

30 ЛЕТ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ: ТЕНДЕНЦИИ, ДОСТИЖЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2010 г. В. Г. Трифонов

Геологический институт РАН, Москва

E-mail: trifonov@ginras.ru

Выявлены основные достижения и тенденции развития за последнее тридцатилетие геологических исследований с применением космических средств: изучения строения приповерхностного слоя земной коры и глубоких горизонтов литосферы, поисков месторождений полезных ископаемых, прогноза геологических бедствий и последствий современных геологических процессов. Показано, как по мере прогресса средств получения и обработки космической информации некоторые методические приемы переходили в разряд рутинных операций, но на смену им открывались новые возможности и методические подходы. Отмечены результаты космогеологических исследований, которые способствовали решению важных геологических задач.

Ключевые слова: обработка космической информации, геологическое строение, глубинные структурные особенности, металлогенетический прогноз, месторождения нефти и газа, неотектоника, сейсмоструктоника, прогноз землетрясений, инженерная геология.

ВВЕДЕНИЕ

В статье представлен обзор основных тенденций и результатов геологических исследований с помощью космических средств по материалам статей, опубликованных в журнале “Исследование Земли из космоса” за 30 лет его существования (1980–2009 гг.). Однако работы в этом направлении начались еще в середине 1960-х годов, с появлением первых снимков поверхности Земли, сделанных российскими и американскими космонавтами. Толчком к расширению работ стало массовое поступление изображений Земли, полученных сканированием с ее автоматических спутников. Первыми попытками геологического применения фотоснимков с пилотируемых космических объектов было их использование в геолого-съемочных работах. Оно опиралось на обширный опыт применения материалов аэрофотосъемки при геологическом картировании. Космические снимки (КС) выгодно отличались от них большей обзорностью и возможностью получения многозональных изображений, с которыми связывали надежды на определение состава горных пород по их спектральным характеристикам. Вместе с тем уже ранние КС, и особенно изображения сравнительно низкого разрешения с автоматических спутников, выявили новые структурные элементы – прямые линеаменты и кольцевые или овальные структуры, которые не выделялись при наземной геологической съемке.

В 1970-е годы работы по геологическому использованию космической информации были ориентированы на определение перспективных направлений и методику применения космических изображений. Ограниченность круга исследователей восполняла международная кооперация с 1971 г. в виде Советско-американской рабочей группы по исследованию природной среды с помощью космических средств, а позднее и аналогичной группы ученых социалистических стран при Совете “Интеркосмос”. Были выявлены две важные особенности геологической информации, получаемой с КС.

Во-первых, оказалось, что часть линеаментов соответствует разломам, известным по наземным исследованиям. КС помогли их точнее откартировать и выяснить соотношения между разломами, что важно для понимания их происхождения. Некоторые овально-кольцевые формы были идентифицированы как тектоно-магматические структуры центрального типа (СЦТ). Однако гораздо большее число линеаментов и овальных структур не отождествлялось с разломами и СЦТ и, более того, было выделено в областях, для которых они не характерны. Поэтому возникло предположение, подтвердившееся при полигонных исследованиях, что линеаменты представляют собой зоны однообразно ориентированной трещиноватости горных пород, их повышенной проницаемости или границы областей с разным геологическим строением. Сопоставление линеа-

ментов и овальных структур с геолого-геофизическими данными показало, что эти формы земной поверхности могут соответствовать тектоническим границам и телам, скрытым на глубине под осадочным чехлом или слоями земной коры с иным стилем деформаций, причем по мере генерализации космического изображения местности (ухудшения разрешения) скрадываются поверхностные детали и проступают более глубинные структурные элементы (Макаров и др., 1974; Трифонов и др., 1978).

Во-вторых, выраженность геологических объектов и явлений на земной поверхности ухудшается со временем из-за эрозии, выветривания, аккумуляции наносов, наложения других явлений и объектов и т.д. Поэтому на поверхности лучше всего выражены следы новейших геодинамических явлений и геологические новообразования. Даже в тех случаях, когда предметом исследования являлись заведомо древние структуры и комплексы пород, главными диагностическими признаками становились их косвенные молодые проявления в новейших тектонических движениях, рельефе и флюидодинамике (Трифонов и др., 1973).

Указанные обстоятельства определили следующие основные направления геологического применения космической информации, которые в той или иной мере сохраняют актуальность до сих пор (Трифонов и др., 1978; Космическая съемка..., 1979; Садов, Ревзон, 1979; Космическая информация..., 1983):

- уточнение геологического строения территории в интересах геологической съемки и тематических структурно-геологических исследований;
- изучение глубинных геологических образований – объектов, скрытых на большей или меньшей глубине под другим геологическими телами;
- анализ линеаментов и кольцевых структур в целях металлогенического прогноза;
- выделение скрытых структур, перспективных для поисков нефти и газа;
- неотектоника и сейсмотектоника – ландшафтная индикация новейших тектонических движений, следы современных и позднечетвертичных землетрясений;
- гидрогеология и инженерная геология – линеаменты как элементы флюидных систем и отражение активных разломов, затрудняющих сооружение инженерных объектов; диагностика оползней и карста; прокладка трасс коммуникаций.

Вместе с тем еще в начале космогеологических исследований была сформулирована задача автоматизации получения и интерпретации геологической информации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПУБЛИКАЦИЯХ ЖУРНАЛА “ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА” (1980–2009 гг.)

Методические успехи космогеологических работ на фоне общего научно-технического прогресса исследований Земли из космоса

Тенденции развития и достижения в указанных направлениях космогеологических исследований определялись в значительной мере общим прогрессом средств получения космической информации и ее обработки:

- увеличением разрешения космических изображений в традиционных спектральных диапазонах и освоением новых диапазонов (ИК-тепловая и радиолокационная съемки) при доступности материалов для широкого потребителя в оцифрованной форме;

- появлением материалов геофизических космических съемок (MAGSAT и др.);

- появлением и широким распространением систем космического позиционирования наземных объектов, среди которых ведущей стала система GPS, а в настоящее время начинает набирать силу аналогичная российская система ГЛОНАСС;

- появлением доступных материалов о трехмерных параметрах точек земной поверхности, сначала с разрешением ~500 м (DTM-500), а затем – 3" (FRTM), позволяющим построить модель рельефа $M \sim 1 : 100\,000$;

- развитием вычислительной техники и, прежде всего, персональных компьютеров, их программного обеспечения и средств получения и передачи информации.

В итоге появилась и была реализована на уровне современных знаний и развития компьютерной техники возможность всестороннего анализа и сопоставления геолого-геофизической информации, содержащейся в космических изображениях и результатах измерений, моделях рельефа разного масштаба и материалах наземных исследований, которые могли пополняться новыми данными с точными координатными привязками. Предметом разработок стало создание специализированного программного обеспечения, ориентированного на решение геологических задач.

Как известно, существуют два главных способа распознавания и определения параметров природных объектов с помощью космических средств: (1) способ, опирающийся на яркость, цвет и, как наиболее полную информацию, на спектральные характеристики объекта; (2) способ, опирающийся на геометрические характеристики объекта в плане, а именно его очертания, внутреннюю тек-

стуру и так называемый структурный рисунок — особенности пространственного сочетания объектов.

