS	ENVISAT		ALOS PALSAR				RADARSAT-1* RADARSAT-2**							TerraSAR-X				Cosmo-SkyMed 1-4						
Режим			Широта	Wide Swath	Global Monitoring	£ s i m f f e n c o t o	FBD (HH, HV)	ScanSAR (HH)	Поляриметрический (HH, WV)	* * * * * E	** " o 1 a e s e	и с e	Extended	Standart	• s	Extended Low*	ScanSAR Narrow	ScanSAR Wide	High Resolution	SpotLight	StripMap	ScanSAR	I S a. en	Stripmap	Stripmap 2-ая поляризация	ScanSAR	ScanSAR
Разрешение, м		26x30	300	100	7-44	14-88	24-89	10	20	8-12	5	2	2	3	3	50	100	1	2	3	16	<1	3	15	30	100	
Полоса съемки, км		100	100	100	40-70	40-70	20-65	250-350	20	25	50	75	100	150	170	300	500	Юx5	Юx10	30x50	100x150	10	40	30	100	200	
Диапазон	X	2,4																—	•	•	•	II	C	•	—	•	
		3,1																									
		3,6																									
	C	4,1																									
		4,5																									
		5,1	Ш	•	Н	Н					L	•	И	L	•	с	•	~	•								
		6,1																									
		7,1																									
7,7																											

[illegible]

Оптимальные сезоны съемки выбираются в зависимости от принадлежности исследуемых территорий к конкретным природным зонам. В тундровой и лесотундровой зонах определяющим фактором является отсутствие снежного покрова; в лесной зоне наиболее информативна съемка, выполненная весной и осенью, на материалах которой наилучшим образом отражаются различия в древесной растительности, выступающей в качестве одного из ведущих геоиндикаторов. В степных и лесостепных районах, занятых сельскохозяйственными угодьями, наиболее благоприятен весенний период вскоре после распахки полей и до появления густого растительного покрова. В пустынных и полупустынных районах наиболее информативны весенние и осенние снимки, полученные в период вегетации растительности.

Поскольку для нефтегазоносных территорий наиболее типичны равнинные ландшафты, важное значение имеет и время суток, в которое происходит съемка. Наиболее информативны снимки, выполненные в утреннее и вечернее время при низких углах стояния Солнца ($10-20^\circ$), так как при этом повышаются контрасты слабовыраженных элементов рельефа.

Дешифрируются не отдельные снимки, а их виртуальные мозаики, полностью покрывающие территорию исследований. При этом улучшающая обработка изображений проводится «на лету» по мере необходимости. Дешифрируются или трансформированные и географически привязанные мозаики снимков, или изображения с установленной, но отложенной на будущее географической привязкой, чтобы трансформировать лишь результаты дешифрирования, не искажая яркостного поля самих изображений. Широко применяются методы автоматизации тематического дешифрирования в комплексе с технологиями экспертных систем.

ГЛАВА 2 ВЫЯВЛЕНИЕ И ОЦЕНКА РАЗРЫВОВ И ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Как известно, важнейшую роль в формировании рельефа земной поверхности играют геодинамические процессы.

Геодинамические процессы приводят к подвижкам блоков земной коры и возникновению разломов (разрывных нарушений) в фундаменте, вызывая тем самым усложнение структуры осадочного чехла. Это активизирует перенос вещества из нижних горизонтов коры в чехол, способствуя формированию в нем залежей углеводородов.

Большинство исследователей признает, что разрывные нарушения в фундаменте и низах осадочного чехла нефтегазоносных бассейнов проявляют высокую современную тектоническую активность, в связи с чем зоны их геодинамического влияния могут достигать дневной поверхности. На космических снимках результаты действия геодинамических процессов проявляются в виде сети линейных элементов - так называемых *линеаментов*.

Линеаменты и системы их классификации

Термин «линеамент» ввел в литературу в начале XX в. американский геолог и геоморфолог В. Хоббс. Он считал, что основные направления элементов земной поверхности (горные хребты, впадины, очертания материков, береговых линий морей, речных долин и проч.), а также границы геологических тел определены первоначальной сетью, разграничивающей крупные сегменты земной коры, закономерно ориентированные относительно фигуры Земли. Эти прямолинейные формы земной поверхности В. Хоббс назвал линеаменами. Позже было установлено, что развиты две основные различно ориентированные системы линеаментов: ортогональная (север — юг, запад — восток) и диагональная.

Итак, линеаменты - это линейные неоднородности строения земной коры и литосферы различного ранга, протяженности, глубины и возраста, которые проявлены на земной поверхности прямо или опосредованно геологическими или ландшафтными аномалиями.

Лишь небольшая часть линеаментов совпадает с известными, обнаруженными традиционными геологическими методами, разрывами разных рангов. Согласно Макарову (например, [8, 9], а также списку литературы в указанных источниках), большинство линеаментов не выражены разрывами на земной поверхности и представляют собой следы погребенных глубинных разрывов, зон трещиноватости и флексурно-разрывных зон (рис. 2.1).

Из-за многообразия форм линеаментов их геологическую природу устанавливают в процессе интерпретации. Линеаменты

подразделяются:

- на линии длительного развития разрывов, которые определяют направления складок, разрывных нарушений, цепочек вулканов, эпицентров землетрясений и др.;

- молодые глубинные структуры, выраженные на поверхности либо разрывами, либо флексурно-разрывными зонами;

- самостоятельные глубинные структуры, выраженные на поверхности земной коры различными типами направлений и ориентировками геологических и геоморфологических объектов, особенностями строения геофизических полей;

- глубинные неоднородности литосферы, которые отражаются прямолинейными или полого изогнутыми, относительно узкими зонами резкого изменения параметров географической среды, геологической структуры и геофизических полей.

Широта приведенной классификации свидетельствует о сложности природы линеаментов, а также о многообразии способов их выявления.

На поверхности линеаменты могут представлять собой зоны, в которых происходит изменение морфологических особенностей горно-складчатых систем (ширины, гипсометрии — вздымание или опускание), преломление или смещение целых систем покровно-складчатых структур, замыкание или виргация зон прогибаний, поднятий и др.

Нередко линеаменты являются сквозными образованиями, прослеживаясь на территориях с различным геологическим строением и историей геологического развития. Такие глубинные структурные элементы литосферы выражены элементами неотектоники, прежде всего в рельефе, а также в почвенно-растительном покрове, и поэтому видны на космических снимках.

В результате ряда исследований установлено, что линеаменты отражают позднекайнозойскую неотектоническую стадию развития структуры земной коры. Их неотектоническая активность доказывается тесной связью с молодыми деформациями -- складками и блоками основания, которые они ограничивают или осложняют. Молодые складки и линеаменты образуют единый структурно-динамический парагенезис.

Плановое несовпадение крупных линеаментов с известными разломами объясняется тектонической расслоенностью литосферы и автономностью различных по глубине уровней земной коры, а также древним заложением линеаментного каркаса Земли, который омоложен лишь частично. Считается, что **разрывы и зоны**

повышенной трещиноватости отражают лишь частный случай проявления линеаментов.

По протяженности линеаменты подразделяются:

- на трансконтинентальные;
- трансрегиональные (трансорогенные);
- региональные;
- локальные.

Трансконтинентальные и трансрегиональные линеаменты хорошо дешифрируются на космических снимках континентального уровня генерализации. Они разделяют разновозрастные складчатые системы и платформы или рассекают их, т.е. принадлежат территориям с различной историей геологического развития. Такие линеаменты могут быть отчетливо проявлены в рельефе, особенностях геологического строения (литолого-фациальных, структурных) в пределах горно-складчатой области или иметь расплывчатые неясные контуры в платформенной области. Это связано с интенсивностью и контрастностью тектонических движений и характером физико-геологических процессов, сильно различающихся в этих областях.

Региональные и локальные линеаменты имеют меньшую протяженность и глубину залегания, могут отражать планетарную трещиноватость, а также быть результатом релаксации местных, характерных для данной территории, напряжений. Локальные линеаменты отражают ослабленные зоны приповерхностных горизонтов земной коры и разделяют относительно однородно деформированные блоки. Кац и Тевелев показали, что малые линейные элементы ландшафта, выраженные на космических снимках в виде тонкой параллельной штриховки, являются «снимком» структуры поля напряжений.

По соотношению с геологическими структурами линеаменты и линеаментные зоны принято подразделять на граничные и секущие.

Граничными называют линеаменты, которые служат границами тектонических блоков разных рангов. Они, как правило, совпадают на всем своем протяжении с разрывами, установленными геолого-геофизическими методами. Буш предлагает подразделять граничные трансконтинентальные линеаменты на три группы в зависимости от размеров тектонических блоков, границами которых они являются. Так, к линейным структурам первого ранга отнесены системы разрывов, ограничивающие современные литосферные плиты (зоны спрединга, океанические рифтовые системы и современные внутриконтинентальные рифты, зоны субдукции и коллизии на

континентах). Граничными линеаменами и зонами линеаментов второго ранга являются системы разрывов, разделяющие мегаблоки земной коры континентального, океанического и переходного типов, где их границы не совпадают с границами литосферных плит (системы ступенчатых сбросов континентального склона). В третью группу граничных линеаментов отнесены граничные структуры в пределах мегаблоков земной коры континентального (системы разрывов, разделяющие блоки с разным возрастом формирования земной коры или с разным возрастом и характером строения осадочного слоя), переходного (глубинные поддвиги, обусловившие формирование островных дуг, и сбросы, ограничивающие котловины окраинных и внутренних морей) и океанического типов (разломы вулканических и глыбовых океанических хребтов).

Граничные линеаменты меньших рангов также обнаруживают связь с геологическим строением регионов и в подавляющей части относятся к разрывам со значительными амплитудами вертикальных движений. Глубина и возраст их заложения различны, но при сопоставлении всех геолого-геофизических данных обнаруживается их прямая или косвенная связь с новейшими тектоническими движениями.

Секущие линеаменты выявляются на космических снимках в виде полосовых и линейных аномалий, пересекающих однородные фотополя, имеющих примерно одинаковую плотность по всей территории и регулярность простираций, которые согласуются с системой планетарных трещин. Наиболее протяженные из них являются сквозными зонами трансконтинентального ранга, среди которых Буш предложил выделять трансплитные и глобальные, пересекающие не менее двух литосферных плит, трансконтинентальные, выходящие за пределы мегаблоков земной коры, и трансрегиональные, секущие не менее двух блоков континентальной коры разного возраста или строения.

Секущие линеаменты относительно оси вращения Земли образуют упорядоченную сеть планетарной трещиноватости. Ее образование связано с ротационными силами планеты. Этот устойчивый тектонический каркас, созданный секущими линеаменами, по мнению В.Е. Хаина, возник не позднее раннего протерозоя. В различные этапы геологической истории эта сеть использовалась на отдельных отрезках геологическими структурами и геоблоками литосферы, формирование которых происходило в различных структурно-динамических условиях от протерозоя до современной эпохи. Поэтому секущие линеаменты и линеаментные зоны на своем протяжении могут соответствовать структурам растяжения (сбросы, раздвиги) и сжатия (надвиги, покровы, сдвиги). Для секущих линеаментов одного и того же ранга характерна эквиди-

стантность — среднее расстояние между ними есть величина квазипостоянная. Обычно секущие линеаменты слабо проявлены в рельефе и геологическом строении приповерхностных толщ и представляют собой погребенные разломы, зоны трещиноватости, флексурно-разрывные зоны.

Выражение линеаментов на аэро- и космических снимках

На аэро- и космоснимках линеаменты представляют собой протяженные темные или светлые полосы - фотоаномалии, а также являются границами участков с различной плотностью фототона и рисунками изображения (рис. 2.2).

Четкость их проявления и надежность дешифрирования на снимках различного разрешения и спектральных диапазонов неодинаковы. Так, встречаются линеаменты, хорошо видимые на космических снимках низкого разрешения и превращающиеся в нечеткие расплывчатые зоны или вовсе становящиеся невидимыми на снимках высокого разрешения. Нередко линеаменты обнаруживаются только на снимках определенных спектральных диапазонов.

Ширина линеаментов изменяется от первых километров до нескольких десятков километров, поэтому при наземных исследованиях они, как правило, не выявляются.



Рис. 2.2. Фрагмент космического снимка MOD1S. Калифорния, разлом Сан-Андреас. Линейный элемент - красная пунктирная линия

Геологи давно обратили внимание на строгую упорядоченность и эквидистантность линеаментов. Кац с коллегами предложили объединить линеаментные сообщества в зоны, системы и поля. Зоны — это узкие, протяженные концентрации линеаментов, системы - закономерные сочетания разноориентированных линеаментных зон, а поля — закономерные сочетания различно ориентированных линеаментных систем региона, различающиеся степенью плотности, упорядоченности, доминирующими простираниями линеаментов, морфологией линеаментных зон и т.д. По мнению Каца, линеаменты и их сообщества могут характеризовать дискретность земной коры. Разнообразные сочетания линеаментов и их систем, создающие линеаментный рисунок на космических снимках, дают представление об основных направлениях и шаге дискретности, а поле линеаментов характеризует степень дискретности и форму делимости глубинных уровней земной коры.

К универсальной особенности линеаментов относится их объединение в некоторые системы, которым подчинены повторяющиеся рисунки в рельефе и структуре земной коры. Они представлены границами крупных элементов рельефа, полосами однообразно ориентированной трещиноватости горных пород и новейших деформаций рельефа, линейно вытянутыми зонами перепада высот водоразделов, уступов на склонах, межгрядовых понижений, зонами прямолинейных участков озер, долин, ледниковых трогов, линиями дренажа подземных и поверхностных вод, геологически обусловленными линейными зонами почв, растительности и др. (рис. 2.3).

Чем выше уровень генерализации и ниже разрешающая способность космических снимков, тем более глубинные структуры на них выявляются. Это объясняется следующим: чем больше глубина залегания деформации, тем более широко и в более рассеянном виде она проявлена на поверхности. Поэтому требуются большая обзорность, генерализация и соответствующее разрешение для выявления этой деформации.

Как было показано выше, изображения линеаментов на космических снимках чаще всего обусловлены структурами глубокого заложения. Верхнекоровые, приповерхностные линеаменты, представляющие собой, как правило, разрывные нарушения, зоны трещиноватости или зоны повышенного дробления пород, обладающие пониженной прочностью, четко отражаются в рельефе и в других элементах новейшей структуры и поэтому отчетливо (прямо или косвенно) дешифрируются на космических снимках. Те из них, которые выведены на современный денудационный срез, обычно представляют

собой дизъюнктивные деформации древнего заложения или новообразованные и омоложенные древние разрывные нарушения. Система этих линеаментов создает особенности планового рисунка гидрографической сети и строения долин, склонов и других форм рельефа



Рис. 2.3. Выражение линеамента на земной поверхности в виде прямолинейного водного участка (красные стрелки)

Физико-химические преобразования вещества, происходящие на разных глубинных уровнях литосферы, сопровождаются выделением флюидов и тепла, поступающих к земной поверхности. Состав и плотность этого потока неодинаковы во времени и пространстве. Они отражают как структуру слоев, в которой зародились, так и особенности состава, структуры и проницаемости слоев, через которые проходят. Эти тепловые и флюидно-газовые потоки влияют на особенности почвенно-растительного покрова и другие характеристики поверхности и проявляются на космических снимках в виде линеаментов, кольцевых структур и других образований.

Линеамент может прямо соответствовать разлому, при этом положение плоскости сместителя дизъюнктива отражается в особенностях полосовой аномалии на снимке.

В ряде случаев разрывы на снимках проявляются по прямым признакам, например, когда они пересекают слоистую толщу со смещением. В хорошо обнаженных районах, особенно если они сложены слоистыми породами с четко выраженными пластовыми фигурами, возможно определение направления наклона поверхности сместителя разрыва. В геологически закрытых районах (например, в Западной Сибири) разрывные нарушения также удастся выявить по космическим изображениям (рис. 2.4).

Взбросы, у которых поверхность сместителя наклонена в сторону

поднятых пород, имеют слабо дугообразную форму в плане, выпуклостью направленную в сторону перекрываемых, более молодых отложений.

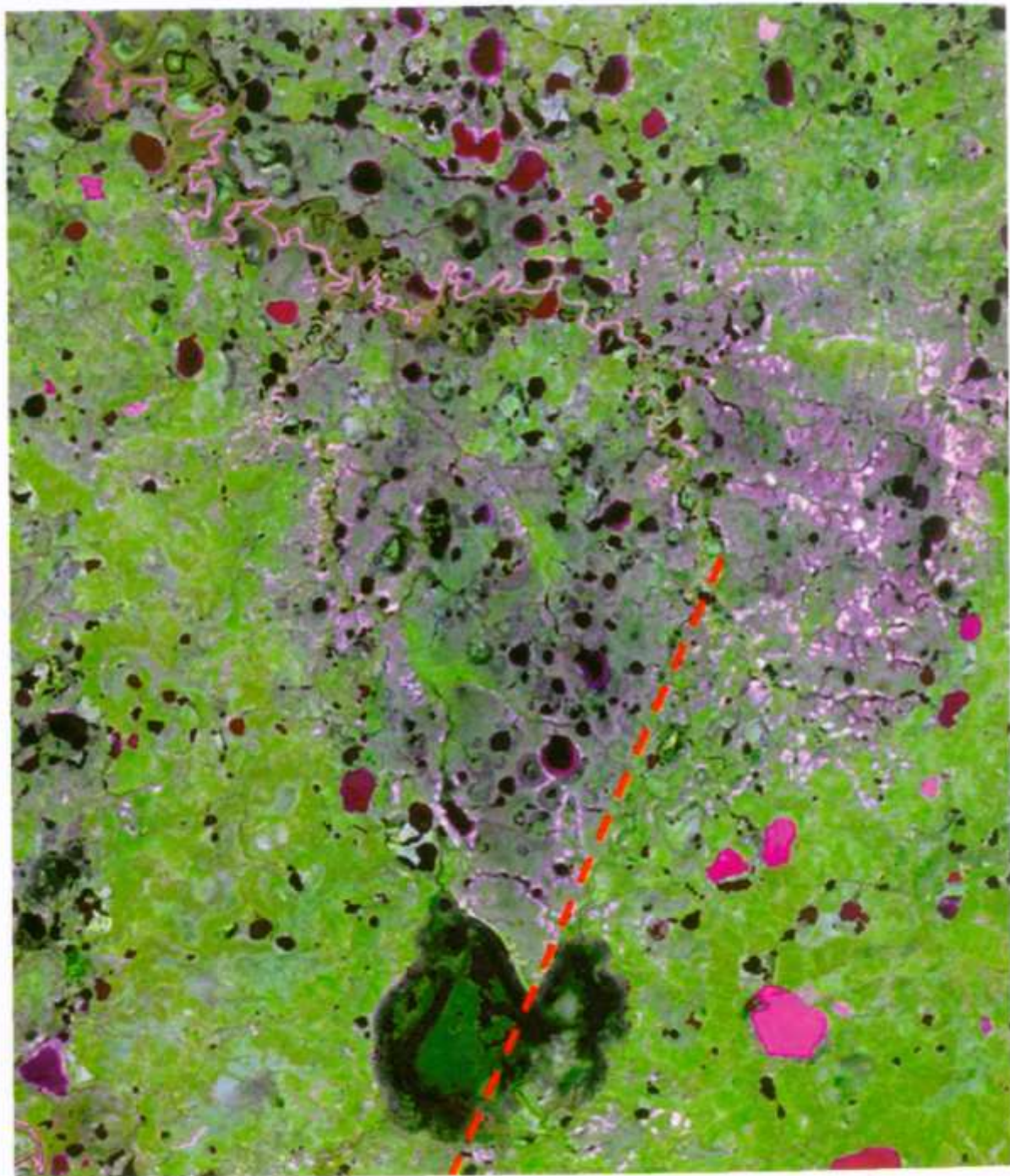


Рис. 2.4. Молодое разрывное нарушение (красная пунктирная линия).

Сдвиги отличаются прямолинейностью. Они дешифрируются по однонаправленным смещениям и искривлениям русел, склонов долин, конусов выноса, гребней водоразделов и других форм рельефа; по дискретному расположению кулисно построенных разрывов, эшелонированным гирляндам складок или их торцовому

сочленению с линией разрыва; по наличию ромбовидных впадин присдвигового растяжения. В зонах сдвиговых дислокаций линейные элементы рельефа образуют Z- и S-образный рисунок, позволяя выявить соответственно право- и левосторонние перемещения.

Со сдвиговыми зонами связаны как структуры растяжения, так и сжатия. Сочетание двух кулисообразно расположенных левых или правых сдвигов, сомкнутых между собой системой субпараллельных дочерних оперяющих разрывов, образует сдвиговый дуплекс. Зоны горизонтального сдвига на участках, где происходит компенсация сдвиговых смещений сжатием, имеют характерные рисунки «эшелон» и «ромб», а на участках растяжения возникают рисунки «конский хвост» и «елочка».

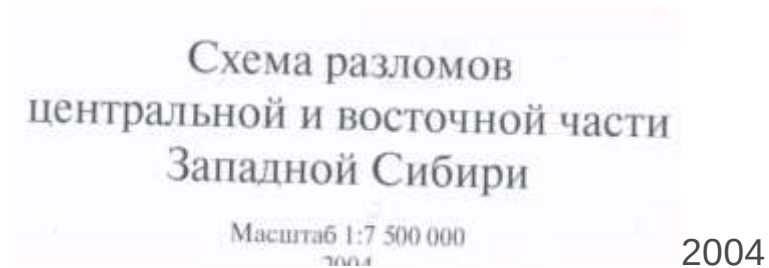
Надвиги (соскладчатые разрывы) образуются при общем продольном сжатии параллельно с образованием складок. Горизонтальный, пологий или волнистый надвиг с амплитудой перемещения до десятков и даже сотен километров - тектонический покров, или шарьяж — на снимках отличается сложным фестончатым рисунком перемешанных масс (аллохтона), которые в процессе движения распадаются на отдельные пластины, а складчатое строение их сильно усложняется. Во фронтальной части покрова могут присутствовать экзотические останцы (клиппы), отделенные эрозией от аллохтона, а также тектонические окна в аллохтоне, где экзогенными процессами удалены породы его верхних частей. Шарьяжи широко распространены в подвижных складчатых системах (Карпаты, Кавказ, Урал, Камчатка).

Зоны разрывов, дробления и меланжа, глубинные разрывы, выведенные на современный денудационный срез, представляют собой сложные системы примерно однонаправленных одиночных разломов, выраженность которых в пределах зоны может меняться по простиранию.

Морфология, структурный рисунок разрывов на материалах дистанционных съемок помогают определить кинематику и геодинамические условия их формирования. Но уверенные суждения о кинематике разрывов возможны только на основании анализа комплекса данных.

Определение относительного возраста разрывов, которое устанавливается по смещению разрывов одной системы разрывами другого направления, равно как и амплитуды смещения, только по снимкам часто приводит к серьезным ошибкам. Такие определения могут выполняться лишь при комплексном геолого-геофизическом анализе результатов дешифрирования. При этом необходимо учитывать, что движения по разрывам древнего заложения могли

изменяться в разные эпохи активизации в связи с менявшимися полями тектонических напряжений. По нарушению форм рельефа и четвертичных отложений дешифрируются активные разрывы. Такой комплексный подход позволяет с высокой точностью определять активные неотектонические системы разрывных нарушений (рис. 2.5).



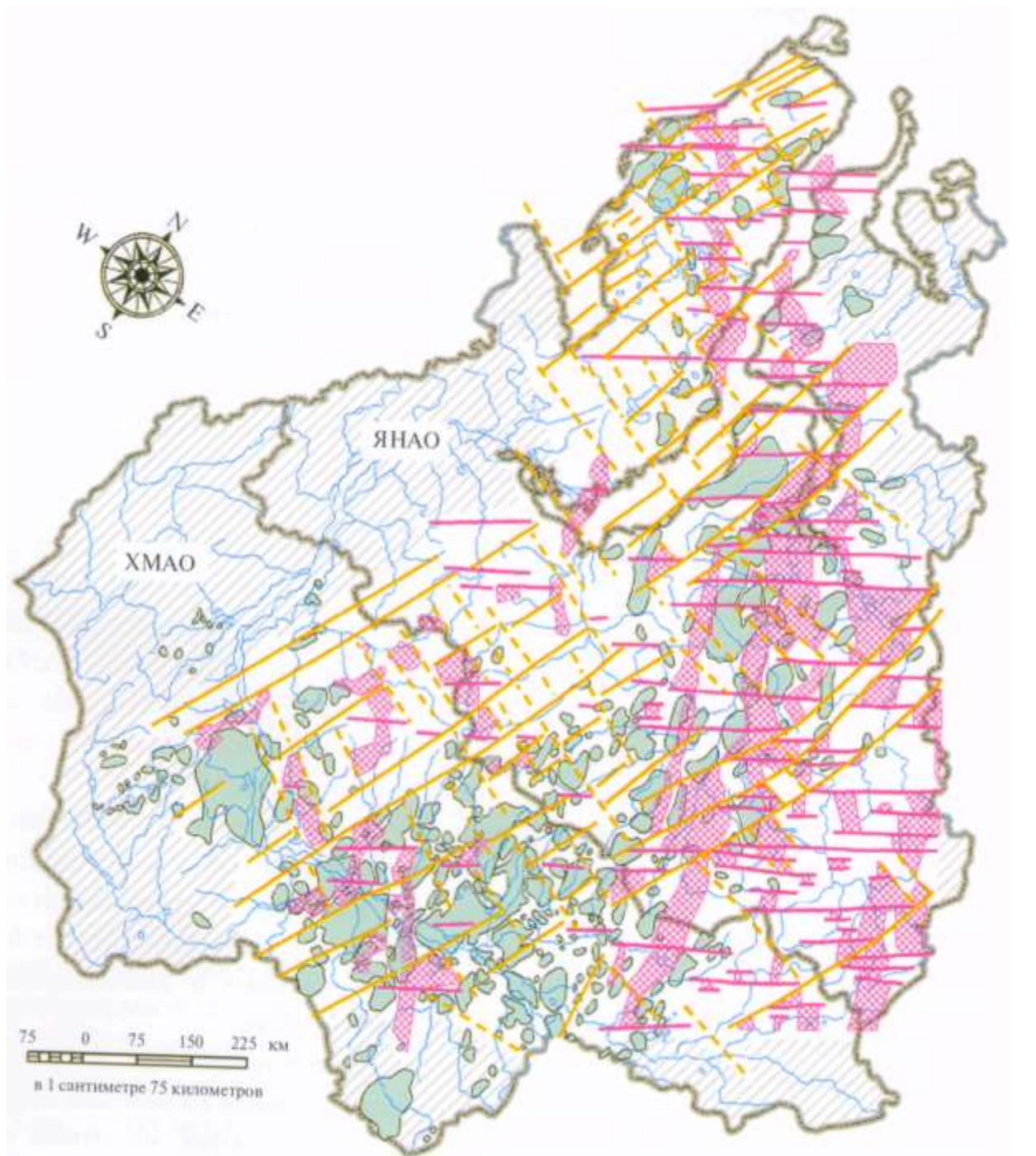


Рис. 2.5. Схема разломов центральной и восточной части Западной Сибири

В случаях когда перемещения пород по разрывам отсутствуют или очень незначительны, на космическом снимке появляются

трещины (рис. 2.6).



Зоны геодинамического влияния разрывов

Под зоной геодинамического влияния разрыва понимаются локальные сгущения конформных, ортогональных и диагональных трещин различного генезиса и элементов относительно зоны сместителя разрыва.

Многие исследователи отмечают, что приразрывная область всегда подразумевалась в геологии. После работ Гзовского ее отождествляли с зоной высокой концентрации напряжений, окружающей приразрывное пространство, а в 1982 г. Шерманом и др. было предложено выделять области динамического влияния разрывов как часть окружающего разрыв пространства, в котором проявляются остаточные (пластические или разрывные) и упругие следы деформаций, вызванные формированием разрыва и подвижками по нему. Однако оценить пространственные размеры приразломной области не представлялось возможным.

На рис. 2.7 приведен аэрофотоснимок с отдешифрированными линейными элементами, соответствующими известным разрывам земной коры. В частности, в качестве эталонных сдвигов

проанализировано несколько разномасштабных объектов. По дистанционным изображениям (помимо зоны сместителя) дешифрируется множество конформных, ортогональных и диагональных структурных линий, составляющих приразрывную область.

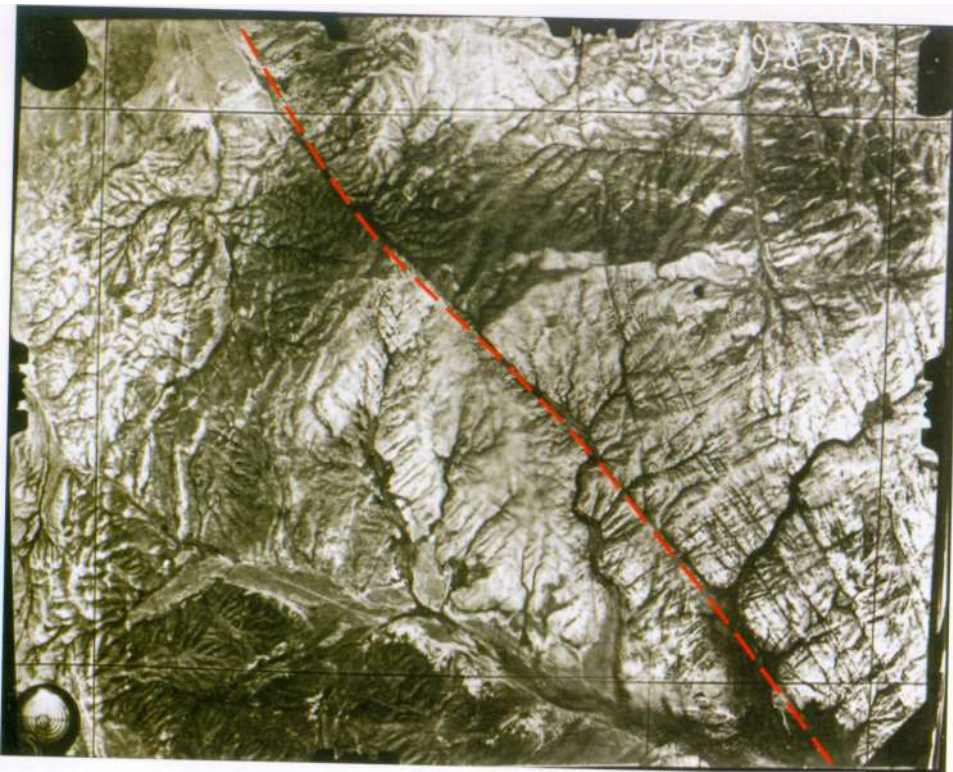


Рис. 2.7. Аэрофотоснимок гранитного массива, смещенного левым сдвигом (красный линейный элемент на изображении)

Сдвиговые разрывные нарушения в геологическом понимании этого термина являются наиболее распространенными структурными элементами нарушения сплошности залегания земной коры. Всевозможные масштабы их проявления - от мелких сдвиговых дислокаций (трещин) до крупных сложно-построенных сдвиговых разломных зон, протягивающихся на сотни и тысячи километров. В связи со сложной геологической историей формирования сдвигов внутреннее строение областей их геодинамического влияния характеризуется неоднородностью и присутствием комплекса мелких разрывных нарушений различной направленности.

Согласно результатам экспериментального моделирования для сдвигов необходимо в первую очередь анализировать поля плотностей линейных элементов аэрокосмических изображений, конформных и ортогональных сместителю. Проведенное тематическое

автоматизированное дешифрирование материалов зондирования и полученные в итоге результаты позволили не только подтвердить кинематику анализируемых разрывных нарушений, но и определить зоны геодинамического влияния разрывов (рис. 2.8).