На использование многозональных космических съемок с учетом спектральных характеристик горных пород первоначально возлагались надежды как на инструмент геологического картирования вещественных комплексов и выявления рудоносных образований (Брюханов, 1983). Оптимизм вселяли полигонные исследования. Так, по спектральным характеристикам были выделены поверхностные околорудные изменения как индикаторы скрытой рудной залежи (Ильин, 1982). В ходе комплексного аэрокосмогеологического эксперимента “Тянь-Шань—Интеркосмос-88”, ориентированного на изучение активных тектонических зон (Ведешин и др., 1989), было показано, что зоны активных разломов выявляются по их спектральным характеристикам даже под относительно мощным делювиальным чехлом благодаря их повышенной раздробленности и, соответственно, увлажненности, причем это проявляется и в растительности, обогащенной тяжелыми металлами (Лукина и др., 1991).

Однако эти разработки не получили существенного применения, и причин тому, помимо трудоемкости дистанционного спектрометрирования, две. Во-первых, разнообразные воздействия на горные породы и наложенная информация (например, почвы или растительность) изменяют спектральные характеристики горных пород и часто делают их неотличимыми друг от друга. Выявленные антропогенные спектральные аномалии часто превосходят контрасты между геологическими комплексами (Карпуц и др., 1991). Во-вторых, восприятие информации геологом опирается, прежде всего, на текстуру и форму объекта. Поэтому в подавляющем большинстве геологических исследований с помощью космических средств использовались геометрические характеристики объектов (Трифонов, Шульц, 1986). На них направлялись методические разработки, и со временем эта тенденция усиливалась.

Были предложены алгоритмы автоматического обнаружения линеаментов и овально-кольцевых образований на космических изображениях (Алексеев и др., 1988, 1993). Позднее для выделения линеаментов использовался пакет программ LESSA (Балуев, Малкин, 1999; Шкарин, Шаповалов, 2006), а для выявления кольцевых структур была предложена оригинальная программа ALINA (Щепин и др., 2007).

Получила развитие цифровая обработка линеаментных сетей, под которыми в этом случае понималась совокупность всех отцифрованных на космических изображениях линий — пря-

мых, дуговых и овальных. Главные успехи здесь связаны с методическими исследованиями группы ученых во главе с В.М. Моралевым и О.Г. Шереметом, направленными на усовершенствование критериев металлогенического прогноза (Шеремет и др., 1982а, б, 1983; Артамонов и др., 1986; Андросова и др., 1992; Шеремет, Моралев, 1993; Васильев и др., 1994; Моралев и др., 1995). Методика включала в себя определение геометрических параметров линеаментных сетей (плотность и ориентировка линеаментов, особенности их сочетания), которые сравнивались с рудоносными эталонами. Выбирались наиболее информативные признаки, по которым осуществлялось прогнозирование и наземная проверка выделенных новых объектов. Методика совершенствовалась в ходе исследований. В нее был введен кластерный анализ параметров линеаментов с количественным подходом к определению уровней разделения кластеров (Шеремет, Моралев, 1993). Позднее анализ пополнился методами фрактальной геометрии, позволившими различать кластеры с разной фрактальной размерностью (Васильев и др., 1994). Сопоставление контуров кластеров с картами геологического содержания позволило уточнить тектоническое районирование и выявить скрытые различия в стиле деформаций. Методика применялась на разных масштабных уровнях от Камчатки и северной части Балтийского щита, где была продемонстрирована полезность учета тектонической зональности при линеаментном анализе (Андросова и др., 1992; Моралев и др., 1995), до космогеологической карты всего СССР М 1 : 5 000 000 (Артамонов и др., 1986) и была ориентирована на разные виды полезных ископаемых — от цветных металлов и золота до фосфоритов. Наиболее продуктивным оказалось применение методики для прогнозирования цветной и редкометалльной минерализации.

Другое направление автоматизированной обработки космической информации связано с использованием цифровых моделей рельефа и их анализом совместно с космическими изображениями местности. В оригинальной программе “Линеамент”, ориентированной на изучение новейшей тектонической структуры, реализованы алгоритмы ряда процедур на основе указанных цифровых моделей: расчет и анализ градиентов, сглаживание, выравнивание, различные фильтрации и типы выделения (Загубный 2004; Говорова, Загубный 2006). В разработках И.В. Флоринского цифровой анализ рельефа направлен на выявление линейных морфоструктурных особенностей, характеризующих мезоформы и развитие эрозионно-дренажной сети (Флоринский, 2008).

Основные геологические результаты использования космической информации

Важным *структурно-геологическим результатом*, полученным с помощью космических изображений, явилась расшифровка структуры сложноподстилаемых областей с покровно-надвиговым строением — Восточного Кавказа (Будагов и др., 1985), Полярного Урала (Кузнецов, 1988) и юго-востока Балтийского щита, где такие структуры скрыты под осадочным чехлом (Неволин, 1989). Во всех случаях главным индикатором надвиговых чешуй был их специфический геометрический образ — сложное сочетание дуг с различными текстурно-яркостными характеристиками внутреннего заполнения. Особенности формы объекта на космическом изображении были определяющими также в предложенном С.С. Шульцем-мл. (Трифонов, Шульц, 1986) методе разделения гранитоидов разного состава и металлогенической специализации и в расшифровке рифтогенной структуры района ледника Ламберта в Антарктиде (Будько, Шалаев, 1986).

К концу 1980-х годов использование традиционных видов космических съемок стало рутинным элементом структурно-геологических исследований, и методические публикации на эту тему прекратились. Последующие методические достижения связаны с освоением новых спектральных диапазонов. Разнообразные возможности геологического использования материалов радиолокационной съемки показаны в районах Печенги, Норильска и Петропавловска-Камчатского (Рундквист и др., 1994). Продемонстрированы возможности применения данных ИК-съемки в диапазоне 12–14 мкм для картирования крупных разломов и месторождений термальных вод (Вилор, Минько, 2002).

Большое место среди работ 1980-х годов занимают публикации о пространственных закономерностях и геологической природе *линеаментов и кольцевых структур*. В обзоре В.И. Макарова (Макаров, 1981), опиравшегося на ранее опубликованную карту линеаментов территории СССР (Макаров и др., 1979), показано их совпадение с глубинными структурными элементами, активизированными в поле современной планетарной трещиноватости. Мнение о линеаментах как отражении такой трещиноватости разделяли и другие исследователи в более поздних работах (Бондур, Зверев, 2007). Вместе с тем приводились обоснования связи линеаментов подвижных поясов с региональным полем новейших тектонических напряжений (Гоникберг, 1983; Балув, Малкин, 1999) и крупными активными разломами глубинного заложения (Караханян, 1985; Макаров и др., 1994). Под одним из линеаментов Белоруссии магнитной съемкой и магнитно-теллурическим зондированием обнаружено тело повы-

шенной намагниченности, указывающее на связь линеамента с неоднородностью кристаллического фундамента (Астапенко и др., 1999).

В.А. Буш и его соавторы (Буш и др., 1983) интерпретировали кольцевые структуры, выделенные на КС закрытых территорий как сечение на земной поверхности остаточных деформаций волн растяжения и сжатия, распространявшихся от квазиточечного источника. Однако большинство исследователей видит в таких кольцах и овалах поверхностное отражение изометричных древних структур фундамента (Лопатин, 1981; Полканов, 1982; Тимурзиев, Нугманов, 1985), связывая их отражение в рельефе и дренажной сети с неотектонической активизацией (Кроткова, 1988). А.Т. Зверев и Я.Г. Кац, отмечая возрастание плотности кольцевых структур с утонением коры, объясняют это их глубинным заложением (Зверев, Кац, 1986). Среди кольцевых структур докембрийских щитов В.М. Моралев и М.З. Глуховский различают две группы (Моралев, Глуховский, 1981). Крупнейшие структуры диаметром 900–1200 км рассматриваются ими как реликты древнейших бассейнов вулканогенно-осадочного литогенеза, отражающие первичную делимость литосферы (позднейшие исследования в значительной мере подорвали это мнение, выявив изначальную разобщенность частей щитов и большие латеральные перемещения, искажившие их первичную форму), и структуры диаметром 50–400 км, которые образованы гранито-гнейсовыми куполами и магматическими диапирами, окруженными зонами ультрабазит-базитовых гранулитов.

Повышенный интерес к линеаментам и кольцевым структурам вылился в 1980-е годы в создание и публикацию разнообразных карт этих морфоструктурных образований. Картам и анализу линеаментов территорий СССР и других социалистических стран посвящен тематический выпуск журнала “Исследование Земли из космоса” № 2, 1982 г. В его подготовке приняли участие такие видные геологи, как П. Банквиз (ГДР), П.М. Гочев и Х.Б. Спиридонов (НРБ), Х.Ф. Альбеар (Куба), П. Квет (ЧССР), П. Хосбаяр (МНР), В.И. Макаров и С.П. Стрельников (СССР). Позднее появились аналогичные работы по территориям Польши (Бажинский и др., 1982) и Восточной Кубы (Макаров и др., 1986), карты линеаментов и кольцевых структур отдельных регионов СССР (Беллевцев и др., 1982; Биланенко и др., 1982; Губин и др., 1988; Кузин и др., 1990а). Итогом этих работ стала публикация Д.В. Лопатина, в которой выделены крупнейшие линеаментные зоны Северной Евразии (Лопатин, 2002). По меньшей мере, их отдельные сегменты развивались длительно, и в эпохи геодинамической активизации на их пересечениях возникли месторождения-гиганты.

Тот факт, что линеаментная сеть (в широком ее понимании, включающем прямые, дуговые и овално-кольцевые линии) отражает структурные неоднородности глубокого заложения, послужил основой для изучения *глубинного строения литосферы* с помощью космической видеоинформации. Под мощным осадочным чехлом в фундаменте Восточно-Европейской платформы выделены три мегаблока, разделенные раннепротерозойскими подвижными поясами; в пределах мегаблоков выявлены черты вихревого строения, представляющие разновидность крупных структур центального типа (Лопатин, 1981, 2000). В районе Курской магнитной аномалии линеаментный анализ позволил оконтурить более частные изометричные структуры, соответствующие раннепротерозойским плутонам (Трофимов и др., 1986). Установлено, что линеаменты соответствуют глубинным разделам блоков фундамента разной плотности (Пуговкин, Калашников, 2003). В Альпийско-Гималайском подвижном поясе А.С. Караханян (Караханян, 1985), опираясь на ранее выполненные исследования (Макаров и др., 1974; Трифионов и др., 1978), показал, что линеаменты очерчивают перекрестный каркас структур разной глубины заложения.

Важное значение для развития исследований по разграничению разноглубинных структурных элементов имела статья (Васильев и др., 1999). В ней приведены результаты моделирования трехмерной блоковой структуры земной коры Мурманского массива Кольского полуострова. Выполнен анализ линеаментов, отдешифрованных на КС трех уровней пространственного разрешения. Выявленные различия размерности блоков, связанные с их разной толщиной и глубиной, представлены степенной зависимостью.

Во всех упомянутых работах выводы о глубинном строении территории основаны на сопоставлении результатов анализа линеаментной сети с геолого-геофизическими данными, полученными наземными методами. Свообразным преломлением этого направления исследований стало использование космогеологических материалов путем преобразований и численного анализа линеаментных сетей для экстраполяции результатов наземных геофизических работ и бурения (Кирсанов и др., 1990; Калинин, Терентьев, 1992; Терентьев, 1994).

Новым шагом в развитии обсуждаемого направления явилось использование данных космических магнитных и гравитационных съемок совместно с аналогичными материалами наземных наблюдений. Начало этому положили работы Д.В. Лопатина и его коллег (Лопатин, 1996), а продолжение отразилось в серии публикаций, где использованы новые данные спутников MAGSAT, GEOS-3, CHAMP (Хассан и др., 2002, 2003; Хари-

тонов и др., 2004, 2007). Исследовалась мантия под разными областями Земли. Наиболее интересные результаты получены в Тихоокеанском регионе, где на широтных и субмеридиональных профилях, охватывающих значительные глубины мантии, выявлены вариации плотности и намагниченности пород, интерпретированные как проявления субвертикальных плюмов и зон субдукции и указывающие на существование в мантии одноярусной конвекции (Харитонов и др., 2004). Развитие подобных исследований может сделать их существенным дополнением глобальной сейсмической томографии.

Бурно развивалось в рассматриваемое тридцатилетие использование космической информации в *неотектонических и сейсмотектонических исследованиях*. Большая часть неотектонических работ относится к платформенным территориям, что не удивительно, поскольку малые амплитуды новейших смещений в таких областях затрудняли их выявление наземными методами, а космическая информация открыла для этого новые возможности. Они связаны с дистанционной регистрацией ландшафтных индикаторов новейших движений: их проявлений в эрозии поверхности и аккумуляции наносов, дренажной сети, изменении береговых линий, увлажнении почв и соответственно в характере растительности (Бурлешин, 1983; Губин и др., 1988; Кроткова, 1988; Кузин и др., 1990б; Зыков, Филимонов, 1993). По этим критериям на Туранской плите разделены области, вовлеченные в неотектоническую активизацию в разное время: в олигоцене, плиоцене и квартере (Бурлешин, 1991). На Кольском полуострове оценены скорости голоценового поднятия Хибинского и Ловозерского плутонов (Трофимов и др., 1989).

В подвижных областях и, прежде всего, Альпийско-Гималайском орогеническом поясе и Центральной Азии с привлечением космической видеоинформации были уточнены области новейшего континентального осадконакопления, деформации слоистых толщ и латеральные изгибы складчатых зон, проявления активно развивающихся в новейшее время глубинных разделов коровых блоков (Кац и др., 1987). В локальном масштабе подобные высокоградиентные глубинные зоны, выраженные на поверхности линеамен- тами, установлены на Файзабадском геодинамическом полигоне; вдоль них обнаружены позднечетвертичные смещения (Иванова, 1984). В Туве анализ линеаментов обнаружил признаки продольных левосдвиговых деформаций (Гоникберг, 1983). Выявлена сейсмоконтролирующая роль крупных линеаментов Анатолийско-Кавказско-Иранского региона, причем особенно сейсмоопасными признаны пересечения линеаментов (Бунин, 1981; Коровина, Караханян, 1981). Вместе с тем установлено, что эти пересечения в ряде случаев

являются мнимыми, поскольку линеаменты отражают разноглубинные нарушения, и сейсмогенерирующие напряжения концентрируются на границах по-разному деформируемых слоев земной коры (Макаров и др., 1974; Караханян, 1985).