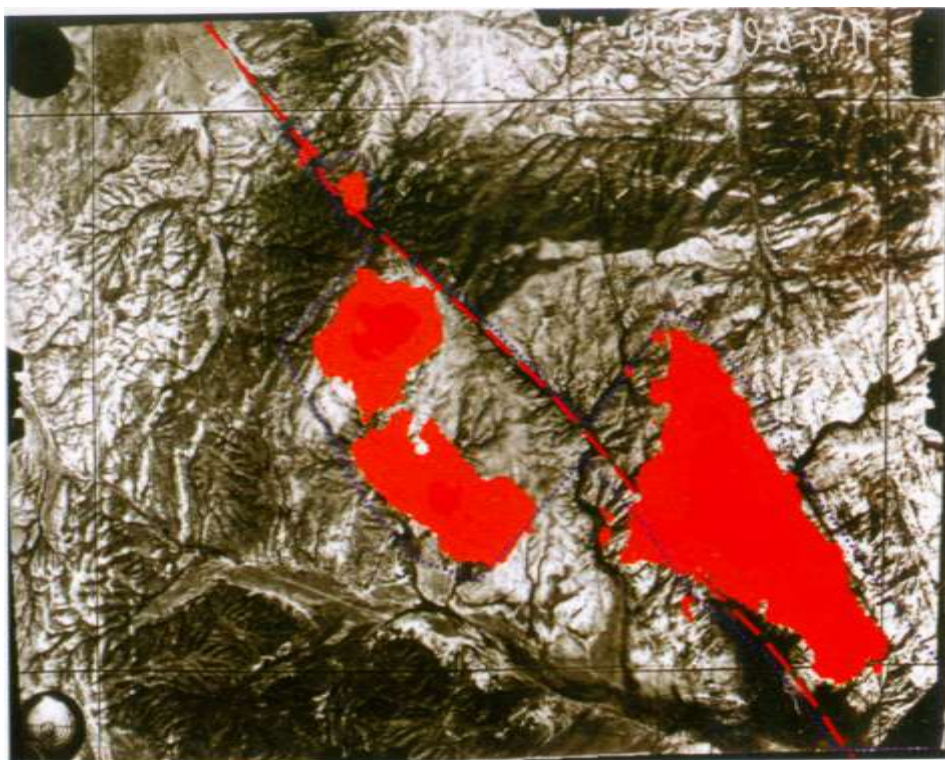


Рис. 2.8. Аэрофотоснимок с наложенными зонами геодинамического влияния разрыва, образованными сдвигом (красным цветом показано разрывное нарушение, синим пунктиром выделена область геодинамического влияния сдвига)

При этом обращает на себя внимание тот факт, что, как правило, горизонтальные смещения блоков по анализируемым разрывам в целом сопоставимы по своей амплитуде с шириной областей геодинамического влияния. С учетом естественной неоднородности и многофакторной зависимости реальных геологических объектов по сравнению с идеальными моделями отметим, что получаемая по результатам обработки аэрокосмических данных картина способна передавать главным образом общие закономерности строения, осложненные шумовым эффектом от различных неотектонических, геоморфологических и антропогенных деталей ландшафта.

Выделение зон геодинамического влияния неотектонически активных разрывов позволяет существенно уточнить генетические и тектонические предпосылки локализации месторождений углеводородов, а также спрогнозировать наиболее геодинамически опасные области. Выявленные зоны геодинамического влияния

разрывов интерпретируются как зоны повышенной проницаемости земной коры, т.е. как зоны разуплотнения, в пределах которых при отработке залежей следует ожидать повышенные притоки углеводородов. Морфологический анализ зон геодинамического влияния позволяет определять кинематику разрывных нарушений и оценивать направление современных смещений блоков земной коры.

Анализ информации о размерах зон геодинамического влияния и кинематике разрывных нарушений позволяет учитывать эти опасные в инженерно-геологическом плане участки при проектировании, строительстве и мониторинге как месторождений и подземных хранилищ газа, так и линейных объектов трубопроводного транспорта [9, 10].

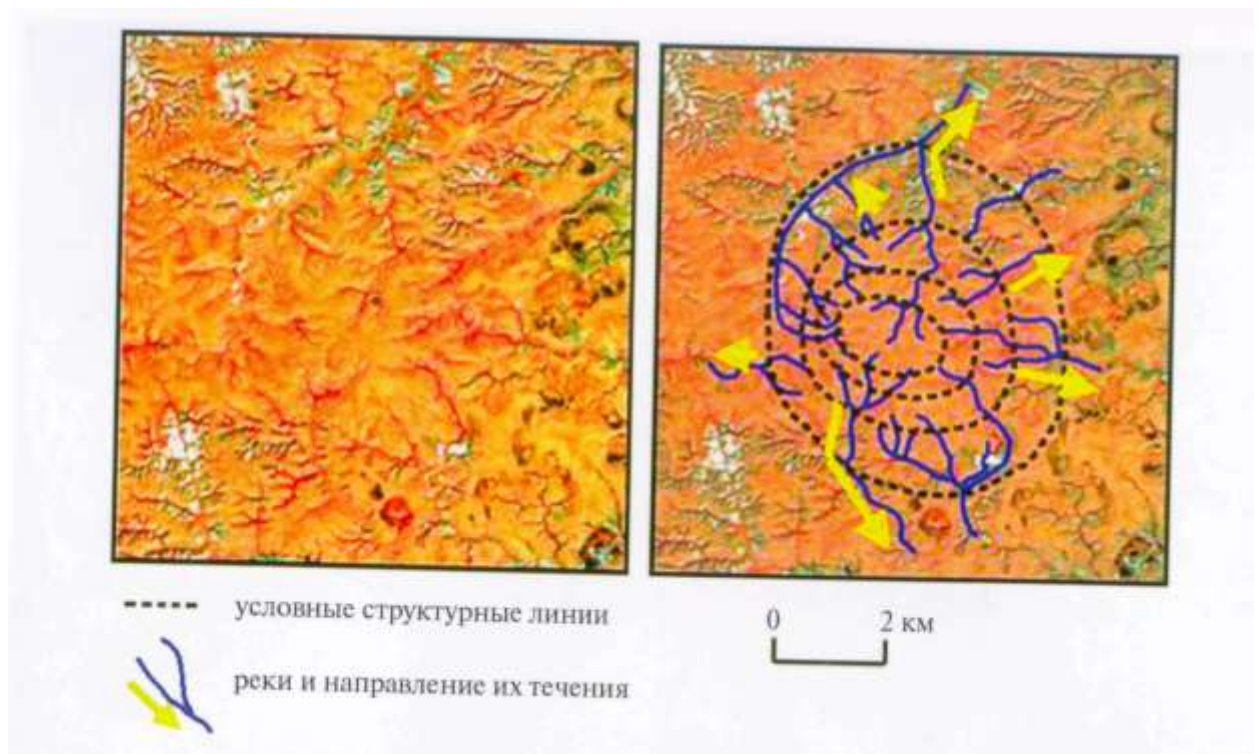
Неотектонические поднятия и опускания

На космических снимках глубинные элементы горно-складчатых областей и платформ с мощным осадочным чехлом дешифрируются при активности новейших тектонических движений. В верхних комплексах могут развиваться как унаследованные складчатые и разрывные структуры, так и новообразования в виде секущих и наложенных элементов; возникают также аномалии в орографии горных областей, так как почти всегда границы новейших поднятий и впадин так или иначе связаны с глубинным строением земной коры.

На снимках континентального уровня генерализации в пределах плит по фототону выделяются площадные элементы, соответствующие погружающимся и воздымающимся неотектоническим блокам, которые обычно наследуют структуру фундамента. Линейные объекты отвечают разрывам, смещающим кровлю или весь платформенный чехол. При малой мощности последнего (до 300—500 м) сквозь чехол могут просвечивать нарушения фундамента, часто не устанавливающиеся на земной поверхности геологическими и геофизическими методами.

Кольцевые структуры чаще всего соответствуют крупным сводовым поднятиям фундамента (рис. 2.9). В некоторых областях дешифрируются незамкнутые в кольцо дуговые элементы, к которым приурочены аллювиальные образования и долины крупных рек. На космических снимках регионального и локального уровней генерализации (среднее и высокое разрешение) площадные объекты, выявляемые по фототону и строению рельефа, соответствуют развитым на земной поверхности отложениям различного литологического состава. Отчетливее других выделяются новейшие рыхлые образования. Линейные объекты дешифрируются по уступам в рельефе, прямолинейным отрезкам

речных долин, бровкам террас, водоразделов, цепочкам локальных понижений, соответствующим разрывам и флексурам в осадочном чехле или поверхности фундамента.



Среди кольцевых структур наиболее четко дешифрируются структуры размером в поперечнике в десятки километров, отражающие своды в фундаменте или в структурных этажах чехла. Кольцевые структуры меньшего размера совпадают с локальными структурами чехла — отдельными складками, поднятиями, соляными куполами, мульдами и т.д.

ГЛАВА 3. КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

К важным особенностям геологического строения месторождений углеводородов относятся сопровождающие их разработку современные движения горных пород, вызванные различными природными и техногенными причинами.

Современные движения горных пород представляют потенциальную опасность при разработке и эксплуатации месторождений углеводородов: они могут стать причиной ухудшения фильтрационно-емкостных свойств пласта-коллектора (схлопывание пор или трещин) или, например, ускоренного продвижения подошвенных вод в продуктивную залежь по геодинамически активным линейным зонам. Кроме того, смещения земной поверхности опасны для наземной инфраструктуры месторождений УВ, поскольку вызывают деформации зданий и сооружений, что может стать причиной аварийных ситуаций.

В настоящее время разработана технология, позволяющая усовершенствовать существующие системы наблюдений за смещениями земной поверхности на месторождениях нефти и газа за счет внедрения новых методов: регулярного космического радиолокационного мониторинга и спутниковой геодезии (ГЛОНАСС/GPS). Внедрение этих новых методов позволяет оптимизировать объем и временную частоту традиционных (инструментальных) геодезических методов наблюдений за смещениями, получить принципиально новую информацию о смещениях, в целом повысить информативность и точность маркшейдерско-геодезического мониторинга территорий месторождений УВ. Опытными объектами для совершенствования системы наблюдений за смещениями земной поверхности стали месторождения Большого Уренгоя.

Метод космической радиолокационной интерферометрии

Радиолокационная съемка выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C-, L- и P-диапазоны (табл. 3.1) [11 — 13] (см. табл. 1.2, глава 1).

Таблица 3.1

Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра

Диап	Частота	Длина	Спутниковые системы
X	5,20-	2,75-	USGS SLAR, TerraSAR-X,
C	3,9-6,2	3,8-7,6	ERS-1,2; ENVISAT-ASAR;
L	0,39-	19,3-	Алмаз-1А, S1R-A,B, ALOS
P	0,225-	40,0-	AIRSAR

Съемка в каждом из вышеперечисленных диапазонов имеет свои достоинства и недостатки. Для задач дифференциальной интерферометрии подходят X- и C-диапазоны, поскольку длины волн в пределах этих диапазонов позволяют отслеживать смещения до нескольких миллиметров. С другой стороны, по мнению ряда авторов, радиолокационная съемка в L-диапазоне в определенной степени решает проблему временной декорреляции, вызванной влиянием растительности. Радиолокационная съемка в P-диапазоне, по некоторым экспертным оценкам, позволяет «просвечивать» зондируемую поверхность на глубину до нескольких десятков метров.

Входными данными для обработки в специализированных программных комплексах являются два радиолокационных снимка — интерферометрическая пара (или цепочка). Ограничениями для возможности интерферометрической обработки пары радарных снимков являются пространственная и временная базы.

Пространственная база (или базовая линия) представляет собой расстояние между орбитальными положениями радиолокатора при съемке изображений, составляющих интерферометрическую пару (рис. 3.1). Качество результатов интерферометрической обработки напрямую зависит от величины перпендикулярной составляющей базовой линии. Так, например, качество получаемой интерферометрическим методом цифровой модели рельефа (ЦМР) возрастает с увеличением (до некоторого предела) длины перпендикулярной базовой линии. Для задачи же выявления смещений земной поверхности лучше брать минимальные базовые линии. Идеальным же случаем для мониторинга смещений является случай перпендикулярной базовой линии, равной нулю, поскольку в этом случае компонента рельефа в фазовой интерференционной картине полностью отсутствует. Случаи нулевой базовой линии довольно редки.

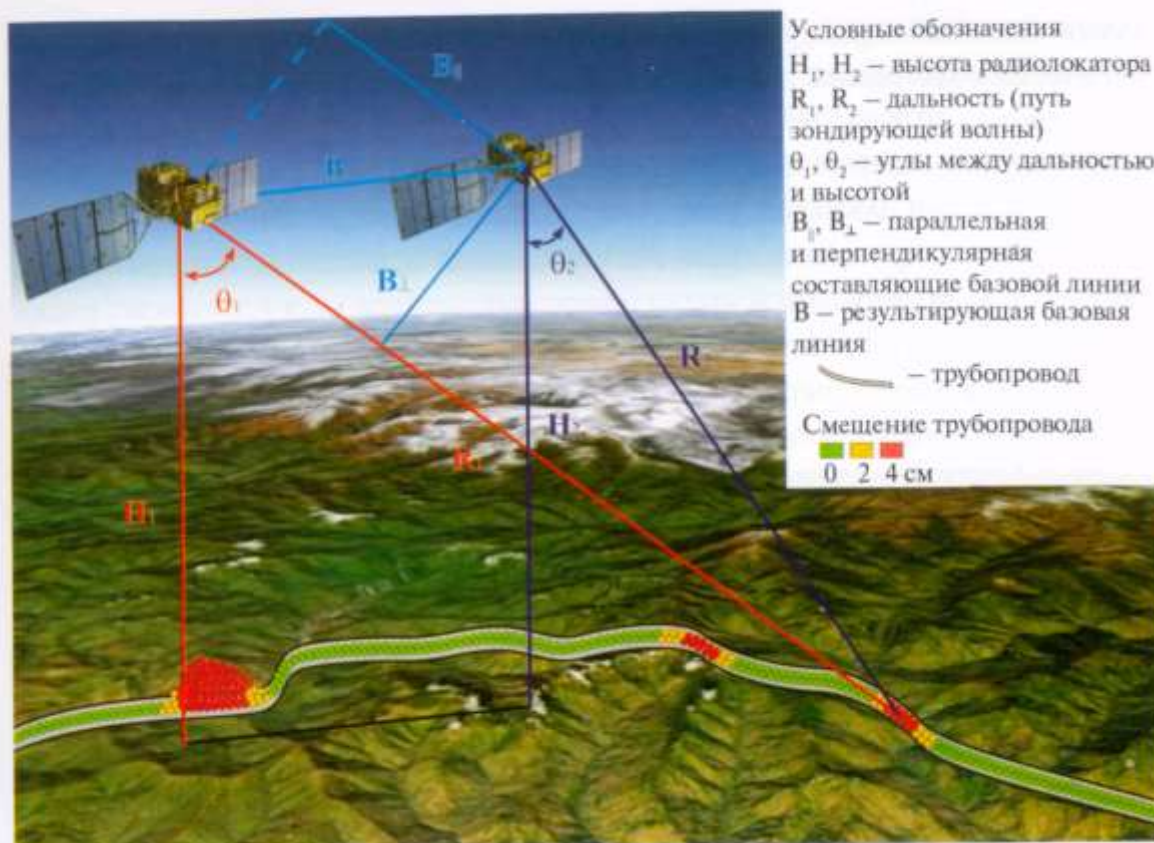


Рис. 3.1. Схема съемки интерферометрической пары радиолокационных изображений

Рис. 3.1. Схема съемки интерферометрической пары радиолокационных изображений

Для С-диапазона радиоволновой области в пределах достаточно малых базовых линий (до 100 м) наиболее выражена деформационная составляющая фазы, в то время как базы 100—300 м более пригодны для извлечения из фазы информации о рельефе.

В случае L-диапазона ситуация несколько иная, диапазон приемлемых для интерферометрической обработки базовых линий на порядок шире. Поясним вышесказанное следующей формулой для вычисления критического значения перпендикулярной пространственной базы:

$$(3.1) \quad B_{\perp cr} = \frac{\lambda}{2R \sin \theta}$$

где $B_{\perp cr}$ — критическая базовая линия, λ — длина зондирующей волны радиолокатора, $R \sin \theta$ — пространственное разрешение в направлении наклонной дальности. Остальные параметры соответствуют обозначениям к рис. 3.1. Исходя из этой формулы, критическая перпендикулярная базовая линия для радарных

спутников С-диапазона (спутники ERS-1, -2, ENVISAT, RADARSAT-1, -2) составляет около 1 км, а в случае L-диапазона (спутник ALOS) ее значение увеличивается и составляет в различных случаях от 3 до 20 км. Это связано с тем, что бортовой радиолокатор L-диапазона на спутнике ALOS характеризуется большей длиной зондирующей волны, более высоким пространственным разрешением в направлении наклонной дальности, большими значениями углов между дальностью и высотой и, наконец, большим значением пути зондирующей волны. Соответственно, для спутника ALOS каждый из аргументов в приведенной выше формуле влияет на величину критической перпендикулярной базовой линии в сторону ее увеличения. Именно в связи с этим диапазон приемлемых базовых линий в случае анализа данных ALOS PALSAR значительно расширяется.

Временной базой называют промежуток времени, прошедший между съемкой изображений, составляющих интерферометрическую пару. Понятие временной базы напрямую связано с такой важной проблемой, как временная декорреляция, возникающая за счет изменений рельефа, растительности, влажности и т.д., произошедших за период между съемками. Проблема временной декорреляции может быть решена увеличением длины зондирующей волны (что повышает «просвечивающую» способность радиоволн) либо сокращением временной базы (т.е. промежутка между съемками). Перспективным направлением в плане понижения до некоторой степени отрицательного влияния временной декорреляции представляется выполнение радиолокационной съемки в полной поляризационной матрице. Такая возможность реализована практически на всех современных радиолокационных спутниках.

Каждый радиолокационный снимок интерферометрической пары содержит в себе амплитудный и фазовый слои. Амплитудный слой более пригоден для визуального анализа. Результирующая фаза Φ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев снимков интерферометрической пары, в общем случае состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{dcf}} + \Phi_{\text{a1t}} + \Phi_{\text{n}}, \quad (3.2)$$

где Φ_{topo} — фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами, Φ_{dcf} — фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками, Φ_{a1t} — фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала, Φ_{n} — вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Непосредственно интерферометрическая обработка пары

снимков в общем случае состоит из нескольких базовых шагов:

- совмещение основного и вспомогательного радиолокационных изображений интерферометрической пары (в автоматическом режиме либо с ручным вводом контрольных точек);

- генерация интерферограммы, являющейся результатом комплексного поэлементного перемножения основного изображения и вспомогательного изображения, геометрически совмещенного с основным;

- разделение компонентов фазы $\Phi_{\text{юро}}$ и $\Phi^{\wedge}$ за счет синтеза фазы рельефа с помощью имеющейся LIMP либо модели эллипсоида, либо путем задания средней по площади снимка высотной отметки (для равнинных областей);

- фильтрация интерферограммы, позволяющая в определенной степени уменьшить фазовый шум (помехи) за счет закругления выходной цифровой модели рельефа (ЦМР) или карты смещений земной поверхности;

- получение файла когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару, в значениях от 0 до 1 для каждой пары соответствующих друг другу пикселей;

- развертка фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным);

- коррекция значения базовой линии по наземным контрольным точкам;

- преобразование абсолютных значений фазы:

- а) в относительные либо абсолютные высотные отметки (в метрах) с получением на выходе ЦМР;

- б) в значения деформаций отснятой поверхности, произошедших за период между съемкой двух изображений, составляющих интерферометрическую пару, либо нескольких изображений, составляющих интерферометрическую цепочку, с получением на выходе карты смещений земной поверхности.

На практике существует несколько вариаций интерферометрической обработки цепочек радиолокационных космоснимков. Отметим некоторые из них, наиболее, на взгляд авторов, подходящие для отслеживания смещений земной поверхности, а также выявления причин деформаций зданий и сооружений:

- *двухпроходная дифференциальная интерферометрическая обработка*. Заключается в получении цифровой карты смещений

земной поверхности за период между съемками интерферометрической пары. Обработка ведется с использованием внешней - уже имеющейся — опорной ЦМР. Точность такого метода возрастает с точностью используемой цифровой модели рельефа;

- *трехпроходная дифференциальная интерферометрическая обработка.* Заключается в получении ЦМР по первым двум проходам и последующем отслеживании смещений по первому и третьему проходам с использованием полученной ЦМР в качестве опорной. Два первых прохода должны характеризоваться базовой линией, приемлемой для получения ЦМР, и небольшим временным промежутком между ними, а первый и третий проходы – базовой линией, приемлемой для получения поля смещений земной поверхности, и временным промежутком между ними, за который могли произойти смещения;

- *четырёхпроходная дифференциальная интерферометрическая обработка.* Существует в двух вариантах. Первый: получение топографических компонентов фаз по двум тандемным парам, каждая из которых характеризуется малой временной базой (например, одни сутки), а между этими двумя парами — временной промежуток, достаточный для обнаружения ожидаемых смещений земной поверхности. При таком варианте две топографические фазы тандемных пар вычитаются друг из друга, результирующая карта смещений переводится из фазовых значений в метрические. Второй: по одной паре снимков интерферометрическим методом получается ЦМР, а по второй паре рассчитываются смещения земной поверхности, причем обработка идет с использованием интерферометрической ЦМР, полученной по первой паре, в качестве опорной. Фактически, этот второй вариант четырехпроходной дифференциальной интерферометрической обработки представляет собой частный случай двухпроходной дифференциальной интерферометрической цепочки, когда в качестве опорной ЦМР используется ЦМР, полученная интерферометрическим методом по другой паре радарных снимков;

- *многопроходная интерферометрия постоянных рассеивателей.* Основана на одновременной обработке большого количества проходов (20-30 и более). В результате обработки на площади кадра определяется некоторое число постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала. Ими могут быть как природные (участки ярко выраженного рельефа), так и техногенные (здания, сооружения, элементы транспортной инфраструктуры) объекты. При соблюдении условия о наличии, как минимум, 50 рассеивателей на участок снимка площадью 100x100

пикселей на выходе получается карта смещений с миллиметровой точностью. Эта технология обработки серии радиолокационных космоснимков является наиболее высокоточной и детальной на сегодняшний день; - *поляризационная интерферометрия*. Мониторинг в таком режиме может осуществляться по любой из четырех вышеперечисленных технологий, но с одной важной особенностью — мониторинг выполняется по данным радиолокационной съемки с полной поляризационной матрицей. Соответственно, в процесс обработки вводится несколько процедур, позволяющих получить оптимизированную интерферограмму и оптимизированную карту когерентности за счет обработки данных с полной поляризационной матрицей. Технология крайне интересна для областей, характеризующихся низкой средней когерентностью и качеством интерферограммы ниже среднего, поскольку ее применение позволяет улучшить качество этих важнейших промежуточных продуктов интерферометрической цепочки;

- *интерферометрия широкополосного режима*. Позволяет выполнять мониторинг региональных смещений земной поверхности по специальной технологии для снимков широкополосного режима (одновременный охват весьма большой территории, например все Надым-Пур-Тазовское междуречье или весь полуостров Ямал).

Независимо от использования той или иной разновидности интерферометрической обработки цепочек радиолокационных космоснимков для получения конечного результата (ЦМР или цифрового поля смещений земной поверхности) желательным является минимальное наземное обеспечение, включающее установку на местности искусственных рассеивателей радиосигнала и выполнение геодезических измерений координат и высотных отметок для серии корректурных точек.

На практике интерферометрическая обработка цифровых радиолокационных космоснимков осуществляется в специализированных программных комплексах. Далее приведены примеры результатов подобной обработки в программных комплексах SARscape (Швейцария) и PHOTOMOD Radar (Россия).

Мониторинг смещений земной поверхности на примере Уренгойской площади

В 2007-2008 гг. была выполнена целевая многопроходная космосъемка Уренгойского НГКМ со спутника RADARSAT-1 (Канада). Схема покрытия этой съемки приведена на рис. 3.2.

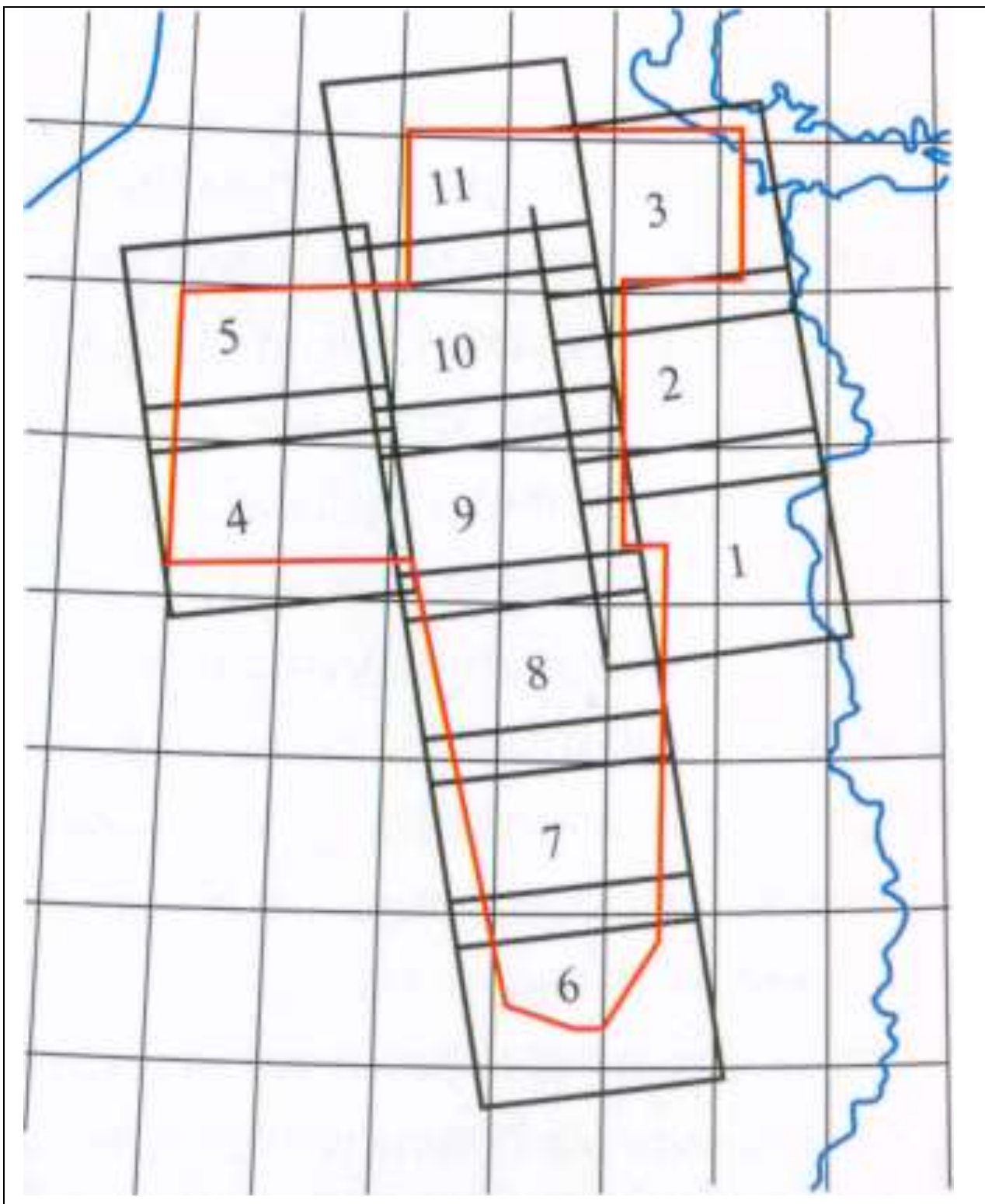


Рис 3.2 Схема покрытия Уренгойского НГКМ радарными снимками RADARSAT

Рассмотрим подробнее интерферометрическую обработку кадров № 6, 7 и 8. Кадр № 6 — южный в центральном витке — покрывает часть Уренгойской площади У НГКМ к югу от г. Новый Уренгой, соответствующую зоне дренирования У КПГ-1 АС сеноманской залежи. На этот кадр отснято восемь сцен за

следующие даты: 20.06.2007, 14.07.2007, 07.08.2007, 31.08.2007, 08.07.2008, 25.08.2008, 12.10.2008 и 05.11.2008. Было построено 16 возможных интерферограмм по парам снимков с интервалом в один год. Из них наименьшей зашумленностью и приемлемым значением пространственной базовой линии характеризуется интерферограмма, соответствующая паре 20.06.2007-08.07.2008. Эта пара характеризуется следующими значениями основных параметров:

- перпендикулярная база: 212,5 м;
- критическая база: 5235 м;
- вместимость топографического фринга (полного цветового цикла): 93,5 м;
- разница положений Доплеровского центроида: 134,5;
- критическая разница положений Доплеровского центроида: 1296,38.

По приведенным данным можно сделать следующие выводы:

- базовая линия пары достаточно мала, чтобы в один топографический фринг дифференциальной интерферограммы умещался перепад высот рельефа в 93,5 м, что больше, чем реальный перепад высот на участке, покрываемом снимками кадра № 6. Следовательно, вся низкочастотная фаза дифференциальной интерферограммы (соответствующая перепаду высот рельефа) уместится в один топографический фринг. Таким образом, на дифференциальной интерферограмме будет практически отсутствовать рельеф, а те фринги, которые присутствуют на интерферограмме, будут соответствовать высокочастотной фазе, то есть смещениям земной поверхности;

- разница положений Доплеровского центроида (модели, учитывающей вращение Земли) для двух снимков пары не слишком велика и составляет около 10 % от критической. По этой причине Доплеровский фильтр при построении интерферограммы не применялся.

Корегистрация снимков пары осуществлялась в автоматическом режиме в три этапа. Сначала вычислялся сдвиг по большому центральному окну, затем параметры совмещения снимков пары уточнялись на пиксельном уровне по сетке малых окон, для которых соотношение сигнал-шум превышало пороговое значение, и, наконец, выполнялось совмещение двух снимков на субпиксельном уровне по результатам анализа когерентности фазовых слоев для сетки малых окон. В расчет принимались лишь окна со значением когерентности, превышающим пороговое значение.

После совмещения снимков пары была рассчитана сырая комплексная интерферограмма, к которой затем был применен фильтр спектрального сдвига, принимающий в расчет высоты рельефа на площадь, покрываемую интерферограммой. Результат показан на рис. 3.3.

Данные спутника RADARSAT-1 характеризуются некорректной записью такого параметра, как частота повторения импульса. В связи с этим при обработке снимков пары была выполнена коррекция этого параметра по двум контрольным точкам, максимально разделенным по направлению азимута. После восстановления корректного значения этого параметра были выполнены компенсация набегу фазы по высоте и построение дифференциальной интерферограммы. В качестве опорной цифровой модели рельефа использовалась ЦМР, полученная по результатам оцифровки горизонталей и высотных отметок топографической карты масштаба 1 : 100 000. Высотные отметки этой ЦМР были предварительно пересчитаны из возвышений над эллипсоидом Красовского в возвышения над эллипсоидом WGS-84. Это позволило корректно обработать совместно в одном процессе данные радарной съемки, данные ГЛОНАСС/GPS-измерений на базовых станциях и на уголковых отражателях и данные цифровой модели рельефа. На выходе была получена дифференциальная интерферограмма, все еще содержащая диагональную фазовую помеху, вызванную неточностью определения орбиты у спутника RADARSAT-1 (рис. 3.4).