Несколько работ посвящены обнаружению, картированию и параметризации активных разломов, как потенциальных сейсмогенерирующих зон, с помощью крупномасштабных КС и радиолокационных изображений территорий, различных в структурном и ландшафтном отношении (Лаврусевич, Безруков, 1984; Стром, 1987; Лозиев, Урунов, 1991; Лукина и др., 1991; Макаров и др., 1994; Имаева и др., 2006). Дополнительные возможности открывает выявление на аэрокосмических изображениях активных сдвигов по смещениям и изгибам пересекаемых форм рельефа и элементов дренажной сети. Дело в том, что такие длительные (в течение последних тысячелетий) сдвиги приводят к горизонтальным смещениям пересекаемых природных и техногенных объектов на разную величину: чем ранее возник объект, тем его смещение больше. Если подвижки происходили сильными сейсмическими импульсами, то амплитуды смещений должны быть дискретными. При наличии достаточной статистики смещений таким способом можно доказать, что амплитуда смещений по разлому наращивалась при сильных землетрясениях. Отдельные подвижки позволяют оценить магнитуды этих землетрясений, поскольку связаны с ними определенной корреляционной зависимостью. Этот метод, предложенный Р.Е. Уоллесом (Wallace, 1968) и реализованный в Центральной Азии В.Г. Трифоновым (Трифонов, 1985; Трифонов и др., 1988, 1990), служит одним из критериев параметризации сейсмогенерирующих зон при оценке сейсмической опасности территории, т.е. сейсмораионировании, или долгосрочном сейсмическом прогнозе.

Важным шагом в развитии сеймотектоники стали измерения современных движений земной поверхности, в том числе и сейсмогенных, средствами космической геодезии, прежде всего высокоточными GPS наблюдениями (Татевян, 1999).

Представлены данные по дистанционной регистрации геологических последствий современных землетрясений (Ишанов и др., 1990; Богачкин и др., 1993). Предложены новые виды *предвестников землетрясений*, регистрируемые космическими средствами. Так, А.А. Григорьев и К.Я. Кондратьев отметили возможность газовых эманацій, предшествующих сильным землетрясениям и вызывающих возникновение облаков (Григорьев, Кондратьев, 1996). Приведены изображения со спутника NOAA, свидетельствующие о появлении таких облачных аномалий над активными разломами во время и вблизи эпицентров Спитакского землетрясения

7 декабря 1988 г. в Армении и сильных землетрясений на востоке Турции в марте—апреле 1992 г. (Морозова, 1993). Температурные аномалии в районах очагов сильных землетрясений зарегистрированы космическими съемками в ИК-тепловом диапазоне. Они выявлены перед сильными землетрясениями в Китае в провинции Юньнань в ноябре 1986 г. и в провинции Шэнси в октябре 1989 г. (Григорьев, Кондратьев, 1993), а также в Средней Азии, на Камчатке, в Японии, Испании, Италии, Саудовской Аравии и Калифорнии (Тронин, 2005). По мнению А.А. Трониной, наиболее вероятным источником тепловых аномалий явилось изменение влажности почвы за счет выделения флюидов при подготовке землетрясения. В.В. Иванов привел данные об изменении гравитационных аномалий перед сильными землетрясениями в океане (Иванов, 2004). Они выражены вариациями уровня моря амплитудой до 1 м на расстояниях до 50 км (файлы MGDР), что на порядок превосходит эффект океанских течений. В работе (Сергеенко, Харитонов, 2005) обращено внимание на магнитосферно-ионосферные возмущения как предвестники землетрясений. При всей важности того, что их появление предшествует землетрясениям, эти возмущения возникают на территориях, намного превышающих плейстоценовые области землетрясений, и не установлено корреляции их магнитуд с параметрами возмущений. Это не позволяет пока считать последние эффективными предвестниками.

Новый метод прогноза землетрясений предложили В.Г. Бондур и А.Т. Зверев (Бондур, Зверев, 2005, 2007). Проанализировав линеаментные системы на космических изображениях Калифорнии и Перу 2001—2004 гг., они обнаружили, что степень выраженности линеаментов начинает возрастать за 2—3 мес. перед местным землетрясением, достигает максимума примерно за 20 дней до него, а после землетрясения убывает и через 2—3 мес. входит в норму. Эффект повторялся при пяти сейсмических событиях с магнитудами 4.2—6.5 в зоне разлома Сан-Андреас в Калифорнии (04.09.2001 г. с $M = 4.2$; 22.02.2002 г. с $M = 5.2$; 22.12.2003 г. с $M = 6.5$; 18.09.2004 г. с $M = 5.5$ и 28.09.2004 г. с $M = 6.0$) и отмечен в Перу при землетрясении 27.01.2004 г. ($M = 5.2$). В сейсмичных районах выраженность линеаментных систем не обнаруживает подобных кратковременных вариаций, оставаясь устойчивой независимо от вида съемки. Предполагается, что возрастание выраженности линеаментов связано с изменениями напряженно-деформированного состояния среды и соответственно ее флюидного режима в период подготовки и реализации землетрясения.

Ряд публикаций посвящен космическому изучению другого опасного геологического явления — *вулканизма*. В работе (Григорьев, Кондратьев, 1996) отмечены такие преимущества его космиче-

ского мониторинга, как своевременное оповещение о начале извержения, информация о его режиме, оценка глобальных последствий поступления аэрозольных и газовых выбросов в атмосферу. Обращено внимание на ИК-съемки, регистрирующие тепловые аномалии и их изменения в вулканических областях даже сквозь неплотный облачный покров. В качестве примера космического мониторинга рассмотрены материалы по извержению вулкана Пинатубо в 1991 г. на Филиппинах (Кондратьев, 1993). Представлены результаты мониторинга вулканов Камчатки (Хренов и др., 1999). Ключевская группа камчатских вулканов изучалась с использованием материалов радиолокационных съемок в диапазоне 23.5 см (Шкарин, Шаповалов, 2006). Разделены лавовые потоки разного возраста и типа. Линеamentным анализом по программе LESSA на склоне стратовулкана выделена зона ареального вулканизма.

Неизменный интерес в течение рассматриваемого тридцатилетия вызывало применение космической информации для *металлогенического прогноза* (Баратов и др., 1981; Багрова, Антонова, 1987; Ган-Очир и др., 1988; Скублова, 1989; Скублова и др., 1990; Пуговкин, 2000; Лопатин, 2001; Миловский, Галкин, 2002; Миловский и др., 2002, 2004, 2007). Как и упоминавшиеся работы группы В.М. Моралева и О.Г. Шеремета, также ориентированные на металлогенический прогноз, эти исследования базировались на отражаемых на КС геометрических образах различных структурных элементов, среди которых путем сопоставления с наземными геолого-геофизическими данными выделялись рудоконтролирующие и рудоконцентрирующие структуры. На основании сходства с известными месторождениями прогнозировались новые перспективные участки. Поскольку месторождения, как тела с многократно повышенной концентрацией химических соединений, являются природными аномалиями, их строение и соответственно геометрическое отражение на земной поверхности своеобразны. Поэтому такой “образный” подход представляется перспективным.

Главными структурными элементами, выделяемыми на космических изображениях для металлогенического анализа, были овалы-кольцевые структуры и линеamentы, в большинстве случаев отождествляемые с разломами и зонами трещиноватости. В ранних работах такое отождествление было в значительной мере гипотетическим, и внимание уделялось, прежде всего, соотношениям и, особенно, узлам пересечения линий разной кривизны. Позднее принималось в расчет также морфоструктурное содержание колец и овалов (Скублова и др., 1990), а с ростом разнообразия и разрешающей способности космических изображений на них стали выделять морфокинематические типы разломов, поля даек, палеовулканы, зоны метасоматоза и другие геологические образо-

вания, важные для поисков месторождений (Миловский, Галкин, 2002; Миловский и др., 2004). Космометаллогенические исследования охватили многие рудные районы бывшего СССР, и их объектами были разнообразные полезные ископаемые. Отмечена специфика геометрического образа трубок взрыва (потенциально алмазонасытых кимберлитов) на севере Восточно-Европейской платформы (Багрова, Антонова, 1987), а Д.В. Лопатин сформулировал их геометрические, ландшафтные и фототонные признаки на КС (Лопатин, 2001). Особыми диагностическими признаками отличаются участки, перспективные на поиски урановых месторождений типа “несогласий” (Пуговкин, 2000). Отдельным направлением космометаллогенического прогноза стало построение моделей рудных объектов (Перцов и др., 1994; Кузнецов, Самсонов, 1995).

Значительное число работ посвящено использованию космической информации при *прогнозно-поисковых изысканиях на нефть и газ*. В ранних работах отмечалось значение линеamentов, отождествляемых с зонами разломов и повышенной трещиноватости, благоприятными для вертикальной миграции пластовых флюидов, в том числе углеводородных (Амурский, Бондарева, 1981). Позднее было обращено внимание на геоиндикацию изометричных форм рельефа для выявления локальных нефтегазоносных структур, выраженных на местности слабыми неотектоническими поднятиями (Гущин, 1986; Яхимович, 1986; Миловский и др., 2005). В работе (Трофимов и др., 1990) в качестве индикаторов указываются морфологические, гипсометрические и морфометрические признаки структур. А.А. Аксенов и В.Г. Можаяева приводят для аридных территорий конкретные перечни геоиндикаторов разломов, как зон вертикальной миграции флюидов, и локальных структур, перспективных для поисков нефти и газа (Аксенов, Можаяева, 1990). Обоснована важность и описаны способы дистанционного выявления глубинного строения нефтегазоносных территорий. В работе (Мокиенко, 1985) показаны результаты использования КС для реконструкции тектоники подсольевых отложений Прикаспийской впадины, где предполагается широкое распространение скрытых локальных поднятий. И.О. Смирнова на примере Чарджоуской ступени в Южном Приаралье продемонстрировала возможности использования КС для выделения потенциально нефтегазоносных рифовых построек (Смирнова, 1995).

Важным шагом в развитии указанного направления исследований явился эксперимент с самолетным ИК-тепловым зондированием Тенгизского нефтяного месторождения в Северо-Западном Казахстане (Злобин и др., 1993). Эксперимент продемонстрировал возможность прямого поиска нефтегазовых залежей в аридных и субаридных усло-

виях, на возможность которого прежде указывал В.И. Лялько.

Ряд публикаций посвящен применению космической информации в *гидрогеологии*. На примерах Туранской плиты (Бурлешин, Вилькович, 1990) и Центрального Афганистана (Объедков, Зурмати, 1992) обоснована важность выделения линеаментов как зон повышенной трещиноватости для поиска подземных вод. В работе (Комаров и др., 1998) для района Беловского водохранилища в Кемеровской области предложен алгоритм определения уровня подземных вод по комплексу дистанционных и наземных данных.

Широко обсуждалось использование космической информации при *изучении экзогенных геологических процессов и решении задач инженерной геологии*. Обоснована важность дистанционной оценки тектонической раздробленности и связанных с ней экзогенных процессов, опасных для строительства (Ревзон, Юровский, 1983). Предложена автоматизированная технология картографирования экзодинамики горного рельефа при прокладке коммуникаций (Ревзон и др., 1988). В Иссыккульской впадине создана карта селевой опасности (Чалмаев, Абдуллаева, 1989). Продемонстрированы возможности космического мониторинга современных экзогенных процессов на осушенной части Аральского моря (Будникова и др., 1996) и эволюции дельты р. Сефидруд на иранском побережье Каспия (Красножон и др., 1999).

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Главные успехи в области геологического применения космической информации связаны с общим прогрессом средств ее получения и обработки. По мере распространения тех или иных новых возможностей, методов и технологий они переходят в разряд рутинных операций, обычных и даже обязательных в практике геологических исследований и производственной деятельности, и перестают быть объектом научных публикаций. Это произошло с использованием КС в геолого-съёмочных работах, а сейчас происходит с применением КС в сейсмотектонике, в частности, при картировании и параметризации активных разломов — потенциальных источников сильных землетрясений и зон максимальных сейсмических воздействий.

Вместе с тем развитие космической техники и средств обработки получаемой с ее помощью информации открыло возможности для решения новых геолого-геофизических задач или старых задач новыми способами. К их числу относятся: автоматизированный совместный анализ космических изображений, параметров рельефа, установленных космическим зондированием, и назем-

ных данных; расшифровка глубинной структуры земной коры и мантии с помощью космогеофизического зондирования; использование ИК-тепловых съемок для изучения современной геодинамики активных регионов и прямого поиска нефтегазовых залежей; мониторинг современных эндогенных и экзогенных геодинамических процессов и оценка их экологических последствий.

Обе указанные тенденции развития космогеологических исследований, очевидно, будут проявляться и впредь. В проблеме текущего прогноза землетрясений обозначилась еще одна тенденция: обнаружение связанных с ними явлений на поверхности океана и в атмосфере, в частности, магнитосфере и ионосфере, находящихся вне сферы приложения собственно геолого-геофизических методов исследования. Хотя соотношения этих эффектов с параметрами землетрясений недостаточно изучены и потому они пока не могут рассматриваться в качестве предвестников, такой подход (как и геоиндикационное выявление геологических структур и интерес к экологическим последствиям их развития) отражает возросшее осознание взаимозависимости природных процессов.

В последние два десятилетия количество космогеологических публикаций в журнале “Исследование Земли из космоса” сократилось по сравнению с 1980-ми годами более чем в 2 раза. Помимо социально-экономических причин это связано, на мой взгляд, с потерей интереса к работам, лишенным методической специфики и ориентированным только на получение геолого-геофизических результатов. Сохранился интерес лишь к исследованиям, открывающим новые методики и возможности применения космической информации, а их и в 1980-е годы было немного.

В процессе работ по использованию космической информации появился ряд новых идей, имеющих значение для решения тех или иных собственно геологических задач. Назову некоторые из них.