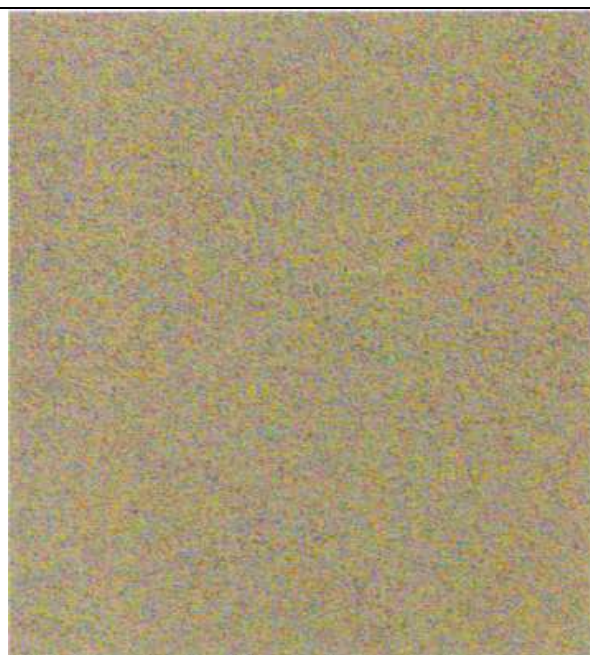


Рис. 3.3. Сырая комплексная интерферограмма для кадра № 6



Рис. 3.4. Дифференциальная интерферограмма для кадра № 6

Для удаления фазового шума выполнена процедура усредняющей фильтрации для пикселей, характеризующихся значением параметра сигнал-шум не ниже порогового значения. Фильтрованная дифференциальная интерферограмма показана на рис. 3.5. На рис. 3.6 представлена развертка фазы.

Следующим шагом была скорректирована орбита основного и вспомогательного снимков интерферометрической пары. Для этого использованы опознанные на основном снимке от 20.06.2007 г. уголкового отражатели № 27, 28, 30—32. Эти и другие уголкового отражатели радиолокационного сигнала были специально установлены на территории Уренгойского НГКМ в 2007 г. при участии маркшейдерско-геодезической службы ООО «Газпром добыча Уренгой». Для фазовых центров каждого из этих отражателей были известны широта, долгота и высотная отметка над эллипсоидом WGS-84 (по результатам ГЛОНАСС/G PS-измерений, выполненных маркшейдерско-геодезической службой ООО «Газпром добыча Уренгой»). С другой стороны, за счет их четкого опознания на амплитудном слое снимка от 20.06.2007 г. были известны их координаты по направлению наклонной дальности и по направлению азимута радиолокационной съемки. Сопоставив эту информацию с опорной ЦМР, удалось с высокой точностью скорректировать орбитальные параметры основного снимка пары, что позволило удалить фазовую помеху из диффе-

На дифференциальной интерферограмме кадра № 8 отчетливо дешифрируется северная замыкающая часть мульды оседаний земной поверхности, зарегистрированной над Уренгойской площадью. Интерференционные кольца замыкаются в районе к северу от Табьяхинского участка. Характер распределения интерференционных колец позволяет сделать вывод о развитии оседаний земной поверхности от контура сеноманской залежи к ее центру (т.е. к зоне максимальных отборов газа) от 0 до 3 см.

<i>Рис. 3.10. Геокодированная дифференциальная интерферограмма на кадр № 8</i>	<i>Рис. 3.12. Дифференциальная интерферограмма и изолинии вертикальных смещений земной поверхности в сантиметрах за 2007—2008 гг. (синие линии)</i>
<i>Рис. 3.13. Сопоставление</i>	<i>Рис. 3. 14. Сопоставление</i>

<i>дифференциальной интерферограммы с ранее выявленными дизъюнктивами различных простираний (красные линии)</i>	<i>дифференциальной интерферограммы с ранее выявленными дизъюнктивами различных простираний (красные линии) и с эксплуатационными сеноманскими скважинами аварийного фонда (черные звездочки)</i>
---	---

Для анализа смещений земной поверхности за период 2007—2008 гг., зарегистрированных на всей Уренгойской площади, в первую очередь была составлена мозаичная схема интерферограмм по кадрам № 6, 7 и 8. Результирующая дифференциальная интерферограмма представлена на рис. 3.11. Отметим, что, поскольку цветовое кодирование интерферограмм является условным для каждого обрабатываемого кадра (значение имеет лишь полный спектр цветов - неважно, с какого конкретно цвета он начинается и каким цветом заканчивается), при составлении мозаичной схемы цветовое кодирование всех трех интерферограмм (на кадры № 6, 7 и 8) было выровнено. При этом сами значения фазовых разностей не менялись.

После составления мозаичной схемы интерферограмм был выполнен пересчет фазовых разностей в смещения в сантиметрах. Из-за значительной зашумленности интерферограмм с временной базой в один год (что повлекло за собой выбор крупных линейных размеров окон усредняющих и сглаживающих фильтров) субсантиметровыми смещениями, на взгляд авторов, необходимо пренебречь. С другой стороны, для наиболее важных участков месторождения (например, для территории г. Новый Уренгой) обработка многопроходных цепочек радарных снимков по методу постоянных рассеивателей может обеспечить миллиметровую точность фиксируемых смещений, хотя для этого потребуются большее количество проходов радарного спутника (20—40) и высокоточная цифровая модель местности (с учетом высот зданий и сооружений), например, полученная по данным лазерного сканирования.

Благодаря целевому планированию съемки Уренгойского НГКМ с радарного спутника RADARSAT-1 и наличию наземного обеспечения этой съемки (установка на местности уголковых отражателей радиосигнала и выполнение на них ГЛОНАСС/G PS-измерений планово-высотных координат в 2007 г. и 2008 г. с участием специалистов маркшейдерско-геодезической группы ООО «Газпром добыча Уренгой»), удалось в значительной степени

избежать разрывов фазы при сохранении когерентности на необходимом уровне. При анализе полученных результатов можно сделать вывод о наличии мульды оседаний земной поверхности, развивающейся в целом от контура сеноманской залежи к центру зоны отбора газа из нее (хотя максимум оседаний и не всегда точно соответствует центру зоны отбора, что говорит о проявлении на Уренгойском НГКМ как природной, так и техногенной составляющих смещений земной поверхности).

На рис. 3.12 на геокодированную дифференциальную интерферограмму нанесены результирующие изолинии вертикальных смещений земной поверхности в сантиметрах. Для отдельного прогнозирования природной и техногенной компонентов этих смещений было выполнено их сопоставление в геоинформационной системе с разнородными геолого-геофизическими, промыслово-геологическими и геокриологическими материалами.

Далее рассмотрим результаты проведенного сопоставительного анализа. 1. В первую очередь зарегистрированные оседания земной поверхности были сопоставлены с геокриологическими процессами. Сопоставление дифференциальной интерферограммы с ареалами активного развития термокарстовых процессов, закартированных ранее по космическим снимкам среднего разрешения, показало, что оседания присутствуют как в зонах развития термокарстовых процессов, так и вне этих зон. Следовательно, этот тип процессов, безусловно, оказывающий влияние на смещения земной поверхности в общем случае, в данном конкретном случае — при анализе смещений на территории Уренгойской площади Уренгойского НГКМ за период в 1 год - не является основным типом процессов, вызывающих зарегистрированные оседания.

При сопоставлении дифференциальной интерферограммы с ранее известными крупными мезополигональными формами рельефа было отмечено, что в тех районах, где их присутствие значительно, увеличивается уровень шума в интерферограмме и происходит падение когерентности, но с самими величинами зарегистрированных оседаний зоны проявления мезополигональных форм рельефа не коррелируются.

Сопоставление дифференциальной интерферограммы с булгуньями (буграми пучения) и выпученными торфяными массивами показало, что либо пространственное сопоставление этих объектов с мульдой оседаний земной поверхности не показывает никакой корреляции, либо эти объекты влияют на уровень шума в фазовой картине интерферограммы, локально

повышая этот уровень (особенно выпученные торфяные массивы).

Ареалы распространения процессов солифлюкции, как и все остальные рассмотренные геокриологические процессы, наиболее очевидно коррелируются с областями зашумленности на интерферограмме. Непосредственно с рисунком изолиний оседаний и с их величиной корреляция не просматривается.

Наконец, с мульдой оседаний земной поверхности были сопоставлены результаты классификации теплового (дальнего инфракрасного) канала мозаики снимков LANDSAT-7. В общем случае авторы выявили области, различающиеся по тепловому режиму и по абсолютным температурам земной поверхности, в том числе области растепления различной природы. Сопоставление показало, что ни положительные, ни отрицательные тепловые аномалии не коррелируются со смещениями земной поверхности.

Таким образом, пространственное сопоставление зарегистрированных оседаний земной поверхности с разными видами геокриологических процессов показало, что возникновение зарегистрированной крупной мульды оседаний земной поверхности на Уренгойской площади в целом не может быть объяснено влиянием геокриологических процессов. С другой стороны, геокриологические процессы совершенно четко проявляются на некоторых локальных участках интерферограмм, повышая уровень шума или вызывая разрывы фазы.

2. Далее был выполнен сопоставительный анализ зарегистрированных смещений с геодинамическими процессами. Прежде всего мульда оседаний (дифференциальная интерферограмма) была сопоставлена с геодинамически активными линейными зонами, выявленными ранее по результатам дешифрирования мультиспектральных космических изображений и разнородных геофизических материалов (рис. 3.13). Сопоставление показало, что на некоторых участках Уренгойской площади имеет место сходимость тектонических нарушений, ограничивающих геодинамические блоки земной коры, с оседаниями земной поверхности. Геодинамически активные дизъюнктивы хорошо коррелируются с некоторыми локальными особенностями мульды оседаний земной поверхности. В частности, блоки, ограниченные этими дизъюнктивами, просаживаются с различной скоростью, что заметно по дифференциальной интерферограмме.

Однако при этом ранее известные тектонические нарушения не оконтуривают саму мульду оседаний. Другими словами, нельзя сделать вывод о том, что зарегистрированные обширные по площади смещения земной поверхности обусловлены геодинамическими причинами. Тем не менее, геодинамически активные дизъюнктивы

влияют на характер рисунка изолиний оседаний земной поверхности, локально увеличивая или замедляя скорость этих оседаний, что и проявляется в дифференциальной интерферограмме.

При сопоставлении дифференциальной интерферограммы, геодинамически активных тектонических нарушений и кустов эксплуатационных сеноманских скважин аварийного фонда (рис. 3.14) авторы отмечают, что пространственно скважины аварийного фонда более коррелируются с дизъюнктивами, чем с максимумами оседаний земной поверхности.

Это объясняется тем, что абсолютное большинство добывающих скважин Уренгойской площади — вертикально направленные. Возможно, для других

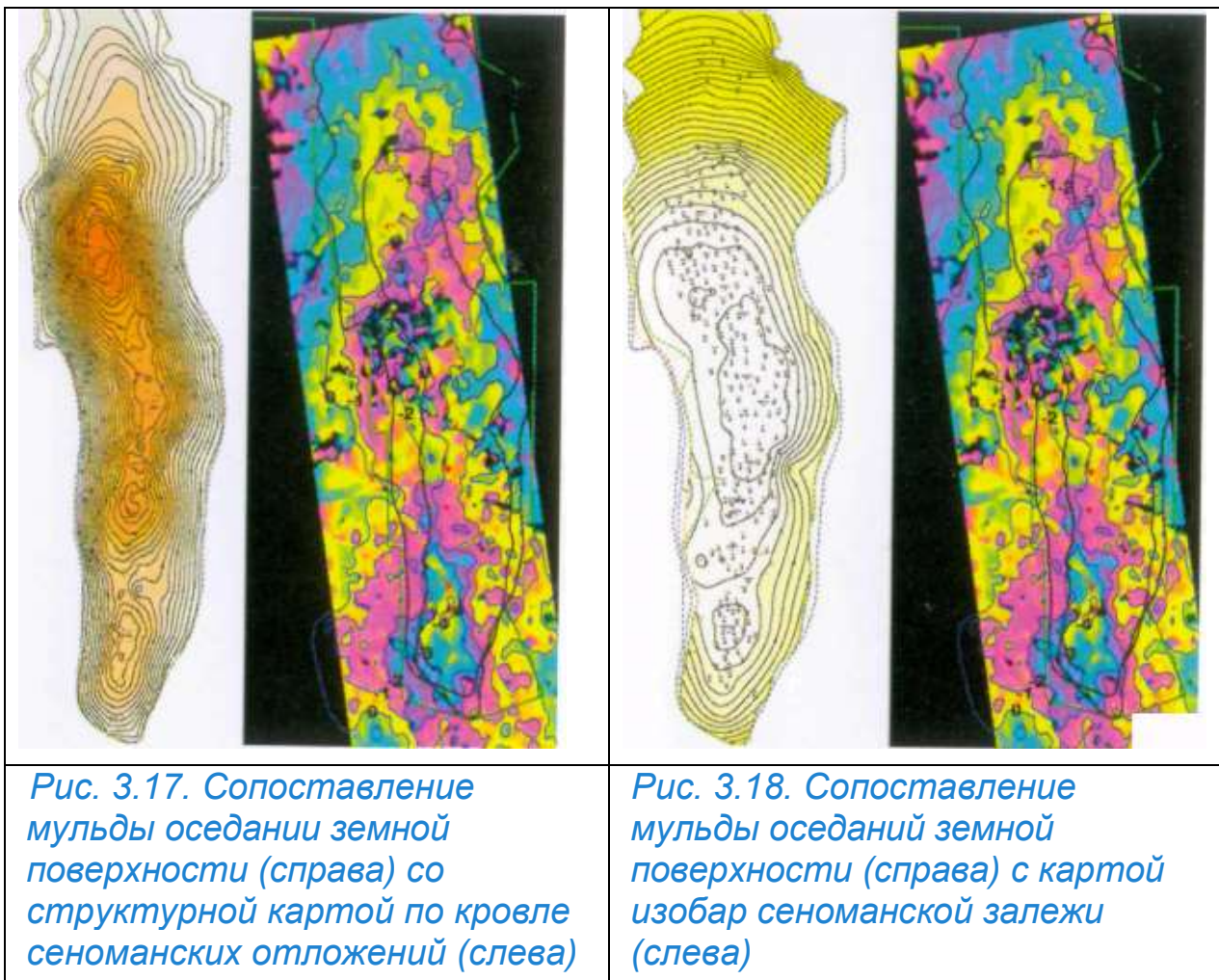
площадей УНГКМ, где процент наклонно направленных скважин больше, пространственная корреляция скважин аварийного фонда с максимумами смещений земной поверхности будет лучше. В свою очередь, пространственное совпадение тектонических нарушений и сеноманских скважин аварийного фонда авторы объясняют ускоренным внедрением подошвенных вод в сеноманскую залежь по геодинамически активным дизъюнктивам за счет нарушения ими непроницаемости глинистых пропластков. Следует отметить, что большинство из показанных на рис. 3.14 аварийных скважин были из эксплуатации именно по причине обводнения.

Результаты сопоставления изолиний смещений земной поверхности с гравитационным и магнитным полями Земли, приведенные на рис. 3.15, 3.16, свидетельствуют о том, что отрицательные аномалии полей (темные участки) хорошо коррелируют с зарегистрированной мульдой оседаний земной поверхности. Это не удивительно, поскольку отрицательные аномалии полей соответствуют зонам пористости или трещиноватости в геологическом разрезе, то есть ослабленным зонам при условии отборов из этих пор углеводородного сырья.

3. Наконец, было выполнено сопоставление мульды оседаний земной поверхности за 2007—2008 гг. с промыслово-геологическими материалами. В первую очередь мульда была сопоставлена со структурной картой по кровле сеноманских отложений (рис. 3.17). Сопоставление показывает, что максимумы оседаний в основном соответствуют максимальным высотным отметкам кровли сеноманских отложений (т.е. центру сеноманской залежи).

Сравнительный анализ зарегистрированных оседаний и рисунка изобар воронки падения пластового давления в сеноманской залежи (рис. 3.18) показывает, что минимумы пластового давления

сеноманской залежи (в районе УКПГ-1 АС и в центральной части Уренгойской площади) соответствуют максимальным оседаниям земной поверхности (до 3 см в год в центральной части Уренгойской площади и до 4 см в год на юге Уренгойской площади в районе УКПГ-1 АС).



На взгляд авторов, это может свидетельствовать о том, что основной вклад в формирование мульды смещений земной поверхности вносит разработка сеноманской залежи, в то время как некоторые локальные особенности рисунка изолиний мульды оседаний обусловлены влиянием геодинамических и геокриологических процессов.

Мульда оседаний по Уренгойской площади подразделяется на две части: первая соответствует зоне дренирования УКПГ-1АС и продолжается к западу от Уренгойской площади, а вторая начинается в районе г. Новый Уренгой и развивается далее на север, замыкаясь на севере Табьяхинского участка. «Перемычка» в оседаниях в районе г. Новый Уренгой может быть объяснена, если пространственно сопоставить мульду оседаний земной поверхности и карту подъема газоводяного контакта по Уренгойской

площади (рис. 3.19). При этом стоит отметить, что именно в районе г. Новый Уренгой наблюдается максимальная скорость подъема газоводяного контакта (ГВК) на всем месторождении. Другими словами, отбираемый из порового пространства сеноманской залежи газ в значительной степени замещается внедряющейся в залежь несжимаемой жидкостью — водой, из-за чего, по мнению авторов, и наблюдается некоторое замедление оседаний земной поверхности в районе г. Новый Уренгой по сравнению с остальной частью Уренгойской площади. Кроме того, зона дренирования УКПГ-1АС, характеризующаяся незначительными темпами внедрения пластовых вод в сеноманскую залежь, оседает быстрее других участков Уренгойской площади (со скоростью до 4 см в год).

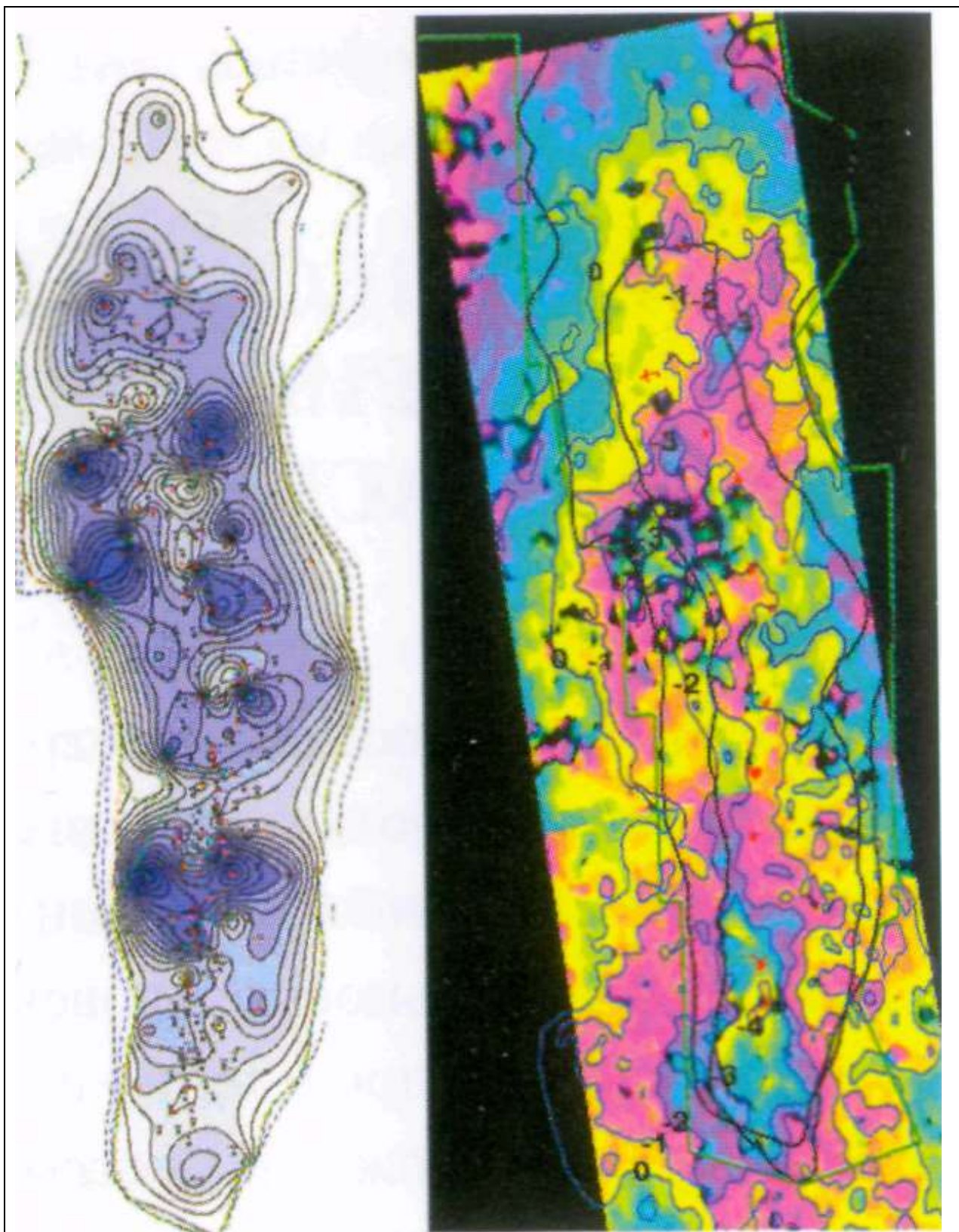


Рис. 3.19. Сопоставление мульды оседаний земной поверхности (справа) с картой подъема газоводяного контакта сеноманской залежи (слева)

Таким образом, из результатов сопоставления зарегистрированной мульды оседаний земной поверхности с разнородными геолого-геофизическими, промыслово-

геологическими и геокриологическими материалами можно сделать следующие основные выводы:

1. Мульда оседаний земной поверхности в районе Уренгойской площади наилучшим образом коррелирует с промыслово-геологическими материалами (карта изобар сеноманской залежи, карта подъема ГВК) и с геолого-геофизическими материалами (карта магнитного и гравитационного полей). Это говорит о том, что зарегистрированные оседания вызваны в основном разработкой сеноманской залежи. Однако поле смещений земной поверхности, накладываясь на реальную геологическую ситуацию, несколько модифицируется. В частности, в нем проявляются геодинамически активные блоки земной коры, просаживающиеся с разной скоростью. На локальном же уровне на картину смещений земной поверхности (как положительных, так и отрицательных) влияние оказывают геокриологические процессы. Эти процессы в большинстве случаев также повышают уровень фазового шума в интерферограмме. При этом возможно, что геокриологические процессы испытывают дополнительную активизацию вследствие опускания территории, вызванного добычей углеводородов.

2. Зарегистрированные по данным радарной интерферометрии смещения земной поверхности в целом подтверждаются данными ГЛОНАСС/G PS-наблюдений (ГЛОНАСС/G PS-станции установлены на крышах зданий УКПГ в осевой части Уренгойской площади) и повторного нивелирования. Применение данных космических съемок в комплексе с методами спутниковой геодезии и традиционными инструментальными геодезическими наблюдениями позволяет оптимизировать систему наблюдений за смещениями земной поверхности на Уренгойском НГКМ и повысить точность этих наблюдений.

На основании полученных результатов можно заключить, что система маркшейдерско-геодезического мониторинга за опасными геомеханическими, геодинамическими и геокриологическими процессами на месторождении углеводородов должна включать следующие основные группы методов наблюдений:

- традиционные инструментальные геодезические методы (повторное геометрическое нивелирование);

- методы спутниковой геодезии (ГЛОНАСС- и GPS-наблюдения);

- методы космического мониторинга (регулярная космическая съемка в различных диапазонах электромагнитного спектра).

ГЛАВА 4

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНИХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Мониторинг состояния недр — это система регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, оценки состояния геологической среды и прогноза ее изменений под влиянием естественных природных факторов и деятельности человека. Мониторинг за состоянием недр требуется осуществлять при проведении поисковых и разведочных работ, обустройстве и разработке месторождений, строительстве внутрипромысловых и магистральных трубопроводов и иной хозяйственной деятельности.

В районах распространения многолетнемерзлых пород требуется осуществлять особый вид мониторинга — геокриологический мониторинг.

Геокриологический аэро- или космический мониторинг, проводимый при разработке месторождений в условиях развития многолетнемерзлых пород, является подсистемой общего мониторинга состояния недр в части экзогенных геологических процессов и представляет собой объектный уровень мониторинга. Его проведение является обязательным при геологическом изучении недр и добыче углеводородного сырья и регламентируется соответствующими лицензионными документами. Необходимость проведения геокриологического аэрокосмического мониторинга обусловлена потребностью минимизации рисков воздействия опасных геокриологических процессов, наблюдаемых при освоении месторождений углеводородов.

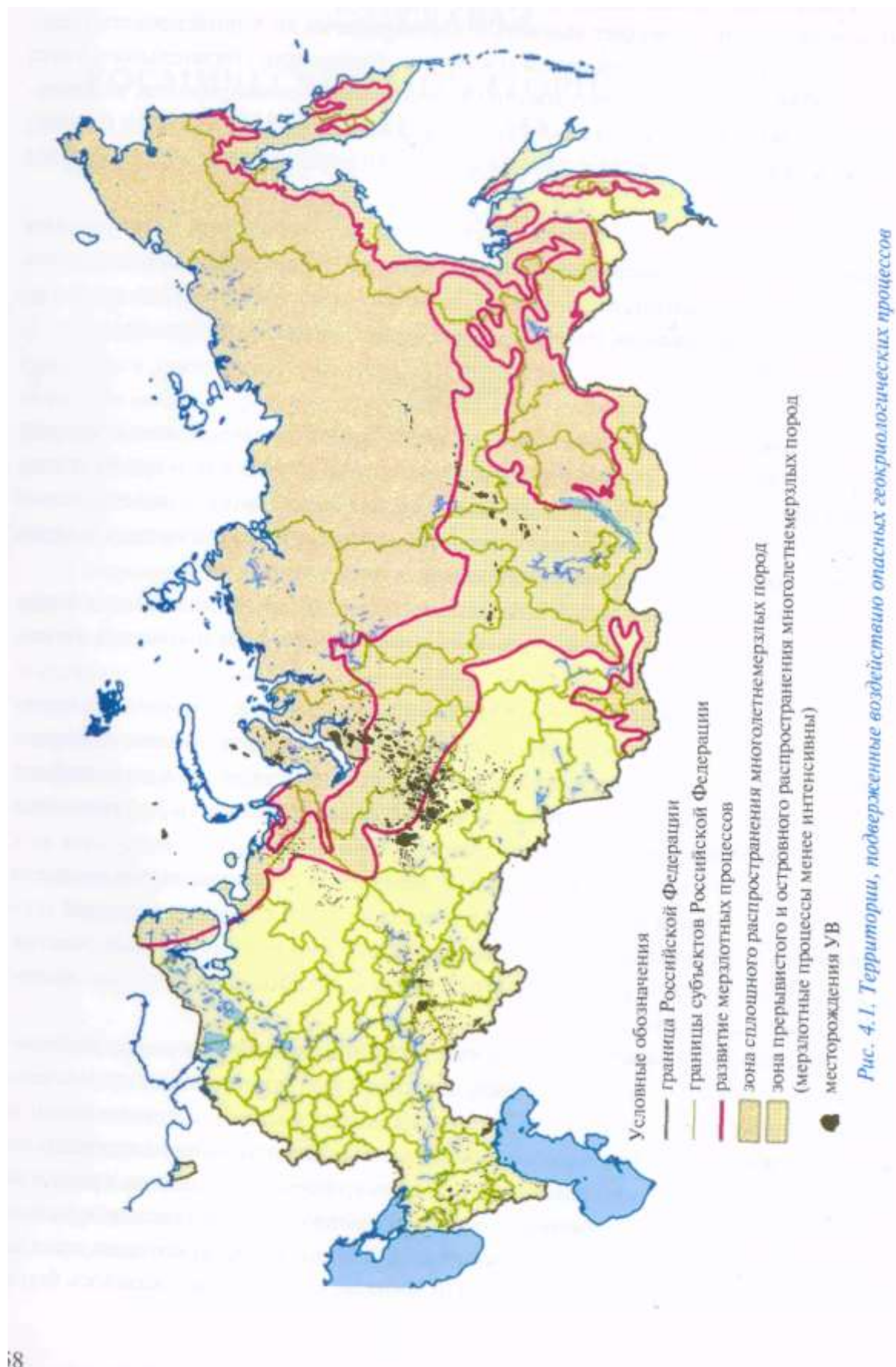
Ниже рассмотрим три ключевых вопроса, связанных с проведением геокриологического мониторинга: что исследовать, с помощью чего и как обрабатывать полученные данные.

Объекты исследований при мониторинге геокриологических процессов

Состав и строение сезонно- и многолетнемерзлых пород, геологические особенности их залегания и другие параметры (например, температура) во многом определяют характеристики ландшафтов, формируя яркостные и текстурные особенности аэрокосмических изображений.

Геокриологическая интерпретация результатов дешифрирования аэрокосмических съемок позволяет выявить и

картографически зафиксировать опасные геокриологические процессы и явления, требующие обязательного учета при проектировании и эксплуатации месторождений углеводородов, располагающихся в пределах развития многолетнемерзлых пород. Территории России, подверженные воздействию опасных геокриологических процессов, показаны на рис. 4.1.



Наибольшие опасности при обустройстве месторождений представляют термокарст, криогенные полигональные образования рельефа, морозное пучение, наледообразование, термоэрозия,

термоабразия, солифлюкция, криогенные оползни скольжения. Рассмотрим подробнее каждый из процессов.

Термокарст

Термокарст — это периодичный процесс образования локальных просадок земной поверхности (осадка и размокание мерзлых пород) в результате сезонного и многолетнего оттаивания сильнольдистых пород, подземных пластовых залежей льда, полигонально-жильных льдов, захороненных снежников и наледей, вытаивания льда гидролакколитов (булгунняхов) (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Термокарстовая равнина

Многолетний термокарст приводит к образованию отрицательных форм рельефа, заполненных водой, — термокарстовых озер, формированию бугристо-западинного рельефа, котловин.

Одной из причин современной активизации процесса протаивания мерзлых пород в районах добычи углеводородов считается производственное воздействие на природную среду, проявляющееся прежде всего в разрушении почвенно-растительного покрова, что влечет за собой резкое (в 2—4 раза) увеличение глубины сезонного оттаивания.

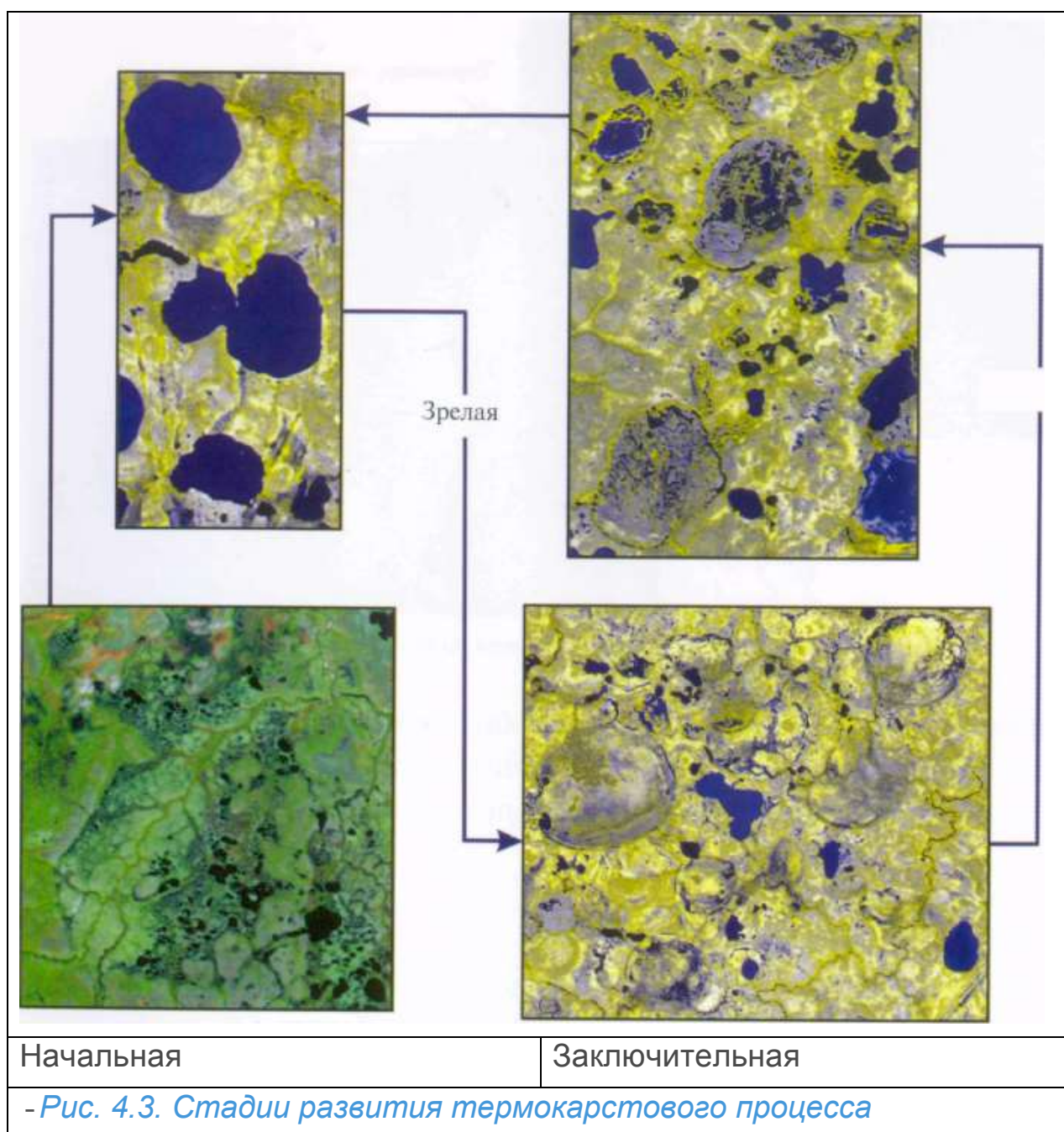
Термокарстовые понижения как древнего, так и современного возраста могут встречаться на всех геоморфологических уровнях. Ареалы развития термокарстовых процессов занимают

преимущественно водораздельные участки и достаточно крупные речные долины. На дренируемых склонах термокарстовых явлений не наблюдается.

При сравнении космических изображений разных годов съемки установлено, что с течением времени термокарстовые озера претерпевают существенные изменения. Многие из них высыхают или оказываются спущенными и превращаются в хасыреи (аласы), другие сильно деградировали (значительно уменьшилась площадь водного зеркала). Есть и такие, что возникли вновь или увеличились в размерах. Именно это обстоятельство представляет наибольшую опасность при обустройстве месторождений. Площадки, на которых прежде были размещены объекты разведки или добычи, построенные, казалось бы, в благоприятных природных условиях, могут быть вовлечены в термокарстовый процесс и повреждены или вообще разрушены.

Выделяют три стадии термокарстового процесса (рис. 4.3):

- начальная;
- зрелая;
- заключительная.



Ареалы их распространения часто пространственно сближены. Стадийность термокарстового процесса носит циклический характер.

Для начальной стадии характерны небольшие сближенные озера. Зрелая стадия объединяет термокарстовые озера достаточно крупного размера обычно изометричной формы. К заключительной стадии относятся территории, на которых имеются высыхающие или уже высохшие, спущенные озера, - хасыреи — озерные котловины с сильно развитой травяной (преимущественно луговой) растительностью. Встречаются участки, подверженные повторной стадии термокарста, такие, где наряду с хасыреями появились новые озера, т.е. начался

новый цикл термокарстового процесса (рис. 4.4). По данным некоторых исследователей, в среднем термокарстовый цикл составляет около 150—300 лет.

Интенсивность протекания термокарстового процесса меняется от территории к территории. Так, по разновременным аэрокосмическим изображениям и при сравнении топографических карт 1950-60-х гг. с новейшими аэро- и космоснимками можно выделить участки, где термокарст активно развивается (площадь термокарстовых озер растет, появляются новые озера), где процесс устойчив (термокарстовые озера сформированы и длительное время их площадь не меняется), и участки, где термокарст деградирует (рис. 4.5).

Для строительства инженерных сооружений на месторождениях углеводородов наиболее предпочтительны площади с устойчивой динамикой термокарстового процесса. Участки с деградирующим термокарстом менее подходят для строительства, а территорий с активно развивающимся термокарстом при проектировании зданий и сооружений следует избегать.

Установленные по аэрокосмическим материалам особенности развития термокарста территории обустройства месторождений выносятся на карту опасных геокриологических процессов, которая служит одной из основ проектных решений при обустройстве месторождений углеводородов

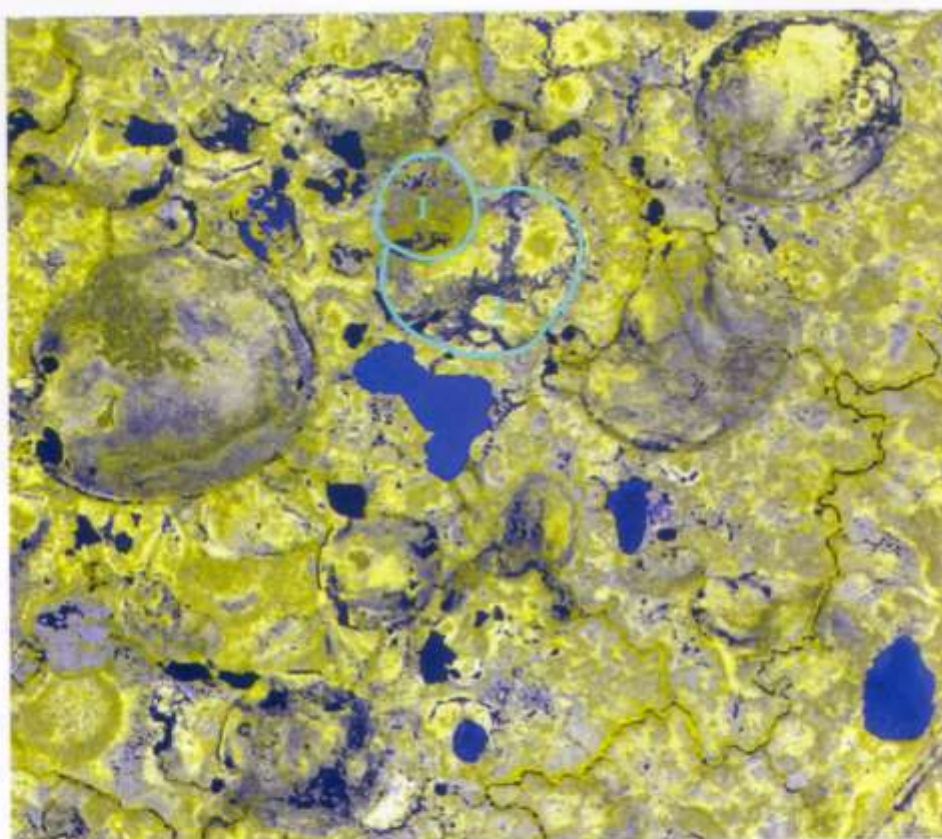


Рис. 4.4. Цикличность термокарстового процесса:

1 – граница хасырея ранней генерации, 2 – граница хасырея поздней генерации

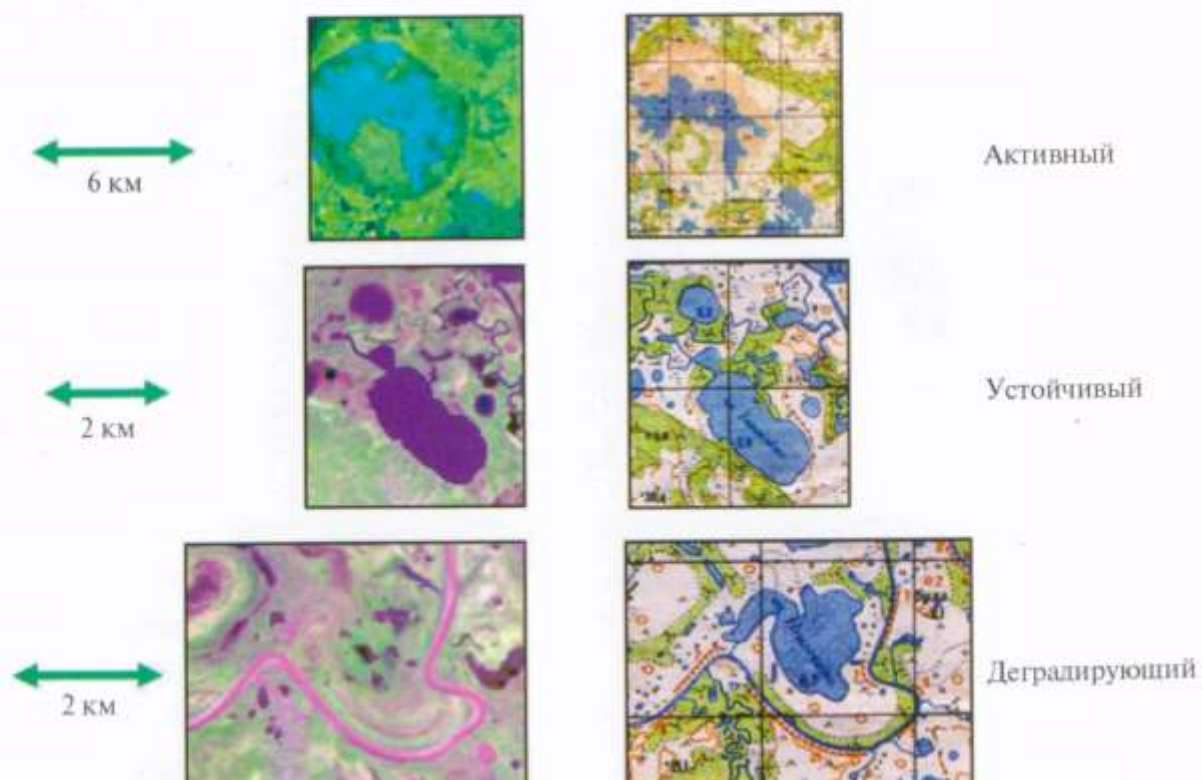


Рис. 4.5. Динамические типы термокарстового процесса, определяемые при сравнении архивных (топографическая основа 1969 г., справа) и современных (космические снимки 2001 г., слева) данных

В природное развитие термокарста зачастую вмешивается техногенный фактор. Объекты инфраструктуры месторождений нарушают естественные геологические процессы, в связи с чем начинаются подтопления объектов (вплоть до возникновения техногенных озер, рис. 4.6) и происходит активизация существующих озер, проявленная интенсивным заболачиванием и увеличением открытого водного зеркала.

Проезд автотехники по грунту, а не по устроенным дорогам, приводит к нарушению поверхностного слоя — в таких местах по космическим изображениям четко видно открытое водное зеркало (рис. 4.7), — что может спровоцировать дальнейшее растепление и образование техногенных термокарстовых озер.

Установлено, что ареалы развития термокарстовых процессов четко совпадают с определенными температурными диапазонами поверхностных отложений. В то же время специальные преобразования тепловых каналов космических изображений позволяют провести районирование территории по относительной температуре поверхности и оконтурить территории потенциального развития термокарста.

Помимо площадного развития (ареалов) термокарста встречаются и его линейные проявления (рис. 4.8). Зоны линейного развития термокарста видны на космических изображениях в виде цепочек маленьких озер, приуроченных к долинам небольших рек и временных водотоков. На топографических картах озера такого размера могут быть не отражены (из-за масштабных ограничений изобразительных возможностей топографических карт), поэтому их выявление осуществляется только на основании анализа космических и аэроснимков высокого разрешения.

При сравнении космических изображений разных лет можно установить скорость протекания термокарстового процесса, особенно если термокарстообразование имеет техногенные причины.

Полигональный рельеф

Криогенные полигональные образования рельефа различаются по размеру и форме полигонов, происхождению (морозобойные трещины, трещины усыхания), ширине раскрытия и глубине проникновения в породу ограничивающих их трещин, виду и составу их заполнения (разжиженный грунт, грунтовые жилы, повторно-жильные льды).

Широкое распространение, большие занимаемые площади и хорошая дешифрируемость полигональных сеток на аэрокосмических изображениях позволяют картографировать районы распространения полигонального рельефа по дистанционным

материалам без маршрутного сопровождения.

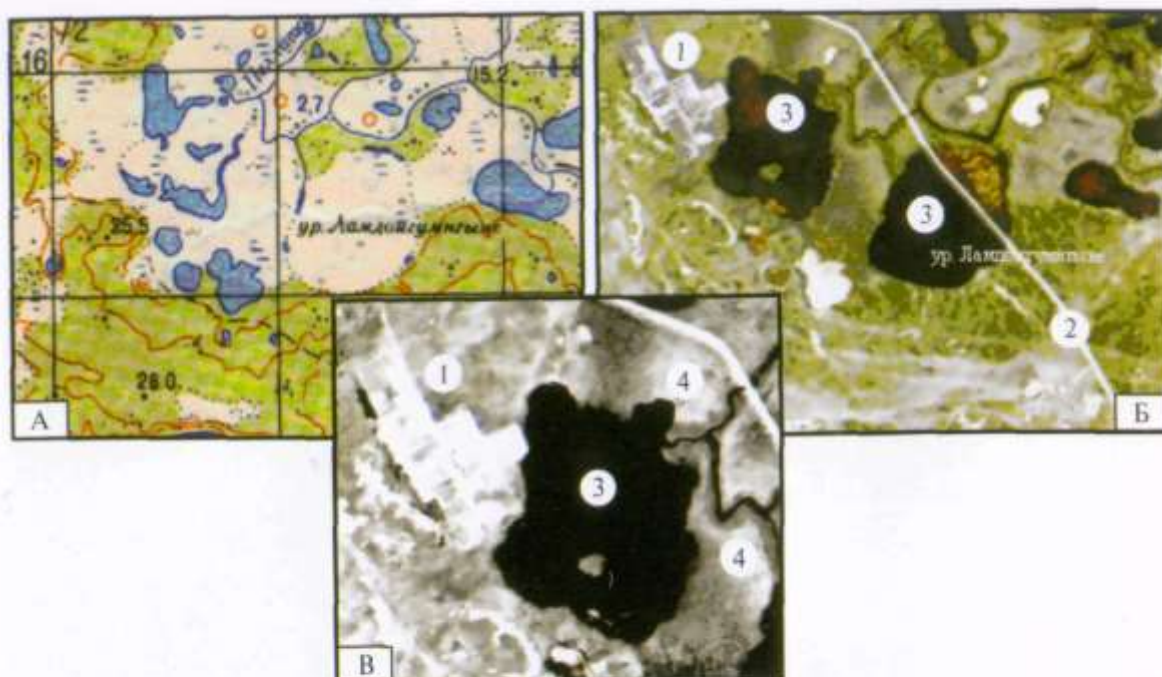


Рис. 4.6. Техногенное подтопление объектов обустройства месторождений:
 А – фрагмент топографической карты 1970 г., Б – космическое изображение 2001 г.,
 В – увеличенный фрагмент космического изображения.

Цифрами обозначены: 1 – отсыпанная промплощадка, 2 – автодорога,
 3 – новообразованные озера (на топоснове 1970 г. их еще нет), 4 – полигональный рельеф,
 образованный пучением мерзлых пород



Рис. 4.7. Подтопление в местах проезда автотранспорта
 (темные полосы, отмеченные стрелкой)



Рис. 4.8. Пример линейного термокарста

Рис. 4.8. Пример линейного термокарста

Полигональные сетки развиты на различных геоморфологических уровнях (в поймах рек, на поверхности речных и морских террас и пологих водоразделах) и имеют различные параметры ячеек (от 0,5-2,0 до 50-60 м и более 1,5 км). Ячейки могут быть правильной тетрагональной (четыре стороны) и неправильной (пять-шесть сторон) формы, но близкой к гексагональной форме.

На рис. 4.9—4.13 приведены примеры полигонального рельефа.



Рис. 4.9. Вид пятен-медальонов на фотографии

Мелкополигональные формы получили название «пятна-медальоны» (рис. 4.9, 4.10). Они образуются в результате неравномерного промерзания замкнутых объемов талого грунта в слое сезонного оттаивания. При таком промерзании резко возрастают гидростатическое давление, разрыв поверхностной мерзлой корки и излияние на поверхность разжиженной глинистой грунтовой массы. Диаметр пятен-медальонов может варьироваться от нескольких сантиметров до 2,5 м и более. Пятна-медальоны ограничены трещинами усыхания, а в плане имеют близкую к гексагональной форму.

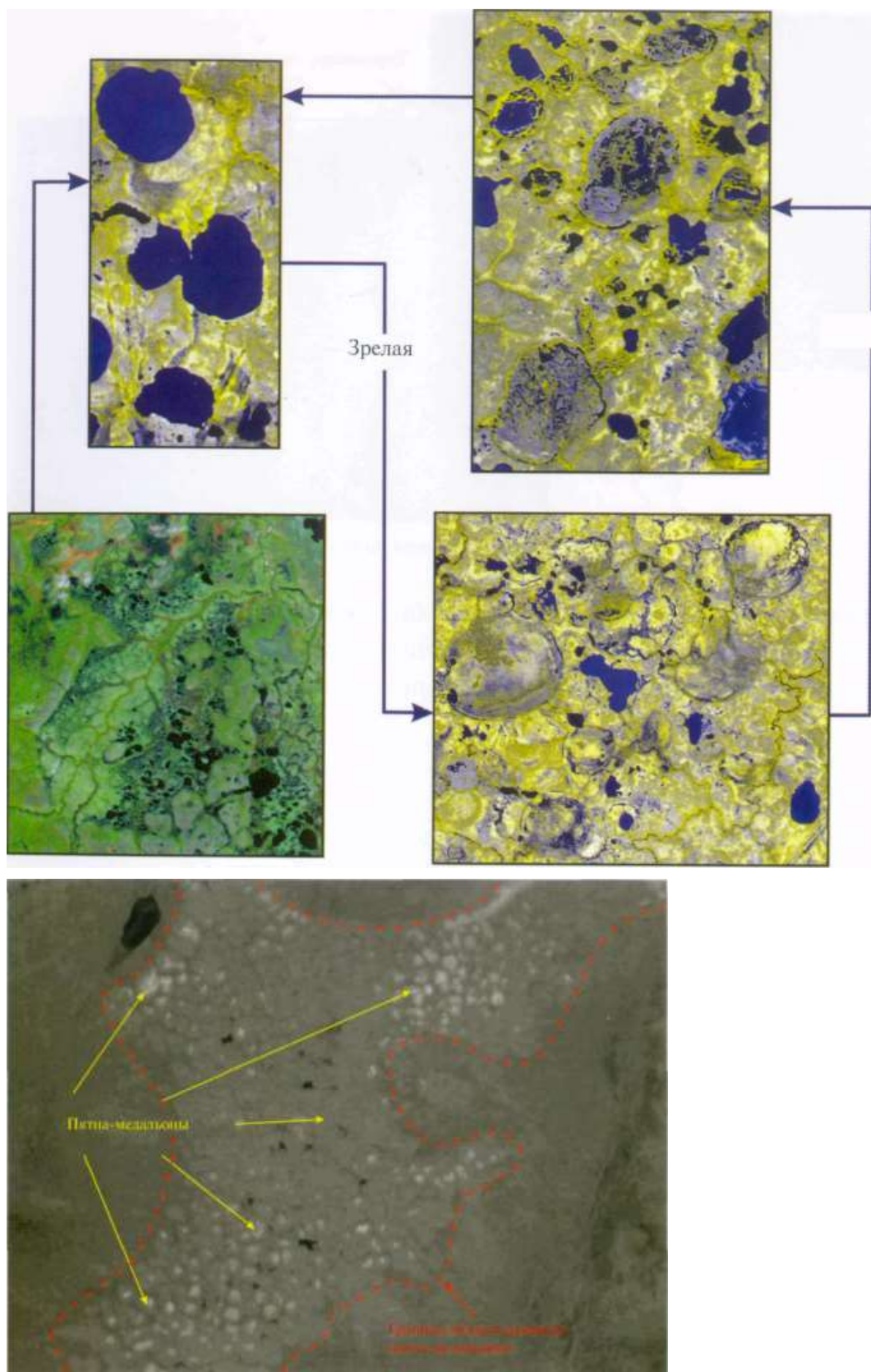


Рис. 4.10. Вид пятен-медальонов на космическом снимке

В поймах рек широко распространены повторно-жильные льды, образующие полигонально-валиковый рельеф с четко выраженными валиками по периметру полигонов и заболоченной поверхностью в центральных частях (рис. 4.11). В более высоких геоморфологических уровнях рельеф - трещинно-полигональный безваликовый.

Близкие по размеру, но преимущественно гексагональные полигоны образуются на поверхности вспученных торфяников (рис. 4.12). Они ограничены трещинами усыхания, как и пятна-медальоны.



4.11 Полигонально-валиковый рельеф



Рис. 4.12. Гексагональные полигоны на поверхности вспученных торфяников

Наибольшую опасность представляют зоны криогенной мезотрещиноватости. Активизация мерзлотных процессов при эксплуатации скважин, расположенных в пределах этих зон, способна привести к выносу материала по трещинам, вызвать просадки земной поверхности, образование воронок и обнажение стволов скважин.

Для предотвращения подобных ситуаций при закладке скважин и других объектов инфраструктуры следует избегать

площадей распространения опасных геологических процессов, особенно зон развития криогенной мезотрещиноватости.

Зоны криогенной мезотрещиноватости в определенной мере определяют рисунок гидросети. Сами зоны в большей степени выделяются по незначительным ложбинам, промоинам, которые не находят своего отражения ни в гидрологической нагрузке, ни в рисунке горизонталей рельефа на топографических картах. Именно такие элементы рельефа за счет отличия увлажненности слагающих их грунтов по сравнению с окружающими грунтами отчетливо дешифри

Морозное пучение

Морозное пучение дисперсных пород (пылеватые водонасыщенные супеси, суглинки, торфяники и др.) обусловлено увеличением их объема при промерзании. Различают площадное и локальное пучение. Площадное пучение характеризуется большей пространственной неоднородностью, когда величина пучения может в пределах одного ландшафтного типа более чем в два раза превышать среднее значение деформаций пучения.

Пучение грунтов — очень распространенный процесс (рис. 4.14, 4.15). В результате площадного промерзания торфяников торфяные массивы выпучиваются — образуется так называемый обращенный рельеф, возвышающийся над окружающей местностью на несколько метров. На их поверхности часто образуются миниполигоны гексагональной формы. Площадь выпученных массивов торфяников может достигать первых квадратных километров.

Локальное пучение приводит к созданию бугров пучения, механизм образования которых может быть миграционным или инъекционным (в зависимости от характера движения мерзлотных и подземных вод). Бугры пучения, или булгунняхи (пальсы, пинго, гидролакколиты), растут со скоростью 10—30 см в год, а при размере основания в несколько десятков или сотен метров могут достигать 60 м высоты (рис. 4.16).

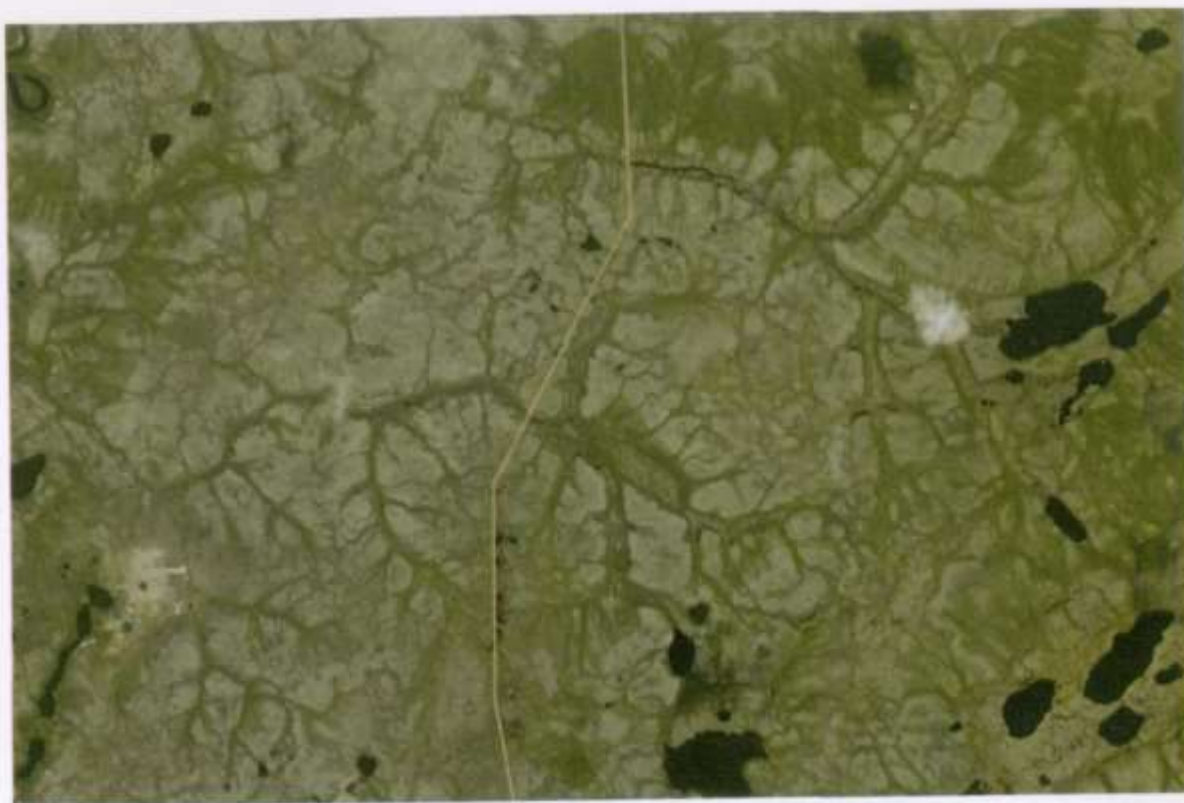


Рис. 4.13. Полигонально-сотовый рисунок



Рис. 4.14. Вид пучения грунтов на фотографии



Рис. 4.15. Вид пучения грунтов на космическом снимке (красной стрелкой отмечена граница между полигонами)

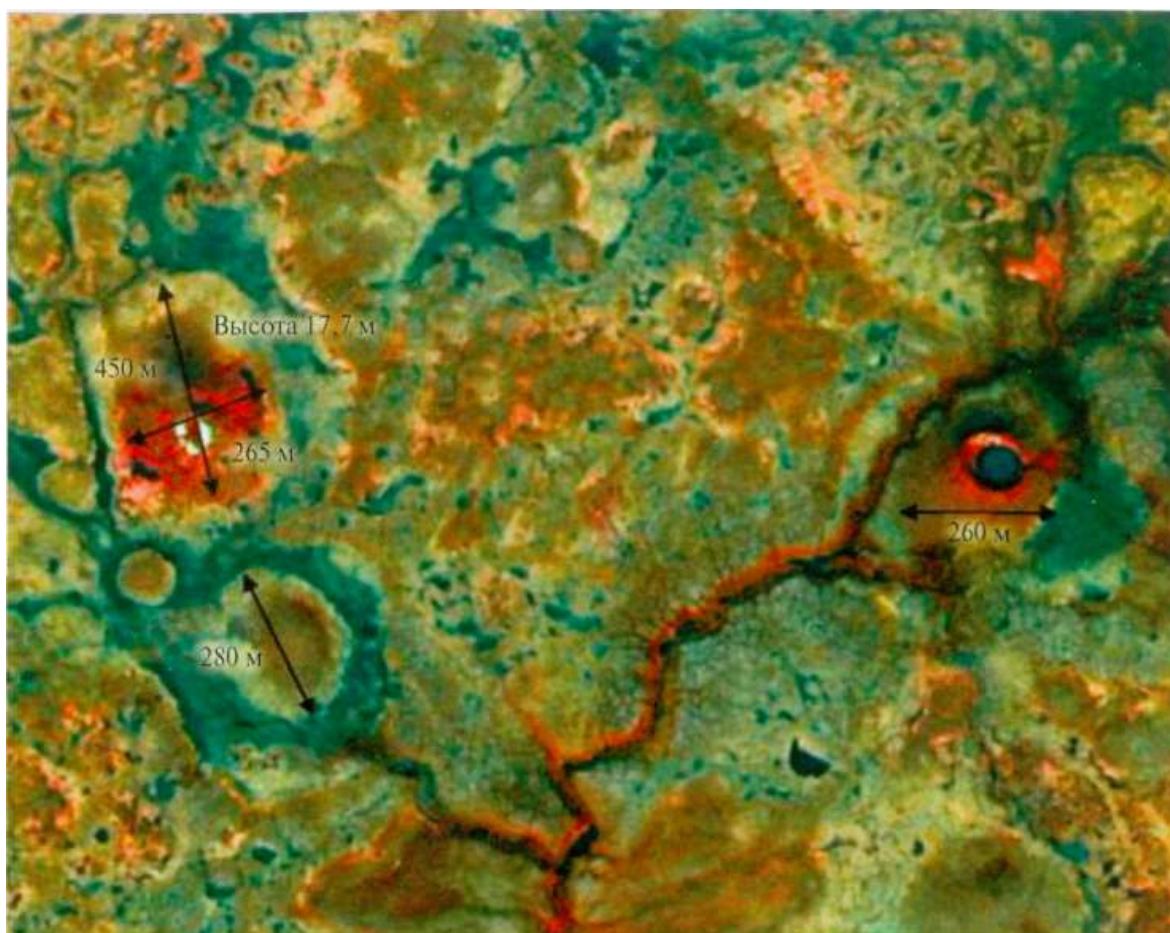


Рис. 4.16. Пример дешифрирования бугров пучения (булгунняхов)

Кроме образования специфических форм рельефа процесс

морозного пучения может приводить к выпучиванию (вымораживанию) свай, столбов и трубопроводов. Сваи и столбы при ежегодном повторении морозного пучения оказываются порой настолько выпученными, что теряют устойчивость и падают, а трубопроводы приобретают опасные изгибы и разрушаются.

Наледеобразование

Наледеобразование — это образование наледей и наледных полей вследствие сезонного замерзания поверхностных водотоков, путей транзита и очагов разгрузки подземных вод.

Наледеобразованию сопутствует инъекционное внедрение подземных вод в замерзающие отложения, иногда приводящее к заметным деформациям мерзлых пород. Строительство линейных инженерных сооружений может приводить к подпруживанию поверхностного стока и провоцировать образование наледей, которые, в свою очередь, представляют опасность для строящихся объектов (рис. 4.17, 4.18).

Термоэрозия и термоабразия

Термоэрозия — это разрушение оттаивающих и мерзлых дисперсных пород в результате теплового и механического воздействия и вынос их водными потоками. В результате действия процесса образуются промоины, овраги, балки, представляющие опасность для объектов обустройства месторождений, расположенных в зоне воздействия термоэрозии, например в верховьях растущего оврага (рис. 4.19).

Термоабразия — это размывание, обрушение, сползание, стекание пород на береговых склонах и уступах озер и морей в результате теплового и механического воздействия на мерзлые и оттаивающие породы волнений и течений водных масс (рис. 4.20). На акваториях процесс сопровождается выносом и перераспределением терригенного материала прибрежной зоны в более глубоководные области с образованием мутьевых потоков (рис. 4.21).