1. С увеличением степени генерализации космического изображения поверхности суши на нем затушевываются детали, характеризующие геологию приповерхностных слоев, и более отчетливо проступают черты глубинного строения региона. Речь идет о структурных элементах, активных на новейшем этапе геологического развития. Тем самым появляется возможность, интерпретируя изображения разной степени генерализации и сопоставляя результаты интерпретации с имеющимися геолого-геофизическими данными, сравнивать примерно одновозрастные структурные элементы разных глубин земной коры, а иногда и всей литосферы, и выявлять их сходство и различие. Применение этого подхода, предложенного В.И. Макаровым и В.Г. Трифоновым, в

ряде подвижных областей привело к концепции тектонической расчлененности литосферы — весьма важного элемента современной тектонической теории.

2. Минерагеническая специализация территории определяется ее структурно-вещественными свойствами, которые проявляются на земной поверхности геометрическими образами, дешифрируемыми на космических изображениях. Идея реализована В.М. Моралевым и О.Г. Шереметом путем анализа линеаментных сетей и дает дополнительные критерии металлогенического прогноза.

3. Нефтяная или газовая залежь в ловушке того или иного типа (чаще всего структурном поднятии) придает такой структуре дополнительные термические свойства. Деятельность микроорганизмов внутри залежи повышает ее температуру, а усиление флюидной проницаемости, связанное с новейшей активизацией трещин и отчасти обусловленное изостатическим поднятием в результате того, что залежь легче вмещающих пород, приводит к повышению увлажнения грунта над нею. Это может быть уловлено специальной фильтрацией дистанционных сигналов в ИК-тепловом диапазоне. Идея принадлежит В.И. Лялько и реализована на Тенгизском нефтяном месторождении Е.Л. Злобиным, Б.Н. Можаяевым и их сотрудниками. Она открывает путь к прямому обнаружению залежей в структурах, перспективных для поисков нефти и газа.

4. Изменения напряженно-деформированного состояния среды в очаговой области будущего землетрясения проявляются перед ним активизацией трещин и их флюидной проницаемости, что отражается возрастанием выраженности линеаментной сети, регистрируемой на космических изображениях. Идея принадлежит В.Г. Бондуру и А.Т. Звереву, обосновавшим ее в очаговых зонах ряда землетрясений Калифорнии и Перу, и дает дополнительный предвестник сейсмического события.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов А.А., Можаяева В.Г.* Задачи аэрокосмогеологических исследований по структурному обеспечению нефтегазопроисхождения работ // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 4. С. 26–32.
- Алексеев А.С., Казанцев И.Г., Пяткин В.П.* Томографический подход к выделению линеаментов на аэрокосмических изображениях // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 5. С. 99–103.
- Алексеев А.С., Пяткин В.П., Салов Г.И.* Простые непараметрические критерии обнаружения кратеров на аэрокосмических изображениях // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 1. С. 103–110.
- Амурский Г.И., Бондарева М.С.* Использование космических снимков Земли при изучении строения зон дегазации нефтегазоносных бассейнов // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 3. С. 5–10.
- Андросова Н.К., Моралев В.М., Шеремет О.Г.* Оценка достоверности прогнозирования эндогенного оруденения на основе космогеологической информации (на примере полуострова Камчатка) // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 4. С. 82–92.
- Артамонов М.А., Моралев В.М., Рихтер Д.Г., Шеремет О.Г.* Оценка корреляционных связей между структурными элементами, выявленными на космических снимках, и металлогеническими зонами // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 4. С. 42–50.
- Астапенко В.Н., Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А., Шишонок Н.А.* О природе регионального линеамента, выделенного по космическим снимкам в центральной Беларуси // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 6. С. 64–69.
- Багрова З.А., Антонова И.Б.* Космические снимки Онежско-Ладожского перешейка и прогнозирование полезных ископаемых // Исслед. Земли из космоса. 1987. № 2. С. 66–72.
- Бажинский Ю., Данель-Данельская Б., Граничный М., Вильчинский М.* Линеаменты и кольцевые образования территории Польской Народной Республики // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 5. С. 20–22.
- Балуев А.С., Малкин Б.В.* Поля тектонических напряжений северо-западной части Байкальской рифтовой зоны по данным компьютерного анализа космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 2. С. 71–78.
- Баратов Р.Б., Безуглый М.М., Ишанов М.Х., Пашков Б.Р.* Опыт прогнозирования эндогенного оруденения на Памире по материалам космических съемок // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 1. С. 31–36.
- Белевцев Я.Н., Быстревская С.С., Семенюк Н.П., Земсков Г.А., Зыков Е.А.* Космотектоническая карта Украинского щита // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 4. С. 5–14.
- Биланенко В.А., Шаров Г.Н., Ян-Жин-Шин В.А.* Космофототектоническая карта Якутской АССР // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 1. С. 25–31.
- Богачкин Б.М., Нечаев Ю.В., Рогожин Е.А., Хованский Б.Н., Язев П.Н.* Использование материалов аэрокосмических съемок при изучении эпицентральной зоны Рачинского землетрясения 1991 года на Кавказе // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 6. С. 94–100.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
- Брюханов В.Н.* О некоторых основных параметрах космических снимков с позиции их геологическом информативности // Исслед. Земли из космоса. 1983. № 4. С. 39–46.
- Будагов Б.А., Микаилов А.А., Алиев А.С., Ализаде Э.К.* Основные закономерности морфотектонического строения Восточного Кавказа, выявленные методом дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 2. С. 67–72.