Рис. 4.17. Вид наледобразования на фотографии



Рис. 4.18. Вид наледобразования на космическом снимке

. 4.18. Вид наледобразования на космическом снимке

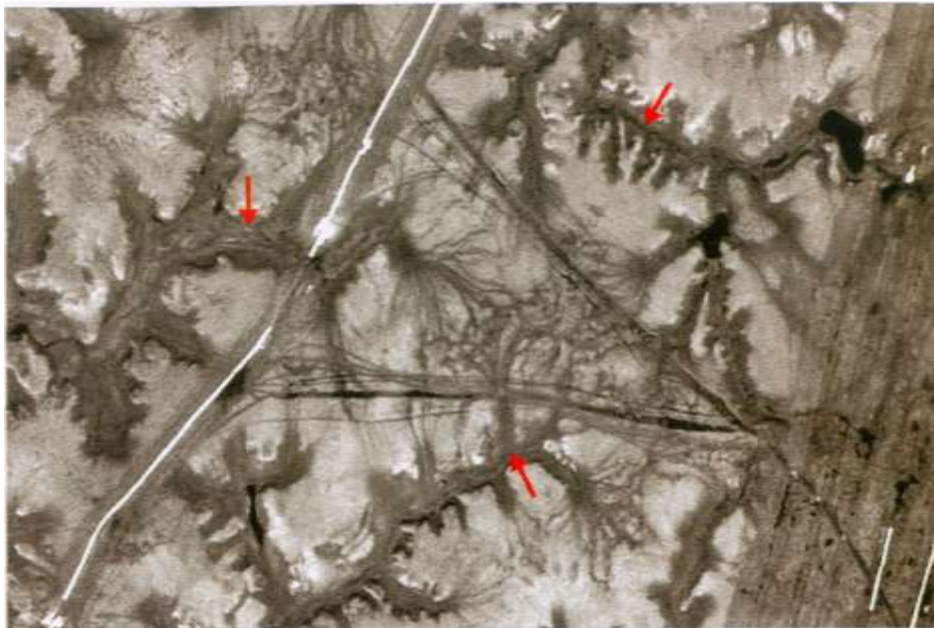


Рис. 4.19. Термозрозионные ошги (отмечены стрелками)

Криогенные сплывы

†

Среди криогенных сплывов различают солифлюкцию и криогенные оползни скольжения.

Солифлюкция (от лат. *solum* — почва, земля и *fluctio* — истечение) — вязко-пластическое (медленное) течение и сплывание оттаивающих рыхлых отложений на склонах, происходящее под действием собственного веса, направленное по падению склона и вызывающее в грунте пластические деформации (рис. 4.22, 4.23).

Солифлюкция развивается на бортах водоразделов, террас и озерных котловин, имеющих южную (в северном полушарии) экспозицию. Солифлюкционные оползни (сплывы) широко распространены. Скорость сплывов — от сантиметров до нескольких метров в сутки.

Повторное оползание одной и той же территории происходит в среднем раз в 50—80 лет. Такой срок необходим для восстановления растительности и формирования нового льдистого горизонта, однако эти цифры не учитывают техногенного воздействия, которое может существенно изменить сроки как в одну, так и в другую сторону.



Рис. 4.20. Термоабразионные уступы (отмечены стрелками)



Рис. 4.21. Мутьевые потоки в акватории



Рис. 4.22. Солифлюкция на снимке высокого разрешения

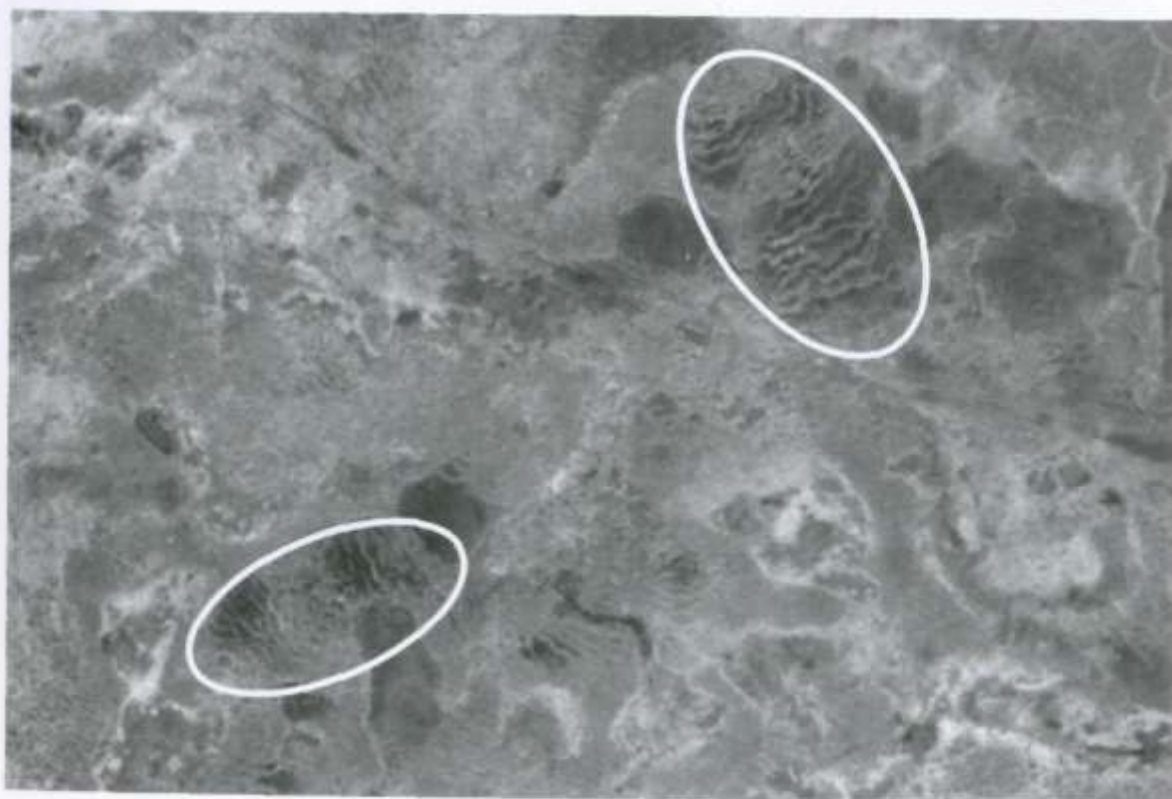


Рис. 4.23. Солифлюкция на снимке среднего разрешения

Криогенные оползни скольжения представляют собой

быстрые сплывы значительных фрагментов грунтов сезонноталого слоя на склонах рельефа по поверхности сильнольдистых, обычно глинистых и суглинистых пород.

Оползни представляют сорванные и сместившиеся на различное расстояние крупные массы оттаявшего слоя грунта и дернины. Они возникают на суглинистых склонах различной морфологии, крутизны и экспозиции. Криогенные оползни характеризуются чрезвычайно широким разнообразием: от простых подвижек отдельных дерново-грунтовых пластов на 0,5-1,0 м до сложнопостроенных скоплений грунта и дернины, сместившихся на расстояние 200—300 м и более или трансформировавшихся в процессе движения в кашеобразную массу перемятых грунтовых блоков и кусков дернины, залитых иногда жидким грунтом.

Большинство оползней обладает четко выраженной бровкой, участком транзита, лишенным растительного покрова, оползневый блок, часто нарушенного строения. Эта часть оползня обычно субгоризонтальна.

Иногда оползневый блок смят в сложные складки без нарушения дернины. Участок транзита часто разбит трещинами усыхания, на его поверхности могут располагаться небольшие озера, но чаще всего он сильно увлажнен. В основании уступа растущих оползней могут вскрываться вытаивающие подземные льды. Мощность оползающих по ним блоков дернины обычно равна мощности деятельного слоя (рис. 4.24).

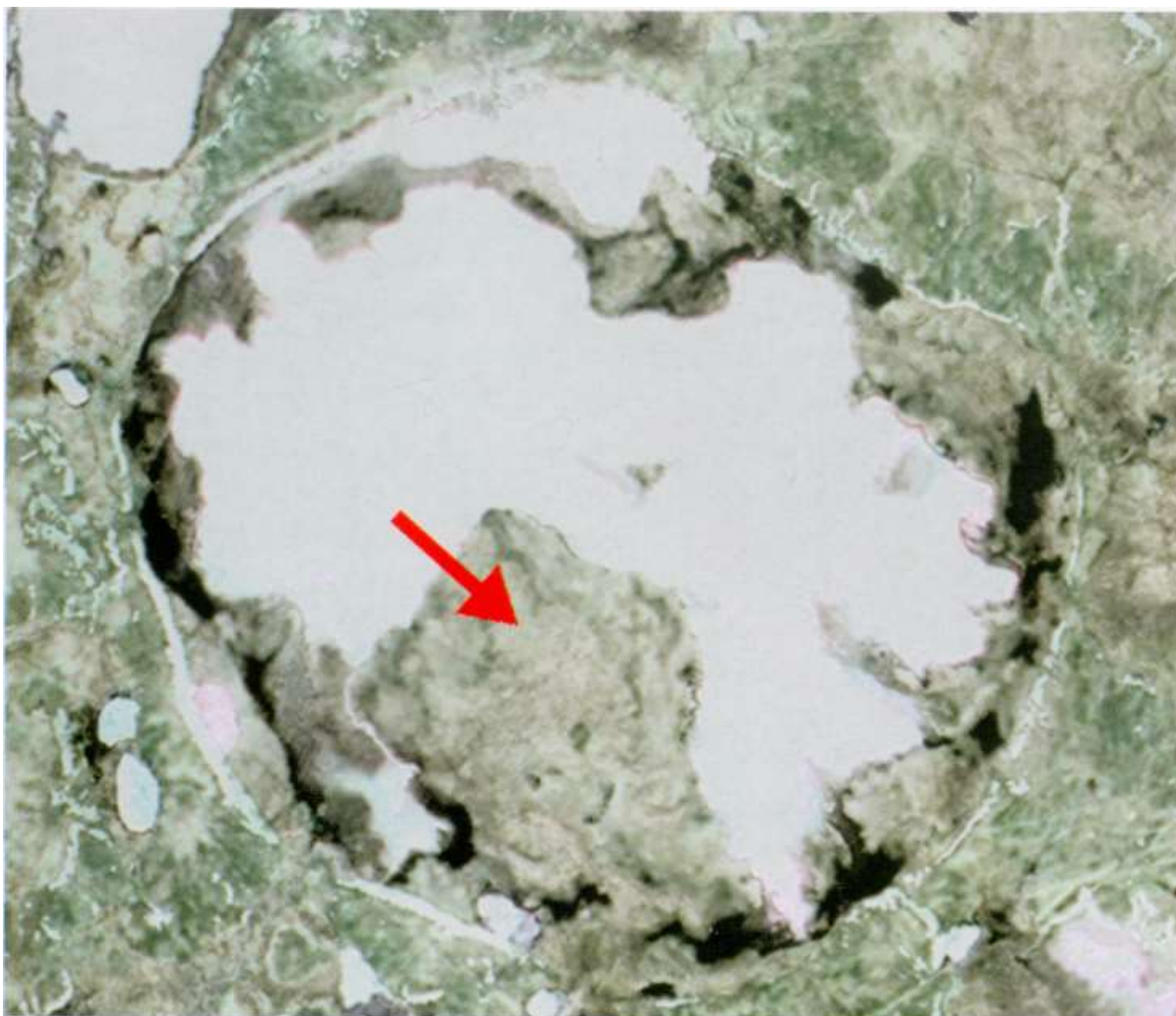


Рис. 4.24. Оползень криогенного скольжения (отмечен красной стрелкой)

Процесс криогенного оползания представляет большую опасность для инженерных сооружений. В свою очередь, техногенное воздействие, разрушающее почвенно-растительный покров тундры, может способствовать резкой активизации оползневых процессов.

Использование космических изображений для выявления опасных геокриологических процессов

Космическое изображение является интегральной картиной, содержащей информацию о таких особенностях территорий исследования, как геологическое строение, обводненность ландшафта, распространенность лесного покрова, по-раженность территории опасными экзогенными, в том числе геокриологическими, процессами. Эти особенности находят свое отражение в яркостных, цветовых и структурных характеристиках космических изображений. На основе изучения этих особенностей проводится дешифрирование космоснимков. Результаты дешифрирования используются для выявления, оценки и картографирования геокриологических процессов и явлений. Последнее тем более

важно, что информация, содержащаяся на существующих топографических, геологических, геоэкологических и других картах, время от времени устаревает. Провести ее актуализацию быстро и с минимальными финансовыми и временными затратами можно по данным дешифрирования космических изображений.

Информация о геоэкологическом строении исследуемых территорий проявляется на космических изображениях через различные компоненты ландшафта, выявление которых выдвигает повышенные требования к геометрической и спектральной разрешающей способности материалов съемки, а также к подбору и комплексированию видов съемки и диапазонов спектра, обеспечивающих выявление, картографирование и интерпретацию геоэкологических данных.

Ниже перечислим основные требования, предъявляемые к космическим данным:

- будучи цифровыми, современные космические данные (изображения) должны быть представлены в виде специальным образом организованных растровых компьютерных файлов. Для их обработки, комплексирования и дешифрирования необходимо применение специализированного программного обеспечения (Erdas Imagine, Er Mapper, ENVI и им подобных);

- полученные с помощью различных сенсоров искусственных спутников Земли в разных диапазонах электромагнитного спектра (преимущественно в видимом и инфракрасном), в разное время суток и в разное время года, с разным пространственным разрешением, космические изображения требуют картографической привязки. В идеальном случае все изображения должны быть трансформированы в единую картографическую проекцию;

- дешифрирование космических изображений осуществляется на основе сравнения их яркостных и структурных особенностей с информацией, представленной на картах геолого-геофизического и топографо-маркшейдерского содержания. Поэтому космические снимки сопровождаются соответствующими картографическими и табличными базами данных;

- космические изображения должны быть организованы в виде цифровой дистанционной основы, представляющей собой совокупность данных дистанционного зондирования (фактографическая часть дистанционной основы) и результатов их тематической обработки (интерпретационная часть), представленных в цифровой и аналоговой форме;

- при исследовании геоэкологических процессов для (в качестве) дистанционной основы необходимо использовать

космические изображения среднего, высокого и сверхвысокого пространственного разрешения за период не менее пятидесяти лет;

- космические съемки должны соответствовать различным периодам времени обустройства инженерных сооружений (объекта исследований), в том числе времени, предшествующем началу их строительства.

В некоторых случаях космические данные сверхвысокого разрешения можно заменить фото- или цифровыми аэросъемками, а ретроспективные данные — отсканированными и координатно привязанными топографическими картами соответствующих годов съемки.

При проведении геокриологического дешифрирования необходимо выявить характер распространения мерзлых и талых пород, слоев сезонного протаивания/промерзания, оценить глубину залегания верхней поверхности многолетнемерзлых пород и установить их температуру. Это можно осуществить на основе геоиндикаторов, к которым относятся состав, высота, сомкнутость древостоя, подлеска и кустарников; господствующие виды трав и мохово-лишайникового покрова.

Степень прерывистости толщ мерзлых пород, тип и размеры таликов следует оценивать по строению речных долин и густоте размещения и величине термокарстовых озер.

Состав и льдистость многолетнемерзлых пород можно установить по материалам аэрокосмических съемок по таким особенностям рельефа, как степень и характер расчленения, распределение определенных форм рельефа.

Характер проявления опасных геокриологических процессов устанавливается путем дешифрирования на космических изображениях оползней, растрескивания, бугров пучения, полигонального рельефа, термоэрозии, термоабразии, термокарстовых процессов и т.д. (рис. 4.25).

Получаемая при дешифрировании информация позволяет дифференцировать исследуемую территорию по сложности геокриологических условий, оконтурить участки с различным типом распространения мерзлых пород (сплошное, несплошное, островное).

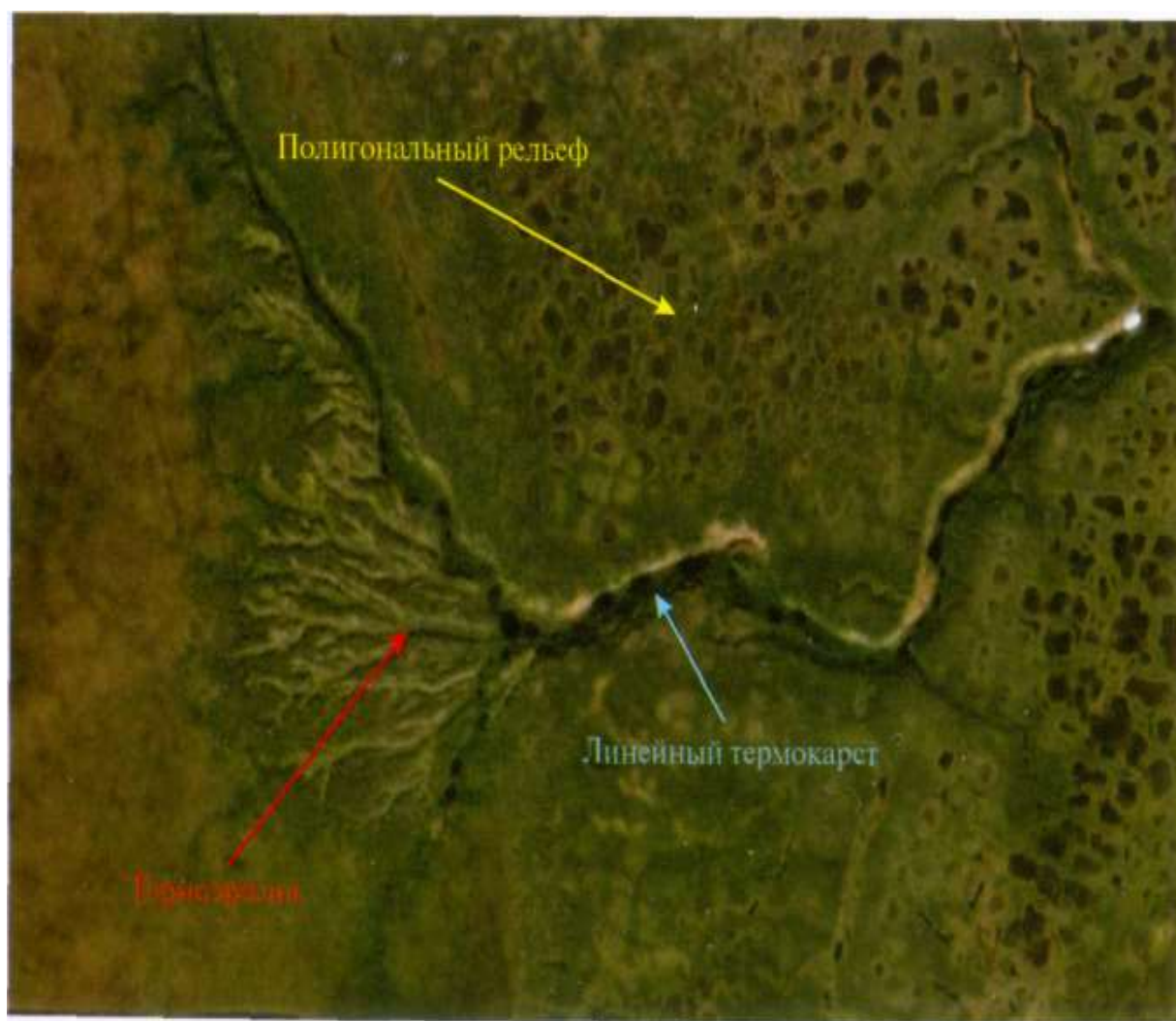


Рис. 4.25. Пример дешифрирования опасных геокриологических процессов

Геоиндикаторами геокриологических процессов в областях распространения многолетней мерзлоты являются и формы рельефа. Так, в условиях малоснежных или вовсе бесснежных зим температура мерзлой породы понижается очень сильно, при этом заметно уменьшается ее объем. Вследствие этого образуются морозобойные трещины, уходящие в глубину намного дальше, чем мерзлая порода может оттаять летом. Весной эти трещины заполняются водой, осенью вода замерзает и расширяет трещины, в которых постепенно образуются ледяные клинья, причем сами эти клинья с поверхности не видны. Грунт, постепенно накопившийся в таких клиньях, имеет совершенно другой режим увлажнения, чем между ними, поэтому полосы вдоль трещин хорошо выделяются по растительности и видны на аэрокосмоснимках.

Дешифрирование космических изображений позволяет

выделить многоугольники (полигоны), ограниченные трещинами, которые имеют в поперечнике от одного-двух десятков до нескольких сотен метров. В зависимости от состава грунтов температурного режима полосы вдоль морозобойных трещин могут возвышаться над уровнем полигонов или быть ниже их (рис. 4.26).

Другим примером формы рельефа-индикатора опасных геокриологических процессов являются расположенные на склонах ложбины, направленные сверху вниз и не несущие следов руслового стока. Такие ложбины - делли (от нем. *delle* - углубление, впадина) — служат переходным звеном от форм, создаваемых плоскостным смывом, к формам, которые образуются эрозией временных русловых водотоков. Хотя делли могут образоваться и без участия мерзлоты, характерные системы частых параллельных углублений образуются только на многолетнемерзлых породах (рис. 4.27).

Многолетняя мерзлота оказывает влияние на рельеф, поскольку вода и лед имеют разную плотность. Вследствие этого замерзающие и оттаивающие породы претерпевают деформации. Важным фактором влияния многолетней мерзлоты на рельеф является и то обстоятельство, что мерзлый грунт не пропускает воду. Наиболее распространенный тип деформации мерзлых грунтов - пучение, связанное с увеличением объема воды при замерзании (рис. 4.28).

Летом верхний слой многолетней мерзлоты оттаивает. Лежащая ниже мерзлота мешает талой воде просачиваться вниз. Если вода не находит стока в реку или озеро, то она остается на месте до осени, где снова замерзает. Весной оттаивание идет, как правило, сверху вниз, вследствие выравнивания температур уже прогретого воздуха и еще холодного грунта. Осенью изменение температур быстрее происходит в воздухе и промерзание поверхностных слоев также идет сверху вниз. В результате талая вода оказывается между водонепроницаемым слоем постоянной мерзлоты (снизу) и постепенно нарастающим сверху вниз слоем новой сезонной мерзлоты. Поскольку лед занимает больший объем, чем вода, последняя, оказавшись под огромным давлением между двумя слоями льда, находит наиболее слабое место в сезонном мерзлом слое и прорывает его.¹ Если вода изливается на поверхность, то образуется ледяное поле — наледь (рис. 4.29). По краям наледи идет интенсивное морозное выветривание.

Если на поверхности имеется плотный мохово-травяной покров или слой торфа, вода может не прорвать его, а только приподнять, растекшись под ним. Замерзнув, она образует ледяное

ядро бугра. Постепенно нарастая, такой бугор может достигнуть высоты 70 м при диаметре до 200 м. Такие формы рельефа называются гидролакколитами (рис. 4.30). В России для их обозначения употребляют также якутское слово «булгуннях», а в Канаде и США на Аляске -эскимосское «пинго».

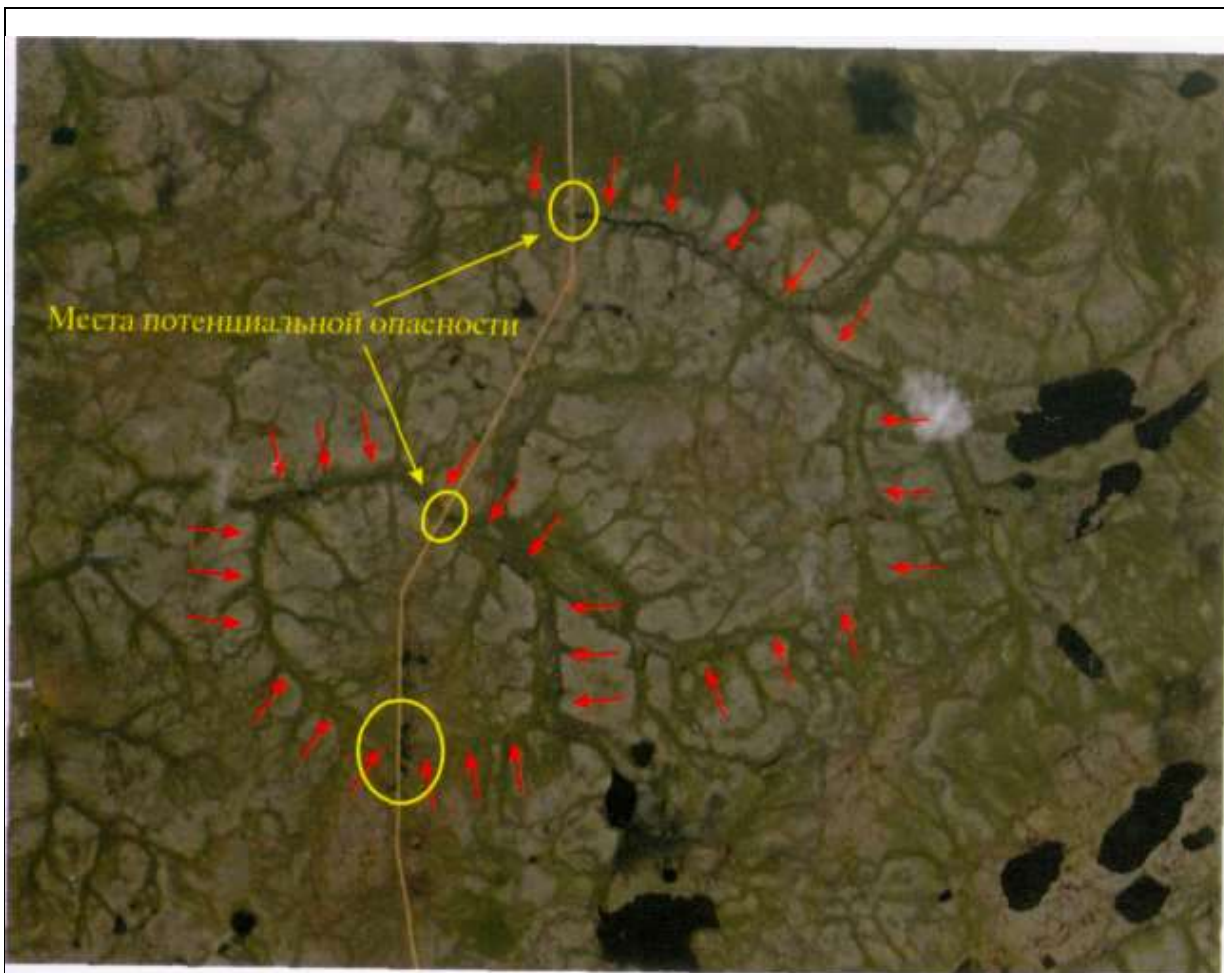


Рис. 4.26. Форма рельефа как геоиндикатор опасных геокриологических процессов

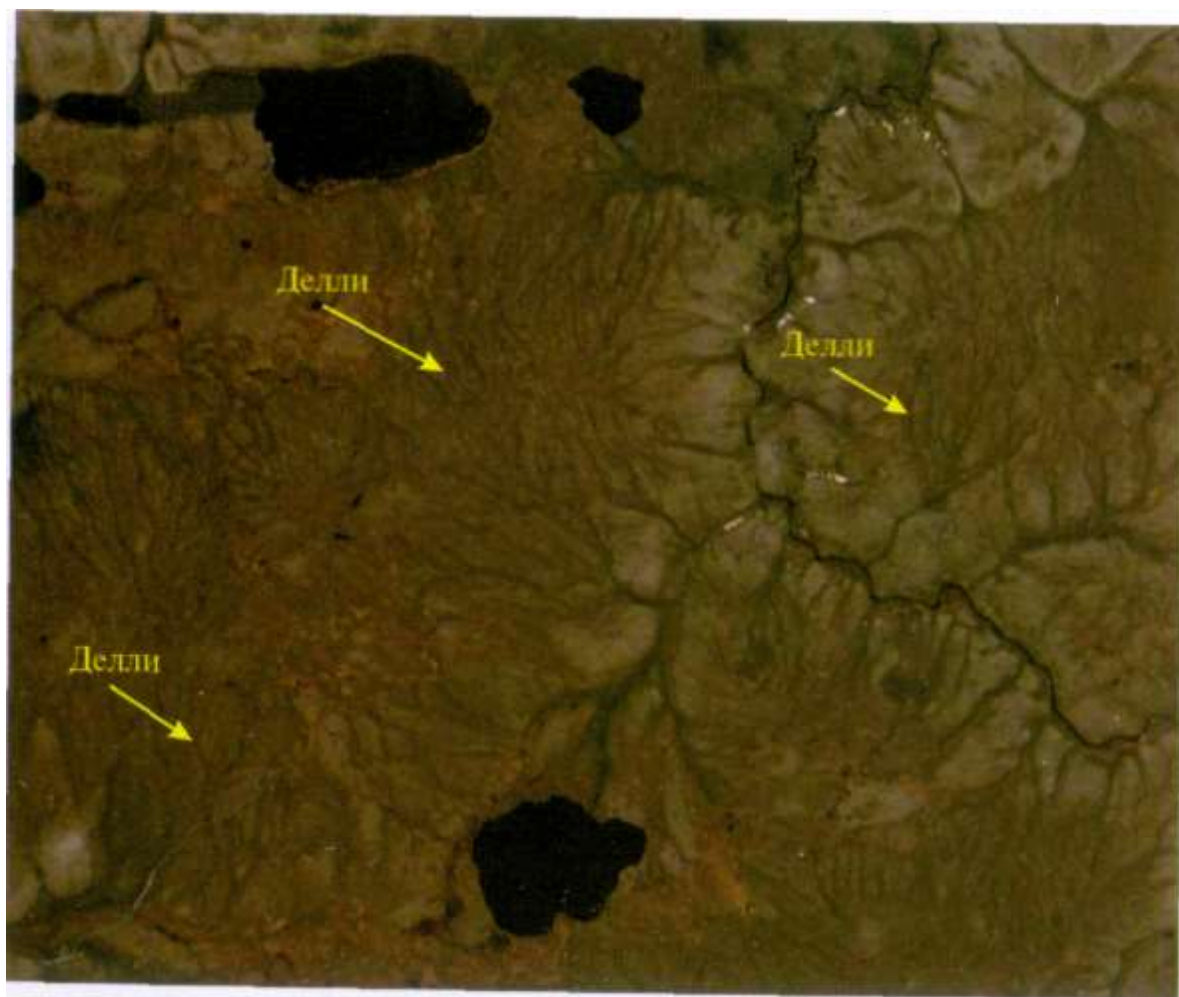


Рис. 4.27. Пример геоиндикатора опасных геокриологических процессов — делли



Рис. 4.28. Вид булгуннях на космоснимке

Грунт, оттаивающий летом на склонах, нередко оказывается водонасыщенным и легко сползает по поверхности мерзлого слоя. Это сползание — солифлюкция — происходит неравномерно, на склоне образуются неровные ступени высотой до 3—4 м — солифлюкционные террасы (рис. 4.31).

В условиях многолетней мерзлоты, особенно при высоком содержании льда в мерзлой породе, вода производит на породу не только механическое, но и температурное воздействие. Растапливание льда способствует разрушению породы. Разновидности этого процесса — термоэрозия (рис. 4.32) и термоабразия (рис. 4.33). Первая проявляется в том, что реки легко размывают берега, а овражная сеть достигает невероятной густоты даже в условиях очень плоского рельефа, характерного, в частности, для п-ва Ямал. Вторая иногда вызывает быстрое отступление берегов под действием морских волн.

Формы рельефа, связанные с многолетней мерзлотой, могут находиться и там, где в настоящее время мерзлота отсутствует, т.е. иметь реликтовый характер. Примером являются регионы средней и южной частей Республики Коми: сейчас здесь нет многолетней мерзлоты, но нередко встречающиеся неглубокие округлые озера,

сетка полигональных грунтов, особенно хорошо проявленная на высоких речных террасах, хорошо читаются на аэрофотоснимках



Рис. 4.29. Наледь «Буллуус» в Якутии, вид на космоснимке (вверху) и на местности (внизу)

При дешифрировании космических снимков не все геоиндикаторы одинаково проявляются в узких зонах электромагнитного спектра, которым соответствуют различные каналы аэрокосмических съемочных систем. Индикаторы, связанные с изменениями в растительности, лучше всего отражаются в видимом (0,6—0,7 мкм) и ближнем инфракрасном (0,7—0,9 мкм) диапазонах, а связанные с изменениями в горных породах -- в ближнем (0,7—0,9 мкм) и коротковолновом инфракрасном диапазонах (1,6—1,7; 2—2,4 мкм). Диапазон (2,27-2,46 мкм) наиболее пригоден для определения притоков углеводородных

флюидов (и экологии), так как в нем фиксируется абсорбция углеводородов.



Рис. 4.30. Гидролакколит на фотоснимке



Рис. 4.31. Солифлюкционная терраса на фотоснимке (см. также рис. 4.22—4.23)

Информация, получаемая по материалам космических съемок, зависит не только от их разрешающей способности, но и генерализации изображений, а также их обзорности. Этим космические снимки выгодно отличаются от аэроизображений. С другой стороны, космические данные высокого разрешения и аэроснимки содержат легко считываемую информацию об инфраструктуре и техническом состоянии объектов газовой

промышленности (обустройство месторождений и промышленных зон, пространственное расположение буровых скважин, трубопроводов, коммуникаций) (рис. 4.34).



Некоторые исследователи рассматривают возможность дешифрирования материалов сверхвысокого разрешения, особенно аэрогиперспектральных изображений, как метод выявления слабых ландшафтных аномалий. Такие аномалии связываются с напорными рассолами с отрицательными температурами — криопэгами, являющимися весьма агрессивной коррозионной средой для любых инженерных сооружений, и с наличием в разрезе газопроявлений с существенным начальным максимальным дебитом до 13 000 м³ в сутки. Выявленные аномалии необходимо учитывать при бурении эксплуатационных скважин, поскольку их недоучет чреват выбросом газа с образованием его взрывоопасной концентрации



Рис. 4.34. Состояние объекта инфраструктуры (ЛЭП), находящегося в зоне развития геокриологического процесса: на снимке (вверху, красные линии) и на местности (внизу)

В табл. 4.1 сведены рекомендации по использованию тех или иных космических снимков в зависимости от решения конкретных задач геоэкологического мониторинга. Три плюса (+++) обозначены космические материалы, оптимально подходящие для выявления контролируемых параметров. Два плюса (++) обозначены материалы, использование которых возможно, но с некоторыми ограничениями. Ограничения связаны преимущественно с пространственными размерами природных и техногенных явлений и их отображениями на тех или иных материалах космической съемки. Один плюс (+) означает, что данные космические материалы могут быть использованы как вспомогательные, т.е. только для получения общих сведений о тех или иных опасных процессах и явлениях. Минус (—) означает, что данные материалы не применяются.

Объекты мониторинга		Диапазон аэрокосмического				Контролируемые параметры
		видимый и		радарный		
		Разрешение				
		высокое	средн ее	низк ое	средн ее и высок ое	
Криогенные сплывы	Солифлюкция	+++	++	-	-	Скорость и направление действия геокриологических процессов; координаты, размеры, морфология и границы опасных геокриологических объектов; крутизна и экспозиция рельефа; наличие и характер разрушений объектов инфраструктуры месторождений; площадь подтоплений, произошедших в результате воздействия опасных геокриологических процессов и явлений
	Криогенные оползни скольжения	+++	++	-	+	
Опасные техногенные процессы и явления						
Нарушение почвенно- раститель- ного покрова	Разработка карьеров, планировка поверхности, сооружение отсыпок, прокладка коммуникаций	+++	++	-	+	Координаты, размеры и морфология, обводненность, наличие термокарста
Изменение поверх- ностного и грунтового стока	Автодороги; кусты скважин, площадные отсыпки, линейные коммуникации	++ +	++	-	+	Координаты, размеры и морфология, наличие перетоков

Прямое тепловое воздействие	Эксплуатационные скважины, подземные трубопроводы, аппараты охлаждения газа, сезонноохлаждающие устройства	++ +	-	-	-	Участки растепления многолетнемерзлых пород, просадки, подтопления, термокарст
Механическ ие нагрузки	Фундаменты зданий и сооружений, насосное оборудование, газоперекачивающие агрегаты	++	-	-	+++	Просадки поверхности и ее кривизна
Химическое загрязнение	Буровые реагенты, разливы ГСМ, ава- рийные сбросы технологических жидко- стей	++ +	-	-	-	Изменения яркостных характеристик изображения, цветовые аномалии
Техногенно- инициро ванная сейсмичнос ть	Сейсмодислокации	++	++	+	+++	Линеаменты, сейсмодислока-ции, суммарные смещения земной поверхности

Системы дешифровочных признаков. Виды дешифрирования

В процессе космического мониторинга выявление и анализ контролируемых параметров опасных природных и техногенных процессов и явлений устанавливаются на основе системы дешифровочных признаков.

Дешифровочные признаки — это такие особенности космического изображения, которые позволяют сопоставить его с теми или иными природными или техногенными объектами.

Дешифровочные признаки делятся на прямые и косвенные.

Прямые дешифровочные признаки относятся непосредственно к выделяемому объекту и выражают в словесной форме его образ. Например, прямыми дешифровочными признаками антиклинальной складки будут концентрический рисунок фотоизображения (соответствующий деформированным слоям) и определенная ориентировка пластовых треугольников; прямым признаком сдвига является смещенный по прямой линии параллельно-полосчатый рисунок фотоизображения, соответствующий слоистости; термокарстовое озеро может выглядеть на изображении как область однородного (темного) тона округлой формы и т.д.

Под косвенными дешифровочными признаками понимаются особенности изображения определенных элементов ландшафта, раскрывающие непосредственно не наблюдаемые природные процессы и явления. Другими словами, косвенные признаки описывают переходы от тонально-геометрических и ландшафтных моделей к моделям геологическим. Например, косвенный дешифровочный признак молодого разрыва — трассирующиеся по одной прямой линии эрозионные понижения или зоны линейного термокарста (на космическом снимке это линейные фотоаномалии) и т.д.

Очевидно, что отнесение дешифровочных признаков к прямым или косвенным зависит как от задачи дешифрирования, так и от типа сформированной модели космического изображения.

Независимо от характера изображений и передаваемой ими информации для дешифрирования имеют значение девять основных признаков объектов:

- *форма*. Многочисленные компоненты окружающей среды можно достаточно уверенно распознать по их очертаниям или форме. Это справедливо как в отношении природных, так и антропогенных образований;

- *размер*. Во многих случаях важно учитывать длину, ширину, высоту, площадь или объем изображенных объектов. Часто о масштабе многих объектов снимка судят, сравнивая их со знакомыми элементами местности, например, такими, как кустовые площадки эксплуатационных скважин или трубопроводы;

- *тон*. Разные объекты излучают или отражают электромагнитные волны разной длины и энергии. Эти различия могут выражаться на снимках изменениями в тоне, цвете или плотности изображения, что и служит ключом к их дешифрированию (например, аллювиальные отложения по берегам рек - белые, заболоченные участки тундры - темные, почти черные);

- *тень*. По теневому силуэту можно определять характер формы объектов, например на снимках высокого разрешения легко опознаются тени от вышек буровых скважин;

- *облик*. На снимках часто обнаруживаются природные (и искусственные) комплексы сходного облика. Это обстоятельство во многом облегчает дешифрирование, особенно при анализе и картировании сложных составных образований, а не их элементарных составляющих (например, комплекс сооружений УКПГ);

- *текстура*. Эта важная качественная характеристика изображений тесно связана с тоном и позволяет выделить участки изображения с одинаковым рисунком, обусловленным сочетанием микротоновых различий. К числу распространенных текстур можно отнести гладкие, волнистые, пятнистые, линейные, а также текстуры с нерегулярным рисунком. Анализ текстур достаточно субъективен. Вместе с тем, текстура редко бывает единственным критерием распознавания и корреляции характеристик, используемых в процессе дешифрирования. Часто текстура привлекается как основа для подразделения образований, уже выявленных с помощью более четких критериев. Например, снимки различных пород могут иметь одинаковый тон, но разную текстуру (известняки и галогенные отложения соляных куполов);

- *местоположение*. На заключительном этапе дешифрирования интерпретацию и классификацию некоторых объектов удается уточнить по их местоположению относительно других, более понятных объектов. Например, складка неясной природы, расположенная между двумя антиклиналями, является, скорее всего, синклиналью; разрыв, соединяющий окончания кулисно расположенных надвигов, как правило, оказывается сдвигом, и т.д.;

- *разрешение на местности*. Разрешающая способность снимка зависит от особенностей аппаратуры дистанционных измерений, состояния окружающей среды во время наблюдений, а также от

последующей обработки полученной первичной информации. Разрешающая способность всегда лимитирует размер и, следовательно, во многих случаях характер объектов, которые могут быть опознаны. Некоторые объекты всегда оказываются слишком маленькими, чтобы получиться на снимке, другие имеют нерезкие или неясные очертания;

- *объемная модель*. Стереоскопическая (3D) модель космического изображения дает информацию, которую невозможно получить с отдельного снимка. Например, солифлюкционные террасы всегда расположены на склонах рельефа.

Дешифрирование космических изображений бывает визуальное и автоматизированное.

Начальным этапом визуального дешифрирования является выделение структурных неоднородностей, т.е. площадных и линейных элементов изображения, отличающихся по типам структурного облика. Распознавание происходит путем сравнения выделенных особенностей космического изображения со знакомыми образами известных объектов.

Фактически дешифрирование изображений осуществляется на основе базы знаний, главными элементами которой являются образы геологических, геоморфологических, геокриологических, ландшафтных, инженерных и др. объектов, а также сведения об их пространственных и временных отношениях и причинных связях.

Главным фактором визуального дешифрирования, обеспечивающим распознавание на космическом изображении тех или иных объектов, является соотнесение космического изображения и представлений об образе, т.е. знания о том, как объект выглядит в природе и как он изображается на космических снимках. Это знание хранится либо в памяти исследователя и опирается на предыдущий опыт, либо в специально создаваемых банках образов (например, каталогах космических снимков тех или иных геологических образований).

В настоящее время результаты дешифрирования принято трансформировать в векторную форму и интегрировать в ГИС-проекты (рис. 4.35).

схема *Рис. 4.35. Схема технологии выявления и мониторинга опасных геокриологических процессов*

При автоматизированном дешифрировании исходная информация, получаемая с помощью современных цифровых

аэрокосмических систем дистанционного зондирования, представляет собой совокупность многомерных данных, отражающих пространственную и спектральную изменчивость наземных объектов. В связи с этим можно выделить две основные группы алгоритмов обработки аэрокосмических изображений: алгоритмы на основе спектральных характеристик и алгоритмы на основе пространственных характеристик. В качестве спектральных признаков чаще используется линейная комбинация - коэффициентов спектральной яркости, позволяющая произвести разделение спектральных образов изучаемых объектов в N-мерном пространстве признаков с последующей классификацией. Среди пространственных методов дешифрирования можно выделить вейвлет-анализ, Фурье-анализ, различные варианты метода анализа размерностей и т.д.

ГЛАВА 5. О КЛАССИФИКАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА ПО СТЕПЕНИ ПРИРОДНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Одной из первоочередных задач, возникающих при эксплуатации нефтегазовых объектов, является мониторинг их состояния с целью обеспечения промышленной безопасности месторождений, а также для предупреждения последствий разрушений объектов инфраструктуры. В случае большого количества месторождений встает вопрос о порядке проведения подобного мониторинга, что обуславливает необходимость в разработке метода классификации месторождений по степени их потенциальной опасности.

Метод классификации месторождений

Для определения первоочередных объектов мониторинга разумно выбрать следующие данные, совокупно характеризующие степень опасности месторождения:

- толщина продуктивных отложений (thickness of deposit, T , $[T] = \text{м}$);
- глубина залежи (mining depth, D , $[D] = \text{м}$);
- площадь месторождения (deposit area, A , $[A] = \text{м}^2$);
- срок эксплуатации (operation life, L , $[L] = \text{годы}$);
- накопленная добыча (production output, O , $[O] = \text{т у.т.}$);
- количество скважин, находящихся в консервации более 15 лет (number of suspended wells, TV , $[N] = \text{шт}$).

Указанные параметры можно объединить в два составных. Действительно, первые три параметра, а именно мощность продуктивных отложений, глубина разработки и площадь месторождения, не зависят от степени технической активности (человека) на территории горного отвода, поэтому их можно считать составляющими (интегральной) природной опасности ($I?_N$), определяемой как

$$I?_N = a, \text{ — } A.$$

(5.1)

Здесь a , - некоторый коэффициент, $[a] = 1/[A]$. В свою очередь, срок эксплуатации месторождения, накопленная добыча и количество законсервированных скважин являются антропогенными факторами, ввиду чего их логично объединить в (интегральную) техническую опасность ($I?_T$)

$2LON.$

Здесь a_2 - также некоторый коэффициент, $[a_2] = 1/([J][0][jV])$. Обе величины, $I?_N$ и RJ , являются безразмерными параметрами, измеряемыми в относительных единицах. Кроме того, отдельным фактором, характеризующим месторождение с точки зрения его экологической безопасности, должно считаться количество населения (population, P , $[P] = \text{чел.}$), проживающего на территории горного отвода.

Таким образом, триплет $(I?_N, D_T, P)$ определяет трехмерное фазовое пространство с соответствующей системой координат, точками которого являются месторождения из интересующей нас базы данных. После определения местоположения каждого из них, т.е. после задания соответствующих точек $(\wedge_N i? \wedge_{Ti}, P_i)$ в фазовом пространстве, требуется провести нормировку полученного набора данных согласно формулам

$$\begin{aligned} & \wedge_{T,i} \\ & \wedge_{T,i} \text{ тахЯт/} \\ & (5.3) \end{aligned} \quad R$$

Другой вариант $3 =$ нормировки может быть основан на выборе некоторой базовой точки $(R^{\wedge} |, I?_{jj}, P?)$ в фазовом пространстве, определяющей месторождение с максимальными значениями опасностей и народонаселением. Тогда нормировку следует производить согласно формулам

$$\begin{aligned} & \text{йт-:} \\ & \text{' } D^* \\ & \text{' } \wedge_{T,i} \text{ _fl} \end{aligned}$$

Надо вписать формулы здесь и далее

Выбор того или иного метода нормировки обусловлен возможностью или невозможностью выбора базовой точки. Другими словами, если о некотором месторождении заведомо известно, что оно представляет высокую опасность с точки зрения разрушений объектов инфраструктуры и возможных последствий для жителей близлежащих населенных пунктов, то его следует принять за эталон и проводить нормировку по формулам (5.4); в противном случае следует воспользоваться формулами (5.3).

Для наглядности представления месторождения $(I?_N, I?_{Ti}, P_i)$ можно объединить в кластеры в фазовом пространстве. Так, при

разбиении на восемь кластеров фазовое пространство (J_N, I_T, P) будет содержать восемь эллипсов, показывающих, какие из месторождений относятся к объектам с низкой/высокой природной опасностью, низкой/высокой технической опасностью и низким/высоким народонаселением. Однако остается неясным, как провести сравнительную классификацию месторождений; например, как сравнивать месторождения с низкой природной, но с высокой технической опасностью с месторождениями, скажем, с высокой природной опасностью, но с низким уровнем народонаселения?

Для проведения четкой классификации месторождений по степени опасности после нормировки (5.3) или (5.4) полученные точки (R_N, I_T, P) необходимо спроецировать на главную диагональ единичного куба (т.е. ту, что соединяет точки $(0, 0, 0)$ и $(1, 1, 1)$) в фазовом пространстве по формулам

$$x_i = \frac{R_N}{J_N}, y_i = \frac{I_T}{I_T}, z_i = \frac{P}{P} \quad (5.5)$$

Тем самым возможно провести классификацию месторождений по степени потенциальной опасности, разбив их на несколько кластеров. В простейшем случае — если нет каких-либо априорных данных — интервал $[0, 1]$ разбивается на m равновеликих подынтервалов, и те месторождения, для чьих координат выполняется неравенство $(i - 1)/m < x_i \leq i/m$, будут отнесены к i -му кластеру. Чем выше номер кластера, тем большую потенциальную опасность представляют соответствующие месторождения. Например, если $m = 3$, то те точки из (5.5), чьи координаты будут больше 0,67, определяют месторождения, представляющие наибольшую опасность в смысле возможных разрушений объектов инфраструктуры; те точки, чьи координаты будут меньше 0,33, представляют месторождения, представляющие наименьшую опасность; оставшиеся точки (с координатами от 0,33 до 0,67) соответствуют месторождениям промежуточного типа.

98

Модельный пример

Пусть в базе данных имеется набор требуемых параметров некоторых месторождений (табл. 5.1). Применение метода классификации с нормировкой по формулам (5.3) дает распределение месторождений в фазовом пространстве (J_N, I_T, P) , показанное на рис. 5.1. Соответствующие значения природной и технической опасности приведены в табл. 5.2.

Из полученных результатов видно, что различие хотя бы в одном параметре переводит месторождение из одной группы опасности в другую.

Например, несмотря на то что на территориях месторождений № 5 и 8 имеется примерно равное количество населения (13091 vs. 13459 соответственно -

Таблица 5.1

Месторождения некоторого региона и их параметры

Номер							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							

Таблица 5.2

Природная и техническая опасность для рассматриваемых месторождений (результаты нормированы к диапазону [0, 1] согласно формулам (5.3))

Номер	«N	* _T
1	0.814	1.000
2	0.174	0.000
3	0.086	0.000
4	0.064	0.416
5	1.000	0.233
6	0.588	0.160
7	0.168	0.448
8	0.157	0.122
9	0,480	0,643

99

столбец Ртабл. 5.1), природная опасность второго из них значительно меньше (1,000 vs. 0,157 соответственно — столбец /?N табл. 5.2), ввиду чего месторождение № 8 относится к группе месторождений со средней степенью опасности. Опасности же,

связанные с месторождением № 5, существенны, и поэтому оно относится к третьей группе, представляющей наиболее опасные месторождения (рис. 5.2). Вообще, первоочередными кандидатами на проведение мониторинга

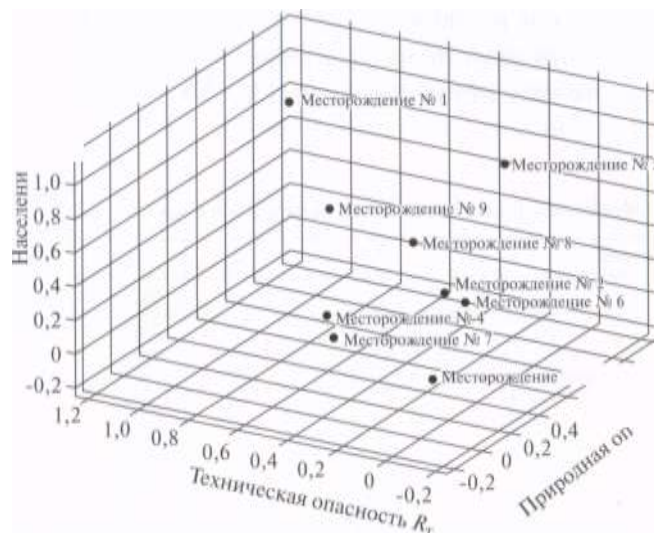


Рис. 5.1. Распределение месторождений в фазовом пространстве (R_N , $R^A P$)

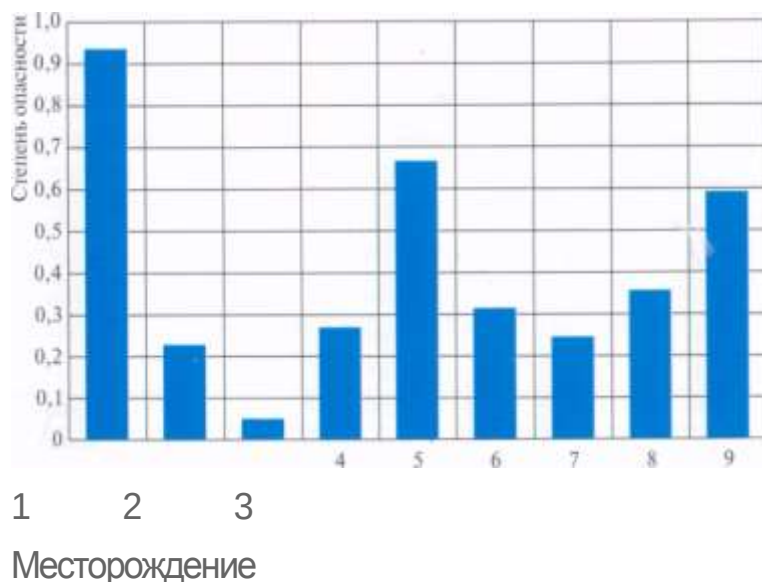


Рис. 5.2. Классификация месторождений в фазовом пространстве (R_N , R_T , P)

100

Здесь рисунок 5.3.5.4- не получилось вставить

№ 1 и 5, затем — месторождение № 9, а мониторинг на остальных месторождениях может быть проведен в последнюю очередь.

Возможные модификации метода

В случае когда значения тех или иных параметров, определяющих степень опасности месторождения, неизвестны, можно попытаться заменить их другими, имеющимися, с обязательным обоснованием подобной замены. Так, например, если данных по количеству народонаселения вблизи интересующих нас месторождений нет, то косвенно эту роль может играть параметр накопленной добычи. Действительно, чем больше величина Q , тем, как представляется авторам, больше размер месторождения, и, следовательно, тем большее количество специалистов требуется для его разработки, что в совокупности и определяет величину P . Вместо накопленной добычи для оценки параметра P можно выбрать также и другие величины, причем не обязательно из тех, что перечислены в начале главы.

На рис. 5.3 показано распределение месторождений из табл. 5.1 в фазовом пространстве (R_N , L_T , O). На рис. 5.4 приведена соответствующая классификация месторождений. Из сравнения рис. 5.2 и 5.4 видно, что в целом картина изменилась незначительно и наибольшее изменение произошло в группе месторождений со средней степенью опасности.

Так, в группу с наибольшей опасностью по-прежнему входят месторождения № 1 и № 5, а в группу с наименьшей опасностью — месторождения № 3, 4, 7. Группа опасности промежуточного типа пополнилась месторождениями № 2, 6, причем оба из них находятся вблизи нижней границы группы, что дает возможность полагать, что проводить на данных месторождениях мониторинг следует если и раньше, то не в значительной степени, чем на месторождениях № 4, 7.

ГЛАВА 6

ПОИСК МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА И ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ЛИЦЕНЗИОННЫХ УЧАСТКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Дистанционная геологоразведка

Конечной целью геологоразведочного процесса является обнаружение месторождений полезных ископаемых (в частности — углеводородов). Большинство существующих в настоящее время методов поисков и разведки можно разделить на две группы: в первую группу войдут те методы, что позволяют косвенно получить информацию о вещественном составе разреза (их принято называть прямыми), во вторую - те, что позволяют определить структурные характеристики разведываемой толщи - геометрию разрывных нарушений и пластов. Такой подход достаточно условен, поскольку интерпретация результатов любого из известных методов может быть направлена на выявление как структурной, так и вещественной составляющей. Бурение как метод геологоразведочных работ (ГРП) в этой монографии авторы не рассматривают, считая его результаты проверочными. Иными словами, бурение подтверждает либо опровергает наличие месторождения углеводородов, спрогнозированного с помощью других методов геологоразведки.

Такие методы, как электро- и магниторазведка, гравиразведка и газовая съемка, в настоящий момент имеют модификации для исследований с авиатехники, а в случае гравиразведки — с космических аппаратов.

Парадигма современного подхода к геологоразведочным работам на нефть и газ сложилась таким образом, что сейсморазведка вытеснила практически все остальные методы из процесса изучения недр. Это связано с великолепными результатами, которые дает 3D-сейсморазведка при изучении структуры залежи, а также с достижениями атрибутного анализа при прогнозировании фильтрационно-емкостных свойств резервуара (имеется в виду нахождение связи между формой отраженного сейсмического сигнала и физическими свойствами, например пористостью коллектора). Однако, следуя стадийности геологоразведочных работ, 3D-сейсморазведку, как правило, проводят на стадии подготовки объектов к поисковому бурению, т.е. на уже выявленных ловушках УВ. На предшествующей ей стадии выявления объектов поискового бурения, на которой, собственно, и выявляются ловушки УВ, используют 2D-сейсморазведку. Недостатком последней является то, что, определяя

местоположения структурных ловушек, она, тем не менее, не позволяет судить об их продуктивности, поскольку каждый сейсмический профиль обрабатывается отдельно, со своими параметрами графа обработки, так что проводить атрибутный анализ оказывается некорректно. По той же причине применение 2D-сейсморазведки проблематично для выделения неструктурных ловушек.

Таким образом, при принятии решений о приобретении в собственность того или иного лицензионного участка будущий недропользователь зачастую имеет в своем распоряжении только редкую сеть сейсмических профилей, одну-две разведочные или параметрические скважины и структурные карты с поднятиями-ловушками, выявленными по 2D-сейсморазведке. Вопрос о наличии углеводорода в этих ловушках остается открытым. Поэтому возникает задача оценивать наличие УВ на предлагаемом лицензионном участке, не проводя дорогостоящие наземные геологоразведочные работы. Более того, иногда на предынвестиционной стадии освоения лицензионных участков проводить наземные геологоразведочные работы не представляется возможным в силу законодательных ограничений.

Оценить перспективность лицензионного участка без проведения наземных ГРП возможно с использованием методов дистанционной геологоразведки.

Под дистанционной геологоразведкой на нефть и газ понимается комплекс мероприятий, направленных на обнаружение месторождений УВ или оценку нефтегазоперспективности участков недр, проведение которых возможно с летательных аппаратов — как авиационных, так и космических. Дистанционная геологоразведка включает также комплексную интерпретацию вновь полученной информации и архивных данных геолого-геофизических работ.

Интерпретация данных дистанционного зондирования Земли при поиске углеводородов

Микропросачивание

Интерпретация данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочном процессе на нефть и газ направлена на обнаружение, помимо непосредственно структур, признаков наличия углеводородов в разрезе через их проявления на земной поверхности. Фундаментальным фактором, влияющим на процессы, происходящие на дневной поверхности, является микропросачивание углеводородов (англ.: *hydrocarbon microseepage*) из ловушек в вышележащие пласты.

Теория микропросачивания углеводородов берет свое начало в

80-х гг. XX в. в работах Т. Donovan, R. Forgey, A. Roberts, H. Machel, S. Pirson (США), В.М. Берёзкина, В.М. Новоселицкого, Н.И. Туезова (СССР) и ряда других исследователей. Основная идея теории микропросачивания связана с вторичным образованием минералов под влиянием мигрирующих из залежи через покрывку углеводородов (рис. 6.1). Известно, что из залежи через покрывку происходит постоянный вынос как углеродных (C_mH_n), так и неуглеродных (H_2S , CO_2 , H_2 , CO , He и др.), но химически активных компонентов, которые, мигрируя, могут достигать дневной поверхности, изменяя геохимические особенности ландшафтов над месторождением.

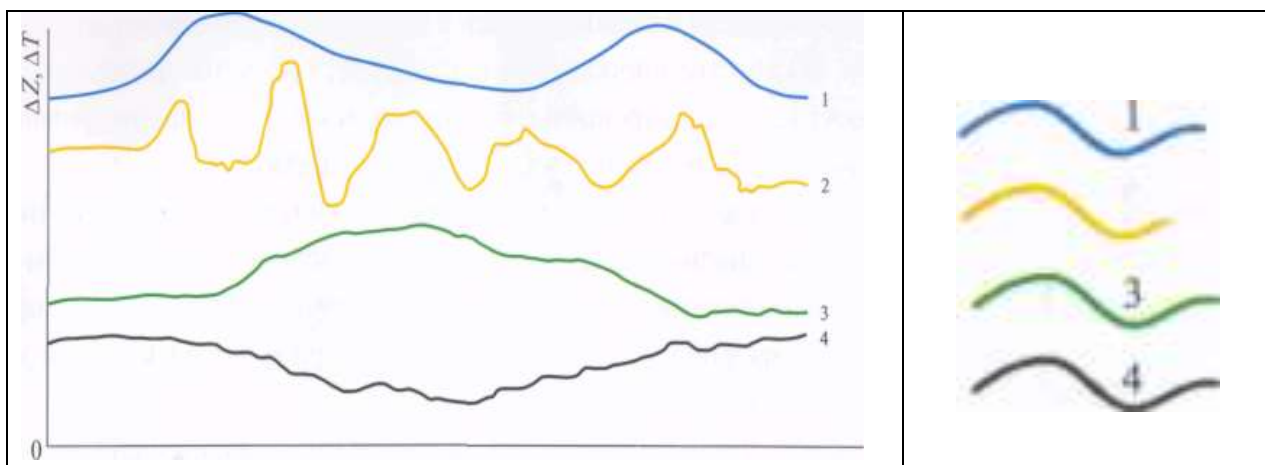
Под воздействием мигрирующих УВ в вышезалегающих породах изменяются окислительно-восстановительный потенциал, кислотно-щелочной показатель и минеральный состав пород. Эпигенетические минералообразования происходят во всем разрезе над залежью. В нижних слоях наблюдается образование кремнезема, глинозема, выше кальцита, сидерита. В верхних терригенных отложениях, в которых содержатся первичные железистые соединения (гематит Fe_2O_3), под воздействием УВ образуются различные магнитные минералы (магнетит Fe_3O_4 , магнитный пирротин Fe_7S_8 , грейгит Fe_3S_4 и пр.), а также немагнитные минералы (пирит FeS_2 , сидерит $FeSO_3$).

Предполагается, что в строении субвертикальной зоны над залежью, измененной под влиянием УВ, следует выделять две подзоны: нижнюю, характеризующуюся восстановительным режимом, приводящим к уменьшению содержания магнитных минералов, и верхнюю, окислительную, где, наоборот, предполагается появление вторичных минералов железа (сульфидов).