- Будникова Т.И., Гельдыева Г.В., Уварова А.К.* Мониторинг развития рельефообразующих процессов и природных комплексов осушенного дна Аральского моря // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 107–113.
- Будько В.М., Шалаев В.С.* Особенности геологического строения рифтовой зоны ледника Ламберта (Антарктида) на данных дешифрирования космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 6. С. 38–47.
- Бунин Г.Г.* Связь источников подземных вод и афтершоков Дагестанского землетрясения 14 мая 1970 г. с линейными, выявленными по космоснимкам // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 2. С. 25–30.
- Бурлешин М.И.* Применение космических снимков для анализа плана новейших тектонических движений (на примере дельты Аму-Дарьи) // Исслед. Земли из космоса. 1983. № 4. С. 59–63.
- Бурлешин М.И.* Использование космических снимков для изучения особенностей развития новейших тектонических структур на территории Туранской плиты // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 1. С. 98–102.
- Бурлешин М.И., Вилькович Р.В.* Использование космических снимков для гидрогеологической оценки зон повышенной трещиноватости Устюрта и Мангышлака // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 1. С. 49–54.
- Буш В.А., Яхимович Н.Н., Терехов В.И.* О возможном происхождении кольцевых структур закрытых территорий (на примере Оренбургской области и прилегающих территорий) // Исслед. Земли из космоса. № 2. С. 5–13.
- Васильев Л.Н., Качалин А.Б., Моралев В.М., Терехов Е.Н.* Фрактальные перколяционные кластеры в сети линейных элементов, выявленных по космическим снимкам, и тектоническое районирование восточной части Балтийского щита // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 5. С. 39–50.
- Васильев Л.Н., Качалин А.Б., Моралев В.М., Терехов Е.Н., Тюфлин А.С.* Использование космических снимков для моделирования трехмерной блоковой структуры земной коры (на примере Мурманского массива на Кольском полуострове) // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 3. С. 59–66.
- Ведешин Л.А., Макаров В.И., Трифонов В.Г.* Аэрокосмический эксперимент “Тянь-Шань—Интеркосмос-88” // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 4. С. 120–122.
- Вилор Н.В., Минько Н.П.* Спутниковый мониторинг инфракрасного излучения геолого-структурных элементов Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 4. С. 55–61.
- Ган-Очир Ж., Ганзориг М., Ариунаа З.* Опыт количественного анализа сети разломов, выявленных по аэрокосмическим снимкам в Мухугайском районе МНР // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 1. С. 42–47.
- Говорова Н.Н., Загубный Д.Г.* Использование цифровых моделей рельефа для анализа неотектонического строения территории (на примере района Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 6. С. 10–21.
- Гоникберг В.Е.* Использование космических снимков для реконструкции новейшего поля тектонических напряжений // Исслед. Земли из космоса. 1983. № 6. С. 39–51.
- Григорьев А.А., Кондратьев К.Я.* Аэрокосмические природоресурсные и экологические исследования в Китае // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 2. С. 119–123.
- Григорьев А.А., Кондратьев К.Я.* Спутниковый мониторинг природных и антропогенных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 3. С. 68–78.
- Губин В.Н., Левков Э.А., Карабанов А.К.* Неотектоническое районирование территории Белоруссии на основе космической информации // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 5. С. 50–56.
- Гущин Б.М.* Геоиндикационное дешифрирование аэрокосмических снимков при нефтегазопроисследовательских работах в широтном Приобье и на сопредельных площадях Западной Сибири // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 2. С. 41–49.
- Загубный Д.Г.* Способы обработки цифрового рельефа программой “Lineament” // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 6. С. 30–38.
- Зверев А.Т., Кац Я.Г.* Дешифрирование кольцевых структур на космических снимках и их корреляция с геофизическими полями и строением земной коры территории СССР // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 43–50.
- Злобин Е.Л., Можаяев Б.Н., Можаяева В.Г., Сидоров В.А., Феоктистов А.А.* Эксперимент по ИК-тепловому зондированию района нефтяного месторождения Тенгиз (Казахстан) // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 5. С. 102–104.
- Зыков Д.С., Филимонов Ю.Л.* Дистанционное изучение новейшей и молодой активизации геологических структур в районе рудного поля Бестюбе (Северный Казахстан) // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 5. С. 89–95.
- Иванов В.В.* Изменения гравитационных аномалий при сильнейших землетрясениях // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 3. С. 73–80.
- Иванова Т.П.* Применение космогеологических методов в сейсмоструктурных исследованиях // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 4. С. 46–52.
- Ильин А.В.* Дистанционное зондирование в геологической службе США // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 3. С. 103–105.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Слепцов С.В.* Активные сейсмоструктуры Лено-Алданского междуречья (Центральная Якутия) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 62–67.
- Ишанов М.Х., Лозиев В.П., Саидов М.С., Урунов Б.Д.* Результаты применения аэрокосмических снимков при изучении последствий Хисорского землетрясения // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 5. С. 59–65.
- Калинин И.В., Терентьев И.В.* Экстраполяция данных бурения с помощью нелинейной фильтрации аэрокосмических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 1. С. 41–47.
- Караханян А.С.* Линейная тектоника Анатолийско-Кавказско-Иранского региона // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 4. С. 41–47.
- Карпуц М.Р., Моралев В.М., Нильсон Л.П., Робертс Д.* Использование многозональных космических снимков для изучения геологии и природной среды (на примере западной части Кольского полуострова) // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 5. С. 87–91.

- Кац Я.Г., Тевелев А.В., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. К методике изучения динамики геологических процессов по аэрокосмическим данным (на примере юга СССР) // Исслед. Земли из космоса. 1987. № 3. С. 68–75.
- Кирсанов А.А., Терентьев И.В., Фадеева И.Н. Об экстраполяции геофизических данных с помощью аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 3. С. 44–49.
- Комаров С.А., Миронов В.Л., Романов А.Н., Евтюшкин А.В. Измерения и алгоритм обработки данных в задаче дистанционного зондирования уровня грунтовых вод // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 4. С. 93–101.
- Кондратьев К.Я. Комплексный мониторинг извержения вулкана Пинатубо // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 1. С. 111–122.
- Коровина Т.Л., Караханян А.С. К вопросу о соотношении сейсмичности с линеаментами Анатолийско-Кавказско-Иранского сегмента Средиземноморского пояса // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 6. С. 27–34.
- Космическая информация в геологии / Под ред. Трифонова В.Г., Макарова В.И., Сафонова Ю.Г. и Флоренского П.В. М.: Наука, 1983. 536 с.
- Космическая съемка и задачи геологии // Аэрокосмические исследования Земли / Под ред. Зонна С.В. М.: Наука, 1979. С. 247–298.
- Красножон Г.Ф., Лахиджани Х., Воропаев Г.В. Эволюция дельты р. Сефидруд по данным космических съемок иранского побережья Каспийского моря // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 1. С. 105–111.
- Кроткова О.Т. Кольцевые структуры закрытых платформенных территории и оценка их тектонической активности по геоморфологическим данным // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 6. С. 57–65.
- Кузин И.Л., Ероменко В.Я., Пятницкий В.К. Космотектоническая карта нефтегазоносных областей Сибири // Исслед. Земли из космоса. 1990а. № 4. С. 42–48.
- Кузин И.Л., Ероменко В.Я., Пятницкий В.К. Анализ космотектонической карты нефтегазоносных областей Сибири для изучения неотектоники и оценки перспектив // Исслед. Земли из космоса. 1990б. № 5. С. 38–43.
- Кузнецов Е.В. Особенности геологического строения Полярного Урала и закономерности размещения некоторых полезных ископаемых, установленные с помощью дешифрирования космических и аэрофотоснимков // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 6. С. 66–71.
- Кузнецов Е.В., Самсонов В.В. Прогнозирование рудоносных структур методом компьютерного моделирования по материалам дистанционных съемок // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 3. С. 81–88.
- Лаврусевич А.И., Безруков Д.Д. Пример совместного использования данных наземных исследований и космических снимков для изучения динамики зоны Северо-Зеравшанских сейсмогенных разломов // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 3. С. 39–43.
- Лозиев В.П., Урунов Б.Д. Изучение структурных особенностей и сейсмических явлений в зоне сопряжения Каратегина и Таджикской депрессии по космическим снимкам // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 5. С. 98–105.
- Лопатин Д.В. Анализ структур фундамента Восточно-Европейской платформы дистанционными методами // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 6. С. 35–40.
- Лопатин Д.В. Использование орбитальной информации для изучения тектонического строения Северной Евразии // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 93–100.
- Лопатин Д.В. Структурно-металлогеническая модель фундамента Восточно-Европейской платформы по данным тектономагматических реконструкций и орбитальных исследований // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 1. С. 79–85.
- Лопатин Д.В. Поиски трубок взрыва на территории Восточно-Европейской платформы с использованием аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 1. С. 62–72.
- Лопатин Д.В. Линеamentная тектоника и месторождения-гиганты Северной Евразии // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 2. С. 77–91.
- Лукина Н.В., Лялько В.И., Макаров В.И., Скобелев С.Ф., Спиридонов Х., Шехтова Ю., Черневишка М. Предварительные результаты спектрометрического исследования зон разломов Файзабадского и Фрунзенского полигонов. Международный аэрокосмический эксперимент “Тянь-Шань–Интеркосмос-88” // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 6. С. 82–92.
- Макаров В.И. Линеamentы (проблемы и направления исследований с помощью аэрокосмических средств и методов) // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 4. С. 109–115.
- Макаров В.И., Полетаев А.И., Махорин А.А., Дудкин С.Ю. Проявление активных тектонических нарушений на космических радиолокационных изображениях и некоторые результаты линеamentного анализа центральной части Большого Кавказа // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 4. С. 58–67.
- Макаров В.И., Скобелев С.Ф., Трифонов В.Г., Флоренский П.В., Шукин Ю.К. Глубинная структура земной коры на космических изображениях // Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. М.: ВИНТИ, 1974. № 2. С. 9–42.
- Макаров В.И., Скобелев С.Ф., Трифонов В.Г., Флоренский П.В. Карта линеamentов территории СССР // Beitrage zur Fernerkundung, Geologische Forschung mit kosmischen Mitteln. -Veroff. des Zentralinst. fur Physik der Erde. № 61. Potsdam, 1979. P. 17–27.
- Макаров В.И., Трифонов В.Г., Волчкова Г.И., Формель Ф., Брежневский К., Оро Х., Перес К. Линеamentы востока Кубы: опыт геологической интерпретации аэро- и космических изображений // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 4. С. 75–85.
- Миловский Г.А., Бугарь В.Д., Деревянко И.В. Крупномасштабное прогнозирование оруденения и нефтегазоносности на Приполярном Урале // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 4. С. 73–81.
- Миловский Г.А., Валетов А.В., Харитонов С.А., Чехович К.М. Прогнозирование медно-никелевого оруденения в Норильском рудном районе // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 1. С. 67–71.
- Миловский Г.А., Галкин А.С. Применение крупномасштабной космической съемки для прогнозирования комплексного медно-никелевого оруденения в Мон-