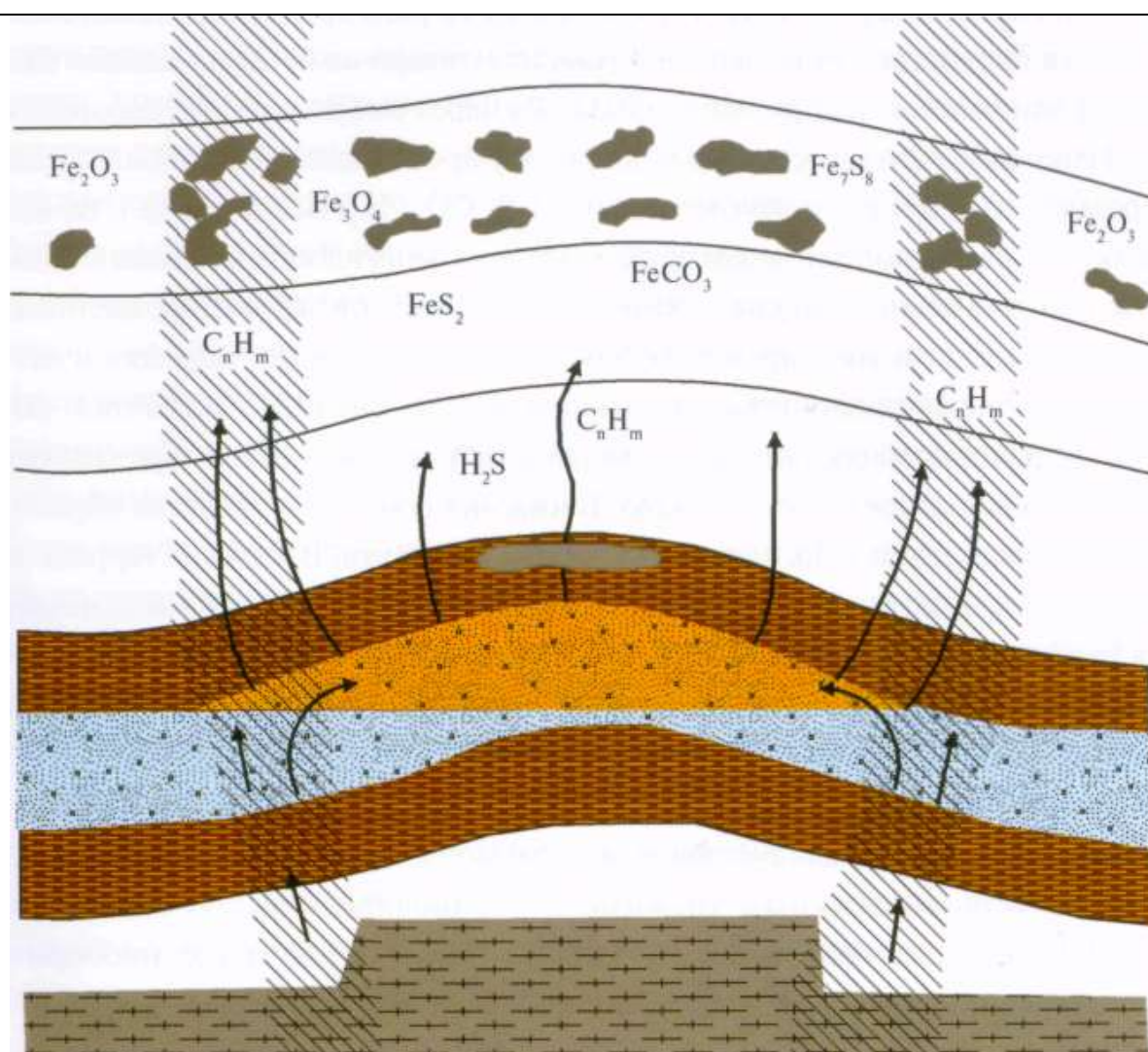
Очевидно, что методы, направленные на идентификацию следов микропросачивания на земной поверхности, относятся к прямым методам поиска, поскольку напрямую говорят о наличии углеводородов в недрах. На основе этих данных геолог получает ответ на вопрос, который обычно получал после бурения: что находится в структурной ловушке, выявленной по сейсморазведке?

Магнитное поле

Влияние УВ на магнитные свойства среды в пределах подводящих путей и вышерасположенной толщи пород неоднозначно. Ни флюид, ни коллектор, его вмещающий, не отличаются своими магнитными свойствами. Объяснить регистрируемые экспериментально изменения магнитного поля над залежью возможно с помощью теории микропросачивания углеводородов (рис. 6.2).



Аномальные кривые магнитного поля, обусловленные вторичными магнитными источниками



Геомагнитная модель нефтегазового месторождения. Условные обозначения: 1 - пути миграции углеводородов, 2 - зоны субвертикальных неоднородностей, вторичные магнитоактивные тела, 3 - нефтяная залежь, 4 - коллектор, подстилающие и перекрывающие (покрышки), 5 - фундамент

Рис. 6.2. Геомагнитная модель нефтегазового месторождения (по [14], с исправлениями и добавлениями авторов

Положительные аномалии свидетельствуют о более-менее равномерной миграции УВ со всей площади залежи с большей интенсивностью в центральной части. В качестве проводящих каналов для просачивания флюида в этом случае могут выступать трещины, в том числе и кливажа, сформированные антиклинальным изгибом пород над выступом фундамента.

Отрицательные аномалии магнитного поля возможно связаны с поступлением из залежи значительного количества сероводорода или выносом железистых соединений из нижезалегающих в восстановительной среде пород. Это может приводить к образованию в верхней части разреза пирита и сидерита вместо магнетита и пирротина.

«Двугорбые» аномалии связаны прежде всего с наличием сильно выраженных субвертикальных зон с более интенсивной миграцией УВ по краям ловушки, нежели в ее центральной части, образованных серией разрывов, пересекающих покрывку и вышележащие толщи. «Колеблющиеся» аномалии обусловлены в первую очередь наличием отдельных изолированных магнито-активных тел.

Амплитуды магнитных аномалий над месторождениями углеводородов, как правило, не превышают 10-15 нТл.

Нельзя, однако, утверждать, что теория микропросачивания снимает все вопросы по интерпретации данных магнитного поля. Так, в Ямало-Ненецком автономном округе над некоторыми нефтегазовыми месторождениями наблюдаются отрицательные аномалии магнитного поля амплитудой до 100—400 нТл (рис. 6.3). Природу столь существенных изменений поля объяснить одним явлением микропросачивания не представляется возможным.

Плотность линейных элементов космических изображений

Наиболее интенсивная миграция УВ идет по зонам субвертикальных неоднородностей (разрывы и зоны трещиноватости), характеризующимся повышенной проницаемостью (рис. 6.2). Помимо возможных путей миграции сгущения разрывов и трещин создают в недрах зоны разуплотнения, улучшающие, в свою очередь, нефтегазоотдачу коллекторов, а в некоторых случаях и формирующие вторичные коллекторы.

Изучение закономерностей пространственного размещения углеводородных объектов свидетельствует об их приуроченности именно к приразломной области - зоне геодинамического влияния разрывных нарушений.

Оценить пространственные размеры и морфологию приразломной области возможно по космическим изображениям, где помимо зоны сместителя разрывов дешифрируется множество конформных, ортогональных и диагональных структурных линий, составляющих их приразломные области.

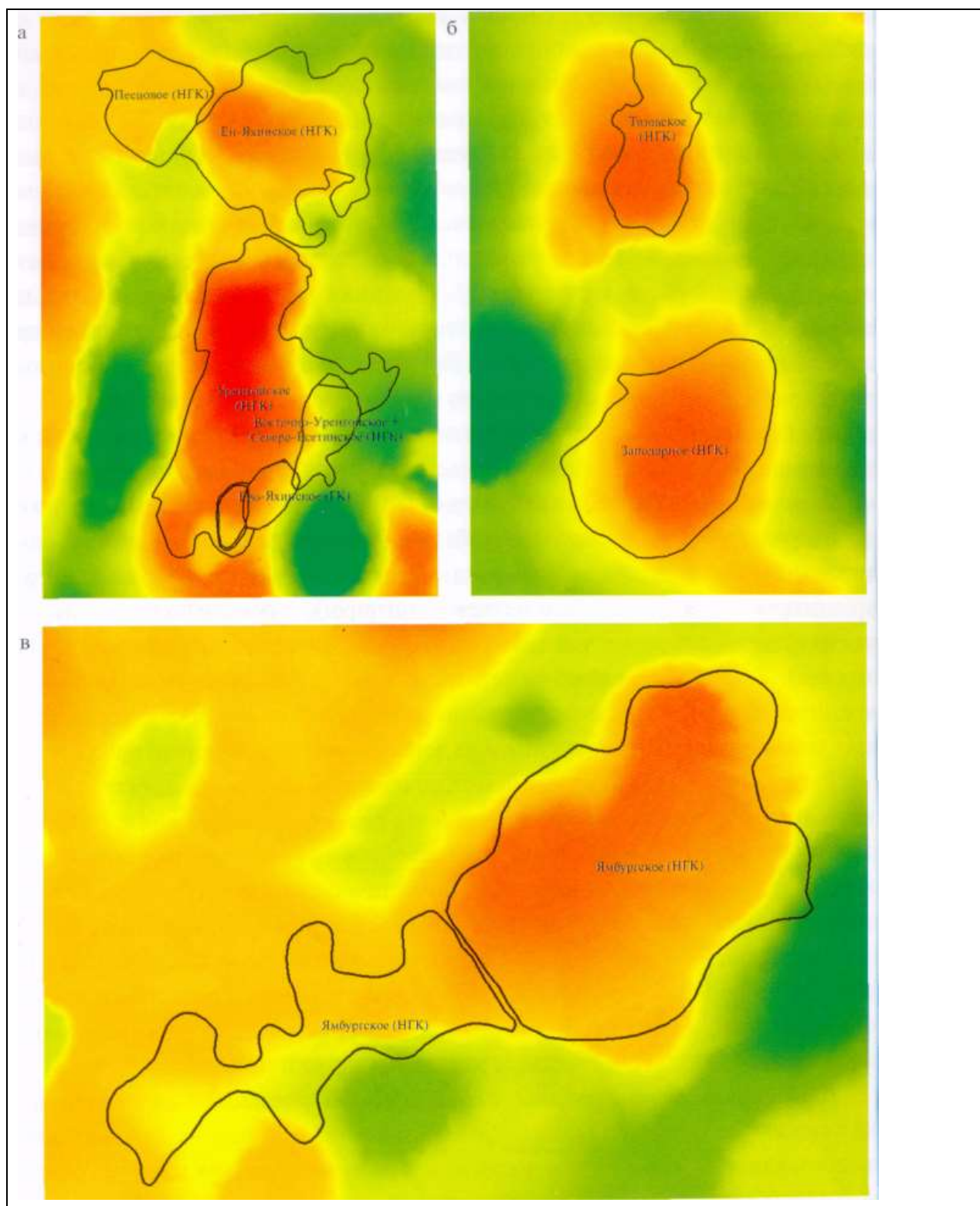


Рис. 6.3. Амплитуда отрицательных магнитных аномалий на а) Уренгойском, б) Заполярном и Тазовском, в) Ямбургском месторождениях достигает 300—400 нТл

С помощью линеаментного анализа можно вычислить количество линейных элементов на единицу площади и получить поле плотностей линейных элементов, которое будет характеризовать интенсивность развития приразломной области. Также зоны повышенных плотностей можно интерпретировать как области, характеризующиеся максимальными напряжениями в осадочном чехле и связанные с ними разуплотнениями. Например, при росте антиклинальной структуры, образованной локальным вздыманием отдельного блока фундамента, возникают касательные напряжения, максимумы которых приходятся на ее крылья, и менее выразительный максимум образуется в своде на начальной стадии роста структуры. На участках максимальных касательных напряжений отмечаются снижение всестороннего сжатия и развитие трещиноватости на микро- и макроуровне. При этом зоны нарушения сплошности среды (разрывы) характеризуются сложной структурой сопряженных кулис и ортогональных систем трещиноватости различных рангов. Подобные эффекты находят свое отражение в поле плотностей линейных элементов.

Заметим, что выбор детальности снимков для линеаментного анализа отличается от традиционного выбора масштаба данных для визуального анализа. С одной стороны, здесь можно ориентироваться на размер базовых структур, т.е. тех структур, которые создают мелкие линеаменты (штрихи), - основу всего анализа. Соответственно этому размеру должен быть выбран и масштаб изображения (размер пиксела). Также необходимо отметить, что при слишком грубом разрешении можно пропустить базовые структуры, а при слишком высоком разрешении будут выявляться не искомые структуры, а их детали, возможно, с другой ориентацией.

Размер тех структур, которые можно обнаружить в результате статистического анализа линеаментов, определяется размером окна расчета розы-диаграммы их простираний. При этом необходимо учитывать, что рабочий диапазон этой величины ограничен статистическими характеристиками. Эмпирическим путем установлено, что оптимальный размер диаметра окна должен превышать размер искомой структуры примерно в полтора раза. При существенно большем окне розы-диаграммы становятся невыразительными, усредненными, их различия стираются. В меньшем окне мало штрихов, и форма розы оказывается грубой, а ее характеристики неустойчивыми.

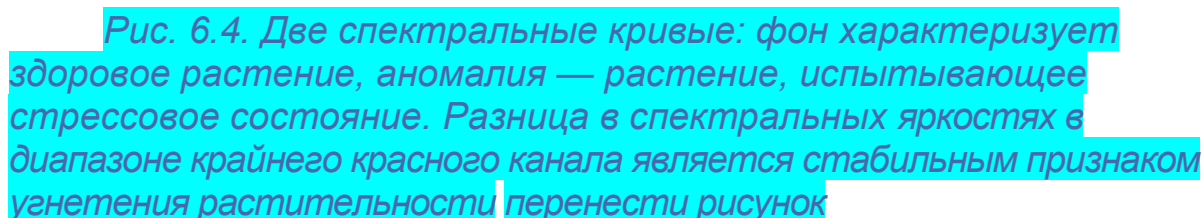
Для описываемых целей наиболее эффективны радарные данные и космические снимки со спутника Landsat-7 в инфракрасном диапазоне. Данные Landsat предоставляются в свободном доступе; кроме того, в архивах имеются снимки, на которых еще отсутствует

инфраструктура, которая вносит значительные искажения в результат анализа. Инфракрасный диапазон в наименьшей степени подвержен влиянию этих искажений и наиболее четко отражает влияние структурных элементов (разрывов, трещин) на поверхность исследуемой территории

Спектральные признаки проявления УВ

Вследствие микропросачивания углеводородов вплоть до поверхностных почв над залежами УВ помимо магнитных минералов, показанных на рис. 6.1, наблюдается повышенная концентрация таких металлов, как титан, ванадий, никель и медь [13]. В [15, 16], как в лабораторных опытах, так и в естественных условиях, было продемонстрировано, что растения, испытывающие стрессовое состояние в результате повышения концентрации металлов в почве, изменяют свои спектральные характеристики. При этом устойчивое изменение спектра удалось выявить только на длинах волн от 680 до 750 нанометров. В этом диапазоне лежит граница красного цвета, которая при угнетении растительности перемещается в сторону коротких волн (в сторону синего) в среднем не более чем на 20 нанометров, в результате чего это явление получило название «голубой сдвиг» (рис. 6.4).

В настоящее время получить спектрограмму в интересующем диапазоне длин волн можно со спутника EO-1 (Earth Observing-1), на котором установлена гиперспектральная аппаратура Hyperion (220 каналов в диапазоне от 430 до 2400 нм), либо с самолетных вариантов спектрометров. Также на момент написания монографии на рынке данных ДЗЗ появилось два мультиспектральных сканера космического базирования, обладающих специальным каналом для регистрации отражательной способности крайней красной зоны, — это космический аппарат WorldView-2 с каналом 700-730 нм и группа спутников RapidEye с каналом 690—730 нм.

Рис. 6.4. Две спектральные кривые: фон характеризует здоровое растение, аномалия — растение, испытывающее стрессовое состояние. Разница в спектральных яркостях в диапазоне крайнего красного канала является стабильным признаком угнетения растительности 

Остановимся подробнее на данных мультиспектральных сенсоров.

При анализе значений спектральной яркости в крайнем красном канале существует возможность распознавать области повышенного содержания металлов в почвах, что вследствие

микросочинивания является косвенным признаком наличия в разрезе углеводов.

Первое, что следует сделать при анализе данных крайнего красного канала, это выделить на территории исследования области с растительным покровом. Данная процедура многократно описана в литературе, она называется расчетом вегетационных индексов. Одним из популярных индексов для количественной оценки растительного покрова является NDVI-нормализованный относительный индекс растительности, который вычисляется по формуле – вставить формулы

где I_{red} — отражение в ближней инфракрасной области спектра, I_{red} - отражение в красной области спектра. Вычислив значение NDVI, весь последующий анализ следует проводить только по областям, где значение индекса указывает на наличие растительного покрова. Кроме того, из рассмотрения целесообразно исключить области, закрытые облачным покровом.

На рис. 6.5 изображен обобщенный спектр для произвольной зеленой растительности. Видно, что для крайнего красного диапазона увеличение яркости в этом канале может означать голубой сдвиг или общее увеличение интенсивности отражения в инфракрасной области. Для разделения этих двух явлений предлагается использовать красный и ближний инфракрасный каналы в качестве дифференцирующего признака. Общее увеличение отражающей способности будет фиксироваться синхронно как в крайнем красном, так и в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, а увеличение яркости, фиксируемое только в крайнем красном канале, связано только с явлением «голубого сдвига».

Для учета этой особенности предлагается провести трехточечную интерполяцию логистической функцией (сигмоидом) вида

(6.2)

$\text{rexp}(-yA.)$

Абсциссы точек $(A.J,/-)$, $J = 1^{\wedge}3$ представляют собой средние значения длины волны для красного (X_1), крайнего красного (X_2) и ближнего инфракрасного (X_3) канала, а ординаты $1/I \sim$ соответствующие яркости. График логистической функции показан на рис. 6.6.

Вставить рисунки 6.5

Рис. 6.5. Угнетение растительности вызывает сдвиг

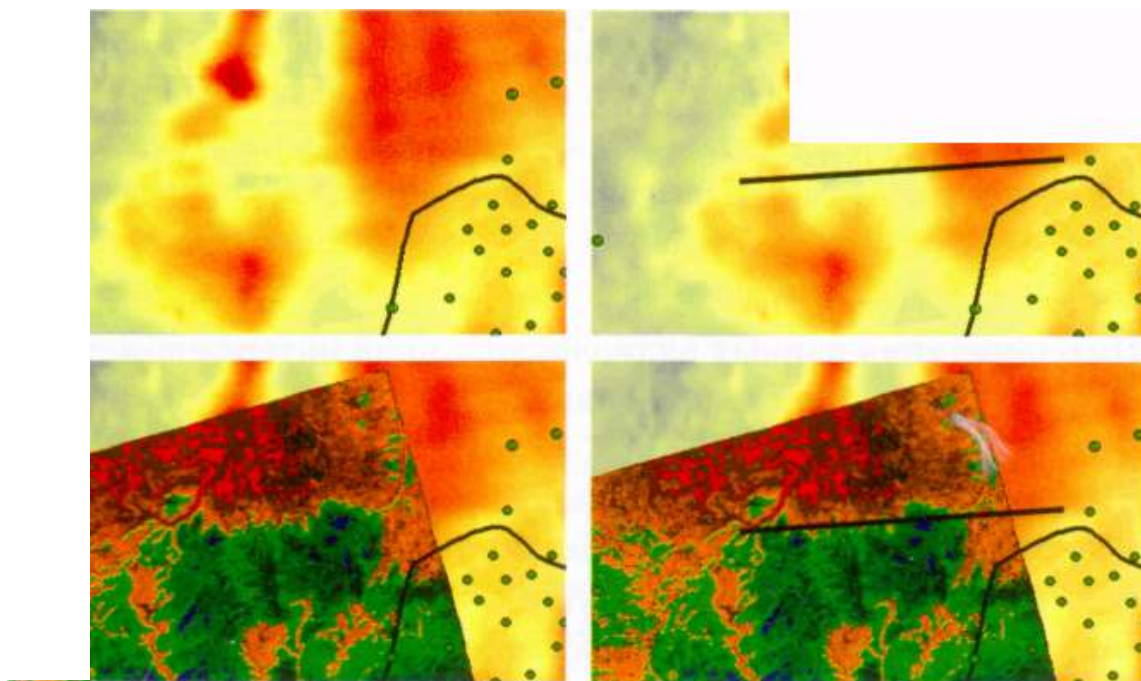
Для интерполяции необходимо решить систему нелинейных уравнений относительно параметров a , p , и u . Далее определяется местоположение точки перегиба интерполянта в проекции на ось A , (на рис. 6.6 перегиб находится в нуле), и в случае ее смещения в сторону коротких волн делается вывод о наличии эффекта «голубого сдвига». Особенность предлагаемой интерполяции состоит в том, что при общем изменении яркостей точка перегиба сигмоида остается на месте, — ее местоположение меняется только при несинхронных изменениях в отражательных способностях трех рассматриваемых каналов.

Здесь рис. 6.6.

Интерпретация данных радиолокационной интерферометрии для поиска УВ

Дистанционные методы могут выявлять структурные особенности разреза такие как разрывные нарушения, выходящие на поверхность, и изометрические поднятия (см. главу 2 настоящей монографии), однако в случае наличия сейсмических профилей структурные построения по космоснимкам выступают как дополнительные сведения к данным сейсморазведки. Исключение составляют данные радарной интерферометрии, по которым можно выделять разрывные нарушения, которые являются активными в настоящее время. Этот момент является крайне важным, поскольку геодинамические процессы могут сопровождаться активной флюидодинамикой.

В качестве иллюстрации приведем разрывное нарушение в районе Чаяндинского месторождения (Восточная Сибирь), определенное интерферометрической съемкой и, как подтверждение, проявленное в магнитном поле (рис. 6.7).



6. 7. Иллюстрация разрывного нарушения (прямая черная линия) районе Чаяндинского месторождения: данные магнитного поля (вверху) и интерферометрии (внизу)

На интерферометрической картине разрывные нарушения проявляются в качестве квазилинейного скачкообразного изменения величины вертикального смещения земной поверхности. Это значит, что по одну сторону разрыва за исследуемый период блок недр двигался с иной скоростью, чем блок по другую сторону от разрыва.

Похожая картина наблюдается на Уренгойском месторождении, где в непосредственной близости от разрывных нарушений, выявленных интерферометрической съемкой, располагаются аварийные скважины (рис. 6.8). Этот факт можно объяснить современными тектоническими движениями, которые негативно влияют на стволы скважин.

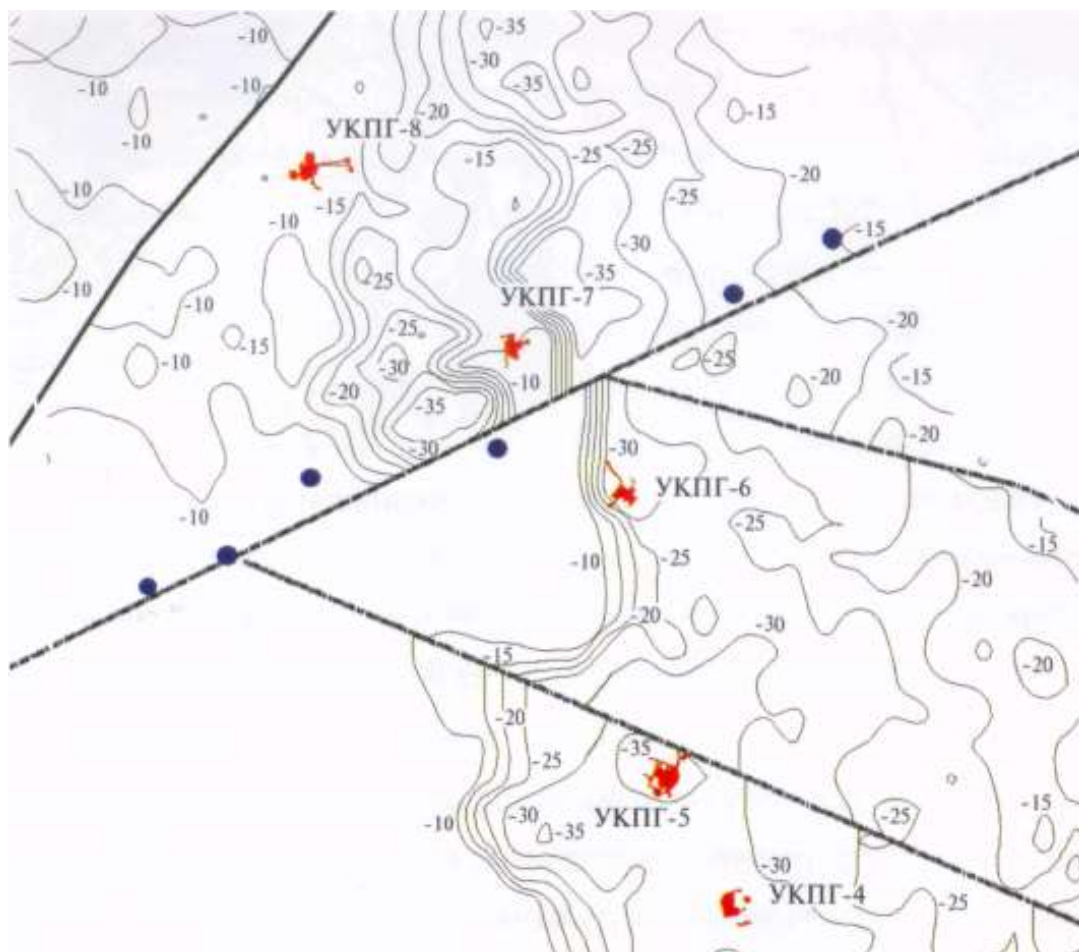


Рис. 6.8. Участок Уренгойского месторождения. Изолиниями показаны смещения земной поверхности (мм), выявленные по интерферометрической съемке, черным пунктиром — разрывы, синими точками — аварийные скважины

Поскольку в различных ландшафтных зонах отражающие поверхности радиолокационного сигнала зачастую различны, интерпретация интерферограмм может представлять ряд трудностей. К примеру, сухая и влажная почва одной и той же территории без всяких тектонических смещений будет давать различные уровни отражения. Следовательно, интерпретация интерферограммы должна проводиться с учетом ландшафтных факторов либо соответствующие выводы должны подтверждаться информацией, не зависящей от характера покрытия земной поверхности. В приведенном примере разрыв, выявленный на интерферограмме, подтверждается магнитной съемкой масштаба 1 : 200 000.

Интерферометрия в поисковом процессе может быть использована как средство выявления новейших поднятий рельефа земной поверхности, которые, по-видимому, возникают вследствие тектонических вертикальных движений отдельных блоков фундамента и, следовательно, формируют над собой

антиклинальные формы осадочного чехла. Последние же, в свою очередь, могут выступать структурными ловушками для углеводородов. При пространственном совпадении локальной положительной гравитационной аномалии с современным поднятием рельефа, выявленным по данным радарной интерферометрии, можно делать вывод о формирующейся, но уже достаточной амплитудной антиклинальной структуре в осадочном чехле. При этом амплитуда антиклинали должна быть достаточно велика, поскольку блок фундамента, ее формирующий, должен быть существенно приподнят по сравнению со своим окружением, чтобы быть заметным в гравитационном поле. Примером такого сочетания локальных поднятий с гравитационными аномалиями могут служить! объекты № 8, 9 на рис. 6.9.

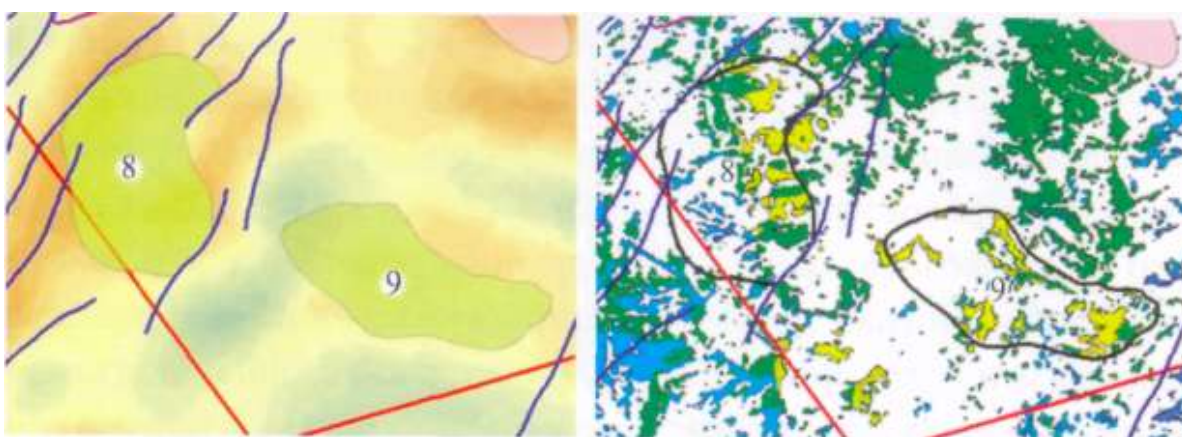


Рис. 6.9. Локальные аномалии гравитационного поля (слева) и современные вертикальные движения земной поверхности по данным радарной интерферометрии (справа; от зеленого к желтому ~ увеличение поднятия, от голубого к синему — увеличение опускания)

Принципиальное преимущество дифференциальной радиолокационной интерферометрии перед другими методами мониторинга вертикальных и плановых деформаций заключается в прямом замере различий в рельефе, произошедших за период между двумя (тремя, четырьмя и т.д.) съемками. Получаемый в результате интерферометрической обработки файл смещения, как правило, показывает интегральную картину смещений. Достоинства метода очевидны: прежде всего это возможность осуществлять мониторинг деформаций любых территорий (в том числе значительных по площади и протяженности) с миллиметровой точностью при невысокой стоимости работ (на порядок ниже аналогичных по точности дистанционных методов, например лазерного сканирования). Наземного обеспечения на поисковом этапе не требуется. Кроме того, использование метода радарной интерферометрии для выявления мест локальных поднятий дневной поверхности (потенциальных ловушек углеводородов) перспективно

еще и потому, что, в отличие от визуального дешифрирования, данный метод свободен от субъективизма.

Вместе с тем, наметим проблему, решение которой поможет более грамотно и четко оценивать вертикальные смещения земной поверхности по радарным данным: это неясность того, что же на самом деле представляет собой отражающая поверхность на разных ландшафтах и каково при этом влияние от увлажнения почвы.

Геолого-поисковые модели

Способы обнаружения антиклинальных ловушек УВ методами дешифрирования космических изображений для геологоразведки являются классическими. Они описаны в литературе начиная с 60-х гг, XX столетия. Авторы монографии основное внимание уделяют проверке наличия углеводородов в антиклинальных, фациальных или тектонических ловушках.

Когда в результате миграции углеводородов ловушки заполнены и месторождение сформировано, заметную роль начинают играть геолого-геохимические процессы, обусловленные микропросачиванием из месторождения углеводородных газов. Это приводит к образованию в верхних частях геологического разреза магнитных минералов (локальные максимумы магнитного поля в зоне окисления и локальные минимумы — в восстановительной зоне), сульфидов и других теплотворных минералов (тепловые аномалии на материалах аэрокосмических съемок), изменению ландшафтов (устанавливаются по результатам временной корреляции значений спектральных характеристик многозональных космических снимков). Изменения ландшафтов в связи с микропросачиванием фиксируются и в нескольких узких спектральных каналах данных гиперспектральных съемок. С этим же процессом связаны радиоактивные аномалии, устанавливаемые по материалам аэрогаммаспектрометрии и радоновых съемок. Непосредственно почвенные аномалии углеводородных газов устанавливаются по результатам газовых съемок.

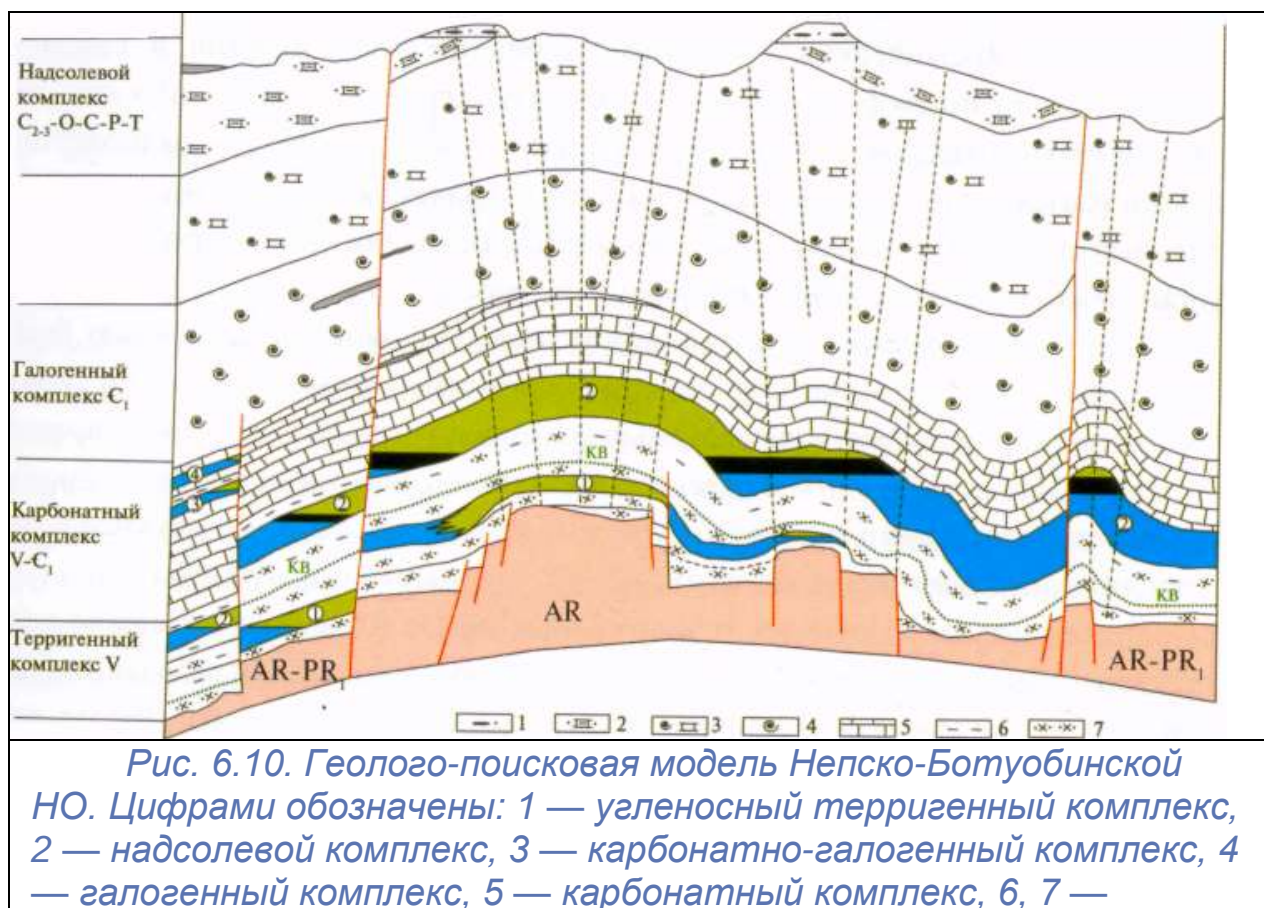
Таким образом, проверка наличия углеводородов в ловушке может быть осуществлена по широкому набору данных (магнитометрические съемки, аэро-и космические тепловые, многозональные, гиперспектральные съемки, газовые съемки). В принципе, чтобы заверить наличие выявленной ловушки, достаточно обработать данные одного из указанных видов съемок. Возможное комплексирование данных увеличит достоверность полученного результата.

При наличии геологических знаний об изучаемой территории можно создать геолого-поисковую модель, на основе которой выделить наиболее значимые поисковые признаки. Например, на рис. 6.10 показана такая модель для Непско-Ботубинской нефтегазоносной области и выделен набор поисковых признаков углеводородов.

Для решения задачи прогнозирования месторождений углеводородного сырья представляется оптимальной сопряженная обработка следующего набора геолого-геофизических и космических данных:

- для выявления мест вероятного расположения ловушек углеводородов необходимо выявить локальные аномалии гравитационного поля, пространственно совпадающие с малоамплитудными изометричными поднятиями рельефа дневной поверхности, огибаемыми эрозионной сетью;

- для установления каналов миграции углеводородов и зон разуплотнения пространственно совпадающих с ловушками углеводородов, необходимо провести статистический анализ линеаментов космических изображений, полученных в тепловом диапазоне электромагнитного спектра



терригенный комплекс, 8' — гранитно-гнейсовый комплекс, 9 — трапповый комплекс, 10 — разрывные нарушения, 11 — геологические границы, 12 — вода, 13 — газ, 14 — нефть. Цифрами в кружках обозначены основные продуктивные горизонты

- проверка наличия углеводородов в ловушке осуществляется по факту ее (ловушки) пространственного совпадения с аномалиями магнитного и/или теплового поля, а также с учетом наличия эффекта «голубого сдвига»;

- возможно комплексирование с аномалиями по данным газовых и радоновых съемок.

Набор и значимость поисковых признаков принципиально зависят от нефтегазоносной области и конкретной геологической обстановки, в которой происходит поиск нефтегазоносных объектов. Например, для области горизонтальных срывов Березовской впадины основным типом ловушек будут приразломные складки, образованные надвигами вследствие воздействия Байкальского рифта. В этой геологической ситуации магнитные аномалии наиболее четко маркируют разрывные нарушения, имеющие байкальское простираие, а не области скопления углеводородов, как в предыдущей поисковой модели.

В надвиговом поясе Березовской впадины в качестве ловушек УВ будут выступать надвиги внутри аллохтонного тела, сопровождаемые складками. Основным поисковым признаком при выявлении подобного типа ловушек на данной территории являются положительные, узкие в поперечнике, протяженные с юго-запада на северо-восток серии (минимум две) параллельных магнитных аномалий, которые маркируют фронтальный и тыловой разрывы в отдельно взятой секции аллохтонного тела. Однако при рассмотрении проблемы в эволюционном аспекте формирования надвигового пояса вначале формируются рамповые разрывы, а потом надвиги. Строго говоря, квазипараллельные магнитные аномалии маркируют только разрывы, а не интересующие авторов надвиги, которые к настоящему моменту могли не успеть сформироваться. Поэтому, основываясь на принципе комплексирования, следует использовать дополнительные поисковые признаки, призванные уточнить и локализовать потенциальные структуры углеводородов.

В качестве одного из уточняющих признаков могут выступать аномалии гравитационного поля. При формировании в аллохтонном теле надвигов породы, формирующие принадвиговые складки, гипсометрически располагаются выше своих

одновозрастных соседей, располагающихся вне зоны надвига. В гравитационном поле вследствие плотностных различий будет проявлена слабая аномалия. В зависимости от того, какая порода будет находиться в ядре складки, аномалия может быть как положительной, так и отрицательной.

В целом процесс комплексирования всех доступных поисковых признаков можно разделить на два этапа: первый - это ранжирование признаков по значимости, второй - выделение перспективных структур и их типизация на основе принадлежности к разным группам признаков

Способы получения данных

Одним из важнейших вопросов, возникающих при принятии решения об использовании дистанционных методов ГРП, является проблема получения исходных аэро- и/или космических данных. Опишем некоторые из возможных путей получения данных тех методов, которые традиционно считаются наземными, но в настоящее время имеющих модификацию для дистанционного использования.

Рассмотрим подробно получение данных гравиразведки; получение данных других методов отметим тезисно.

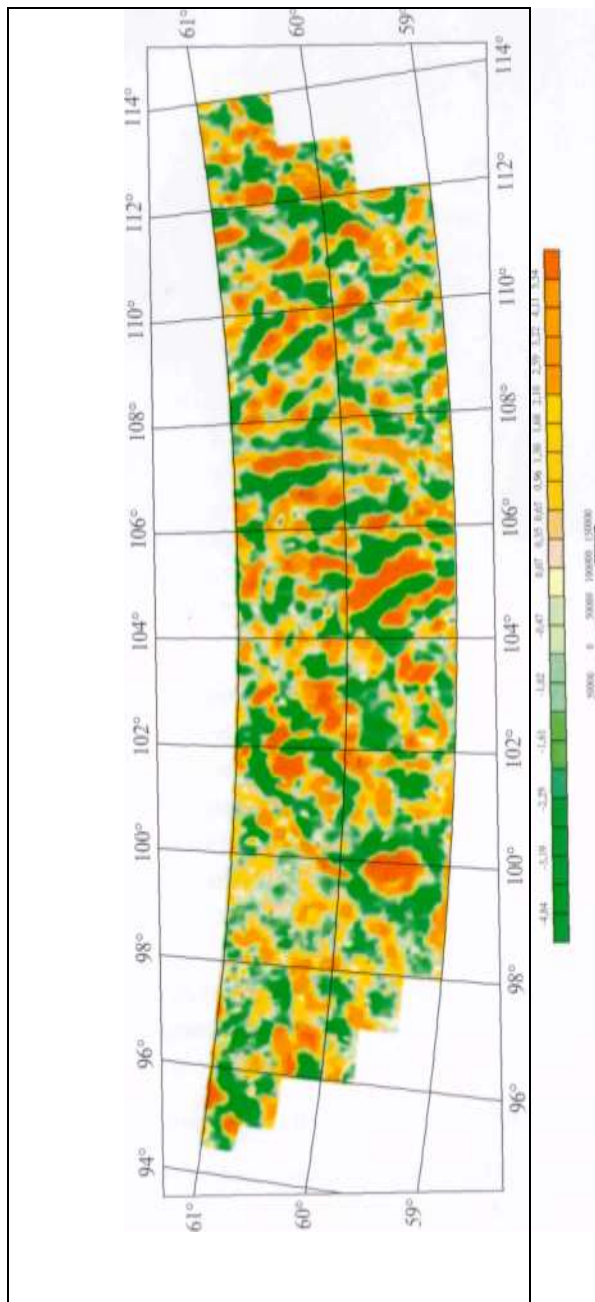
Гравиразведка

Не считая того, что на многие регионы России существует гравитационная съемка масштаба 1 : 200 000, а вся территория покрыта съемкой масштаба не менее 1 : 2 500 000, существует несколько способов для получения данных гравиметрических исследований (поля силы тяжести) методами дистанционного зондирования Земли.

Первый, и самый точный, из дистанционных способов заключается в проведении исследований с борта самолета или вертолета, он называется аэрогравиметрией. Для реализации этого метода используются аппаратно-программные комплексы, с помощью которых можно получать карты поля силы тяжести с точностью до 0,2 мГл, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к наземным гравиметрическим съемкам масштаба 1 : 50 000. Такая точность исследований во многих случаях позволяет проводить разделение полей от фундамента и осадочного чехла (рис. 6.11).

Второй способ подходит только для морских и океанических территорий. Он заключается в пересчете данных спутниковой радиоальтиметрии в аномалии поля силы тяжести. Метод основан

на возможности измерения уклонов поверхности океана, которые в большинстве своем вызваны гравитационными аномалиями. Из теоретических построений, основанных на уравнении Лапласа и формулы Брунса, следует, что один микрорадиан угла наклона поверхности океана примерно соответствует одному миллигалу гравитационной аномалии. Подобный пересчет спутниковых данных дает точность измерений при спокойном море до 1-2 мГал, погрешности до 4 мГал возникают в районах с неоднородной топографией морского дна. Пиковые значения погрешности, достигающие 20 мГал, возникают в зонах крупных морских гор. Работа по созданию глобальной гравиметрической модели Земли над Мировым океаном была проделана в 2008 г. [17] (рис. 6.12).



6.11. Остаточное гравитационное поле

редуцирования влияния
глубинной составляющей

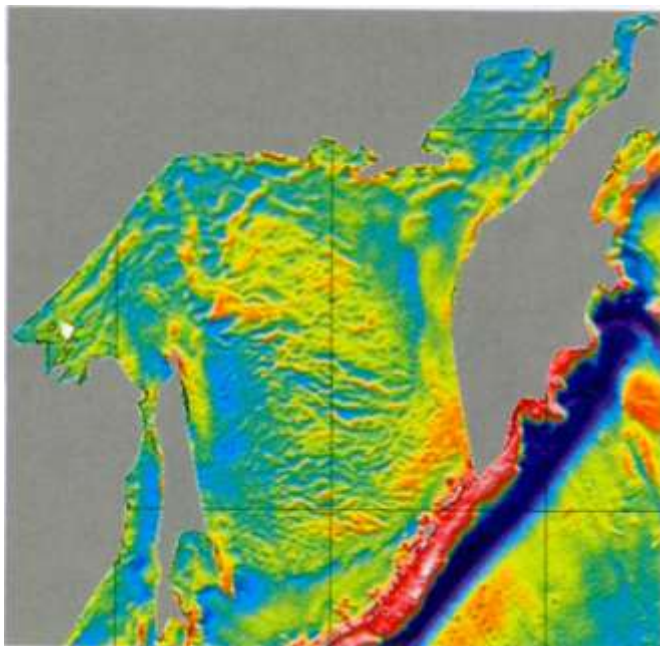


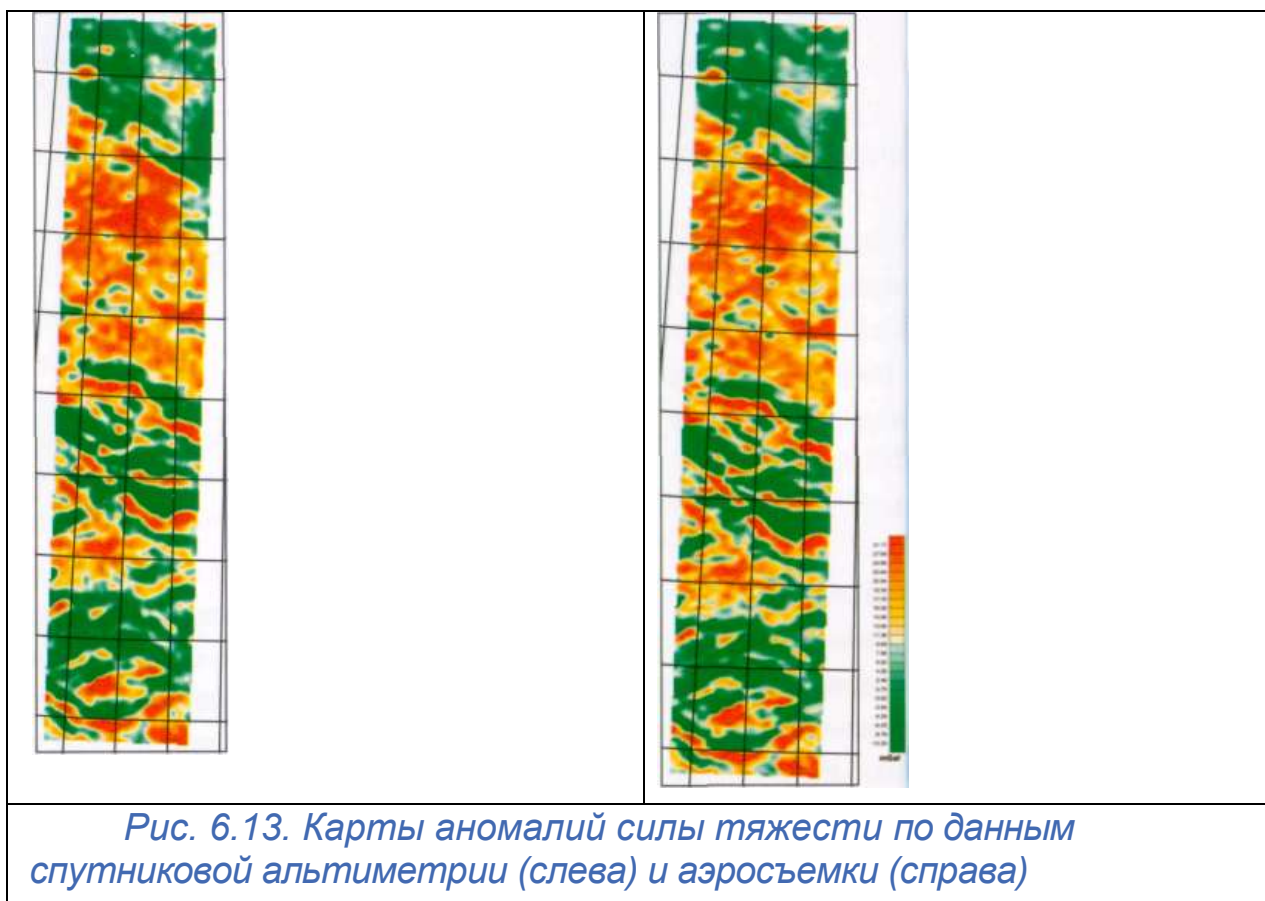
Рис. 6.12. Гравиметрические аномалии Охотского моря, полученные пересчетом из спутниковой альтиметрии

В.Е. Могилевским и С.А. Павловым [18] было проведено сопоставление моделей гравитационного поля, построенных по данным спутниковой альтиметрии и по аэрогравиметрическим исследованиям на территорию Охотского моря. Сравнение показало, что стандартное отклонение разности альтиметрических и аэрогравиметрических данных составляет 2,6 мГал (рис. 6.13, 6.14).

Кроме перечисленного, гравиметрическую информацию можно получить со спутника Европейского космического агентства GOCE (The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) или с германо-американского GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), однако низкая детальность этих данных не позволяет применять их для целей поиска и разведки месторождений углеводородов.

Стадийность дистанционного геологоразведочного процесса

Дистанционный геологоразведочный процесс целесообразно проводить в два этапа. Работы первого этапа предшествуют или входят в состав «Технико-экономических предложений по освоению углеводородного потенциала лицензионных участков недр (ТЭП)». Работы второго этапа должны входить в комплекс геологоразведочных работ, опережая составление проекта сейсморазведки.



На первом этапе осуществляется выявление объектов поискового бурения. Для этого на основе геолого-геофизической изученности территории создается региональная геолого-поисковая модель, которая включает графические данные о геологическом строении, стратиграфии, тектонике, нефтегазоносности, лицензировании и предшествующих геологоразведочных работах и реализуется в виде полнофункциональной геоинформационной системы.

В соответствии с моделью обосновывается набор целевых топографических, геолого-геофизических и космических данных, анализ и специальная обработка которых выявляют структурные и вещественные поисковые признаки углеводородных объектов. Пространственное совпадение разнородных признаков позволяет выявить объект поискового бурения.

На первом этапе используются:

- цифровые модели рельефа масштаба 1 : 25 000—1 : 100 000;
- цифровые модели гравитационного и магнитного полей масштаба 1 : 200000-1 : 1 000000;
- мультиспектральные космические изображения со спутников Landsat, RapidEye, Hyperion;

- радарные космические изображения со спутников Alos Palsar, Envisat, Ers.

Результатом являются выявленные объекты поискового бурения.

На втором этапе уточняются границы объектов поискового бурения, а в ряде случаев и границы отдельных залежей углеводородов.

Помимо данных первого этапа, на втором этапе используются:

- высокоточные мультиспектральные космические изображения со спутника WorldView-2;

высокоточные радарные космические изображения со спутников RADARSAT-2, TerraSar-X, Cosmo-SkyMed

6.14. Графики алыпиметрических (синяя кривая) и аэрогравиметрических (желтая кривая) данных вдоль фиксированного профиля - вставить

- высокоточные мультиспектральные аэросъемки (в том числе в тепловом диапазоне);

- высокоточная аэромагнитометрия и аэрогравиметрия.

Результатом являются объекты, подготовленные к сейсморазведке, а в ряде случаев, когда не требуется дополнительных сейсмических исследований, и к бурению.

Стоимость работ второго этапа в силу используемых данных существенно выше стоимости работ первого этапа. Поэтому работы второго этапа рационально выполнять в рамках геолого-разведочных работ по подготовке объектов к поисковому бурению.

Работы первого (выявление объектов поискового бурения) и второго (подготовка объектов к поисковому бурению) этапов проводятся дистанционным методом и поэтому не требуют приобретения лицензионных участков недропользователем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение оценим перспективы использования космической информации в газовой промышленности.

Общая площадь территорий, отведенных на разработку месторождений и разведку участков недр, постоянно растет, в том числе за счет начатого освоения арктического региона. Внедрение новых космических технологий и средств измерений позволит повысить производительность работ на этой территории с одновременным снижением их стоимости, что будет способствовать максимально эффективному и сбалансированному газоснабжению потребителей РФ, выполнению долгосрочных контрактов и межправительственных соглашений по экспорту газа.

Ввод в эксплуатацию новых месторождений, увеличение объемов добываемого газа, выполнение серии таких важнейших проектов, как «Прикаспийская трубопроводная система», «Северный поток», «Южный поток», «Алтай», диктуют необходимость развития газотранспортной инфраструктуры. Освоение Восточной Сибири и Дальнего Востока предусматривает развитие газодобывающих, газотранспортных, газоперерабатывающих и газохимических мощностей этих регионов. Основной объем запланированных работ будет осуществляться в труднодоступных районах со сложными инженерно-геологическими и сейсмическими условиями. Для минимизации рисков освоения новых объектов и территорий необходимо повышать эффективность бизнес-процессов, обеспечивающих функционирование газовой промышленности.

Перечислим факторы, определяющие необходимость использования космической информации для повышения эффективности бизнес-процессов:

- высокая эффективность, производительность и оперативность методов дистанционного зондирования Земли;
- низкая удельная стоимость материалов космической съемки по сравнению с наземными методами получения аналогичных данных;
- наличие в материалах космической съемки дополнительной информации о характеристиках потенциальных месторождений углеводородов, состоянии инженерных сооружений, явлениях, представляющих опасность при эксплуатации месторождений, недоступной при использовании данных традиционных методов;

- возможность получения космической информации как по территории РФ, так и по зарубежным территориям.

Кроме того, косвенным свидетельством важности использования данных ДЭЗ является рост объемов и расширение сферы использования космической информации зарубежными нефтегазовыми корпорациями

По опыту отечественных и зарубежных нефтегазовых корпораций наибольший экономический эффект дает использование данных ДЭЗ для информационного и геодезического обеспечения инженерных изысканий при разведке и обустройстве месторождений, маркшейдерских работах, строительстве и эксплуатации подземных хранилищ газа, систем трубопроводного транспорта, мониторинге состояния технологических объектов.

Космические данные целесообразно использовать в комплексе с ГЛОНАСС/ОР8-наблюдениями для мониторинга реализации крупнейших проектов добычи и транспорта газа, обнаружения опасных явлений в зонах ответственности газовых компаний, оценки последствий аварий и природных катастроф, а также контроля хода выполнения работ по их устранению.

Данные космических съемок незаменимы в информационном обеспечении работ по оформлению прав на земельные участки, мониторинге изменений в имущественно-земельном комплексе, страховании имущества и др.

Технологический уровень современных гражданских космических систем ДЭЗ позволяет получать информацию в оптическом диапазоне с пространственным разрешением 0,5 м. К 2011 г. этот параметр достигнет 0,25 м. Пространственное разрешение радиолокационных космических снимков в настоящее время составляет 1,0 м и может быть улучшено в новых разработках.

В части перспектив использования космической информации в газовой промышленности радиолокационные съемки наиболее интересны.

Радиолокационный космический мониторинг ледовой обстановки в Арктике показывает, что на крупных льдинах появились бассейны талых вод, чего не наблюдалось еще несколько лет назад. Это может свидетельствовать об общем потеплении климата, что, в свою очередь, инициирует появление айсбергов в акваториях, представляющих интерес для нефтегазовых компаний, а это уже является опасностью для объектов обустройства морских месторождений. Спутниковые радарные данные, получаемые в мониторинговом режиме, позволяют заблаговременно обнаружить айсберги, оценить их траекторию движения и вовремя принять

соответствующие меры по обеспечению безопасности морских объектов.

Радарные данные могут быть использованы для поиска новых месторождений на шельфе. Только на радарных снимках видны слики (нефтяные пленки) на поверхности моря, которые являются поисковым признаком на углеводороды.

В части обеспечения безопасной эксплуатации месторождений радарные данные используются и на суше. При отборах газа и нефти из недр возникает падение пластового давления в коллекторах, приводящее к смещениям земной поверхности. Такие смещения могут достигать 2-3 м в год (месторождение Белридж Калифорния) и приводить к разрушениям скважин, газопроводов и т.д. Не менее важное применение радарные методы находят и при решении экологических задач.

В целом использование космической информации при проведении геологоразведочных работ, проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений подтверждает ее эффективность для информационного обеспечения бизнес-процессов в газовой промышленности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянт А.М. Геоиконика. — М.: Астрейя, 1996. — 208 с.
2. Использование материалов космических съемок при изучении нефтегазоносных территорий: методические рекомендации. - М.: М-во геологии СССР, 1989.-122с.
3. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов // Под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарёва. — М.: ГИС-Ассоциация, 1999. - 204 с.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. — М.: Мир, 1988. — 343 с.
5. Михайлов А.Е., Корчуганова Н.И., Баранов Ю.Б. Дистанционные методы в геологии. — М.: Недра, 1993. — 197 с.
6. Временные требования к организации, проведению и конечным результатам геологосъемочных работ, завершающихся созданием Госгеолкарты_200 (второе изд.). - М.: МПР РФ, 1999. - 160 с.
7. Максимчук В.Е. Опыт использования магниторазведки для прямых поисков нефти и газа в Днепровско-Донецкой впадине (на примере Селюховского месторождения) // Межд. геофизич. конф.: Тез. докл. — СПб., 2000. — С. 184—186.

- 8.Использование пространственных данных и геоинформационных технологий для поисков месторождений углеводородов в арктических и сопредельных с ними районах Западно-Сибирской мегапровинции / Ю.Б. Баранов, М.А. Ванярхо, С.М. Кулапов и др.//Перспективы развития минерально-сырьевой базы газовой промышленности России: Сб. науч. тр. — М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008. - С. 89-98.
- 9.Аэрокосмический мониторинг промышленной безопасности месторождений углеводородов Западно-Сибирской мегапровинции / Е.В. Киселевский, Ю.Б. Баранов, С.М. Кулапов и др. // Перспективы развития минерально-сырьевой базы газовой промышленности России: Сб. науч. тр. — М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008. - С. 265-276.
- 10.Космический мониторинг природных опасностей при освоении газовых месторождений Ямала / Ю.Б. Баранов, Е.В. Денисевич, С.М. Кулапов и др. // В мире науки. - № 10. - 2008. - С. 64-67.
11. Лурье И.К., Косиков А.Г. Теория и практика цифровой обработки изображений. — М.: Научный мир, 2003.
- 12.Рис У. Основы дистанционного зондирования. — М.: Техносфера, 2006.
- 13.Физико-химические основы прямых поисков залежей нефти и газа / Под ред. Е.В. Каруса. - М.: Недра, 1986.
- 14.Аэромагниторазведка в геологоразведочном процессе на нефть и газ / В.М. Берёзкин, А.Г. Будагов, В.Г. Филатов и др. - М., 1993.
- 15.Chang S. H. and Collins W. Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration technique using laboratory methods. *Economic Geology*. — 78 (1983) P. 723-736.
- 16.Collins W., Chang S.H. et al., Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits *Economic Geology*. - 78 (1983). - P. 737-749.
- 17.D.T. Sandwell and W.H.F. Smith, Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate, *J. Geophys. Res.*, 114 (2009), B01411, doi:10.1029/2008JB006008.
- 18.Могилевский В.Е., Павлов С.А. Сопоставление моделей гравитационного поля, построенных по аэрогравиметрическим и альтиметрическим данным.
- 19.Бабаянц П.С., Тарарухин Н.М. Особенности технологии интерпретации комплексных аэрогеофизических данных в условиях широкого развития пород траппового комплекса.

20.Безукладнов В.А., Орлов В.В. Новые возможности аэромагнитной съемки при поисках углеводородного сырья // Межд. геофизич. конф: Тез. докл. - СПб., 2000. - С. 164-165.

21.Корчуганова Н.И. Аэрокосмические методы в геологии. — М.: Геокарт, ГЕОС, 2006.

22.Материалы отчета о НИР «Космический мониторинг территории лицензионных участков углеводородов ООО «Газпром добыча Уренгой» для информационного обеспечения геолого-маркшейдерских работ по данным целевой космической съемки в 2009 г. и предшествующих съемок», подготовленного в соответствии с Договором № 203196139 от 1 августа 2009 г.

23.Материалы отчета о НИР «Проведение дистанционного зондирования участков недр с использованием космических средств и технологий в целях прогнозирования месторождений углеводородного сырья и маршрутов магистральных газопроводов на территории Республики Саха (Якутия) (Услуги)», подготовленного в соответствии с Договором № 103184720 от 13 марта 2009 г.

24.Михайлов А.Е. Структурная геология и геологическое картирование. М.: Недра, 1984.

25.Морозов А.Ф., Карпузов А.Ф. О современном состоянии и задачах развития геологической картографии и прогнозно-поисковых исследований с использованием компьютерных технологий // Мат. 6-го Всероссийского семинара «Геологическое картирование и прогнозно-металлогеническая оценка территорий средствами компьютерных технологий» (15—19 ноября 1999 г.). - Красноярск, 1999. - 10 с.

Описание интерферометрического процессора // Руководство пользователя Photomod Radar. - М.: ЗАО «Фирма Ракурс», 2008.

27.Пантелеев В.Л. Физика земли и планет. Курс лекций. — М.: МГУ, Физфак, 2001.

28.Возможности применения аэрокосмических, геофизических и геохимических методов при изучении глубинного строения нефтегазоносных территорий / И.О. Смирнов, А.А. Кирсанов, В.Э. Богатырев, О.Ю. Куриленок // Аэрокосмические съемки при изучении глубинного строения регионов СССР. — Л., 1990.-С. 13-28.

29.ERDAS Field Guide. Fifth Edition, Revised and Expanded. - Atlanta, Georgia, 1999.

30.European Space Agency, GOCE Earth Explorers.
http://www.esa.int/esaLP/ESAYEKI_VMOC_LPgoce_0.html

31.Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology,

NASA. <http://gracetellus.jpl.nasa.gov/poet>

32.D. Richman. Three Dimensional Azimuth-Correcting Mapping Radar. United States Patent, 1982.

33.Scripps Institution of Oceanography, University of California.
http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Глава 1. Ю.Б. Баранов, Н.А. Гафаров, А.Е. Фейгин. Использование космической информации в комплексных моделях нефтегазоносных территорий.....	6
Глава 2. С.М. Кулапов. Выявление и оценка разрывов и зон трещиноватости по материалам космических съемок	21
Глава 3. Ю.Б. Баранов, Е.В. Киселевский, Ю.И. Кантемиров, М.С. Горяйнов. Космический мониторинг современных движений земной поверхности для обеспечения безопасного функционирования объектов Единой системы газоснабжения	37
Глава 4. Е.В. Денисевич. Космический мониторинг опасных геокриологических процессов в зоне распространения многолетних мерзлых пород	56
Глава 5. Д.М. Филатов, С.Э. Никифоров. О классификации месторождений нефти и газа по степени природной и технической опасности	96
Глава 6. М.А. Ванярхо, Д.М. Филатов, Н.А. Гафаров. Поиск месторождений нефти и газа и оценка перспективности лицензионных участков с использованием космической информации	103
Заключение.....	125
Список литературы	128

МОНОГРАФИЯ

**Гафаров Н.А., Баранов Ю.Б., Ванярхо М.А., Филатов Д.М.,
Денисевич Е.В., Кантемиров Ю.И., Кулапов С.М., Фейгин А.Е.,
Горайнов М.С., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э. Использование
космической информации в газовой промышленности**

Ответственный редактор *Е.Д. Нащекина*

Ответственный за тематическое направление *О.В. Чепракова*

Ответственный за выпуск *Л. В. Рудакова*

Компьютерная верстка *Н.А. Владимирова*

Корректурa *А. В. Казаковой*

Подписано в печать 21.09.2010

Формат 70х 100/16. Гарнитура «Ньютон». Офсетная печать.

Уч.-изд. л. 18,0. Тираж 300 экз. Заказ 786

ООО «Газпром экспо». 117630, Москва, ул. Обручева, д. 27,
корп. 2. Тел.: 719-64-70; 8 (499) 580-47-43.

Отпечатано в ООО «БЭСТ-принт»