- чегорском районе // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 2. С. 71–76.
- Миловский Г.А., Денисова Е.А., Ежов А.А., Каленкович Н.С.* Прогнозирование оруденения на Собь-Харьбейской площади (Полярный Урал) по космогеологическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 29–36.
- Миловский Г.А., Денисова Е.А., Новожилов А.А., Филатов Н.В.* Космогеологическое прогнозирование газовых месторождений в междуречье Мессояха–Большая Хета (Таймырский автономный округ) // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 6. С. 69–74.
- Мокиенко В.Ф.* Тектоника подсолевых отложений по результатам дешифрирования космических снимков западной части Прикаспийской впадины // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 5. С. 44–52.
- Моралев В.М., Глуховский М.З.* Кольцевые структуры докембрийских щитов по данным дешифрирования космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 3. С. 18–24.
- Моралев В.М., Пржиялговский Е.С., Шеремет О.Г.* Цифровая обработка линейной сети, выявленной по космическим снимкам, и прогноз золотой минерализации в системе зеленокаменных поясов // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 45–58.
- Морозова Л.И.* Атмосферные индикаторы землетрясений Ближнего Востока // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 6. С. 81–83.
- Неволин С.Н.* О системе дуговых разломов, пространственно объединяющей зеленокаменные комплексы юго-восточной части Балтийского щита // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 1. С. 55–58.
- Объедков Ю.Л., Зурмати М.Н.* Анализ гидрогеологической роли разрывных нарушений Центрального Афганистана по материалам космической видеoinформации // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 5. С. 86–92.
- Перцов А.В., Гальперов Г.В., Смирнова Т.Н., Антипов В.С.* Прогнозно-поисковые модели крупнейших рудных объектов на основе материалов дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 6. С. 96–107.
- Полканов В.П.* Кольцевые образования на междуречье рек Тунга и Тюкана и их связь с тектоническими структурами древнего заложения // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 1. С. 37–42.
- Пуговкин А.А.* Компьютерная обработка результатов дешифрирования космических материалов для ресурсной оценки территории (Карело-Кольский регион) // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 1. С. 65–71.
- Пуговкин А.А., Калашиников В.И.* Некоторые аспекты методики прогнозирования алмазоносных площадей с использованием материалов космических съемок // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 1. С. 82–87.
- Ревзон А.Л., Бгатов А.П., Богданов А.И., Богданов А.М.* Инженерная оценка экзодинамики горного рельефа по данным съемки из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 4. С. 41–48.
- Ревзон А.Л., Юровский Б.Л.* Космическая информация и прогнозирование экзогенных процессов // Исслед. Земли из космоса. 1983. № 4. С. 47–53.
- Рундквист И.К., Денисов А.Н., Захаров В.И., Питкянен Ф.А., Смирнова Т.Н., Тарасенкова Л.В.* Использование радиолокационных изображений с КА “Алмаз-1” для выявления разновозрастных геодинамических систем // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 2. С. 94–108.
- Садов А.В., Ревзон А.Л.* Аэрокосмические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 223 с.
- Сергеенко Н.П., Харитонов А.Л.* Краткосрочные магнитосферно-ионосферные предвестники катастрофических землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 6. С. 61–68.
- Скублова Н.В.* Рудоконцентрирующие структуры Центрального Казахстана, выявленные по аэро- и космическим снимкам при автоматизированном прогнозировании // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 1. С. 49–54.
- Скублова Н.В., Мишин В.И., Питкянен Ф.А.* Локальный прогноз оруденения по аэрокосмогеологическим и геоиндикационным данным (с использованием ЭВМ) // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 2. С. 52–59.
- Смирнова И.О.* Особенности распространения рифогенной формации на Чарджоуской ступени по материалам дистанционных съемок // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 2. С. 71–79.
- Стром А.Л.* Применение космических снимков при палеосейсмогеологических исследованиях (на примере Монгольского Алтая) // Исслед. Земли из космоса. 1987. № 2. С. 81–84.
- Татевиан С.К.* Роль спутниковых локационных измерений в изучении современной геодинамики // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 1. С. 87–96.
- Терентьев И.В.* Задача оценивания параметров геофизических полей с помощью аэрокосмических изображений // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 5. С. 17–24.
- Тимурзиев Л.И., Нугманов Я.Д.* Кольцевые морфо-структуры и их геологическая природа (на примере Южного Мангышлака) // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 4. С. 48–52.
- Трифонов В.Г.* Особенности развития активных разломов // Геотектоника. 1985. № 2. С. 16–26.
- Трифонов В.Г., Бызова С.Л., Ведешин Л.А., Деревянко О.С., Иванова Т.П., Копп М.Л., Курдин Н.Н., Макаров В.И., Скобелев С.Ф., Флоренский П.В.* Вопросы методики геологического дешифрирования космических изображений Земли // Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. М.: ВИНТИ, 1973. С. 11–77.
- Трифонов В.Г., Макаров В.И., Деревянко О.С., Панин В.М., Петренко А.С., Скобелев С.Ф., Флоренский П.В., Шорин-Константинов Б.П.* Геологическое изучение Земли из космоса. М.: Наука, 1978. 228 с.
- Трифонов В.Г., Макаров В.И., Кожурин А.И., Скобелев С.Ф., Шульц С.С. мл.* Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М.: Наука, 1988. 134 с.
- Трифонов В.Г., Макаров В.И., Скобелев С.Ф.* Таласо-Ферганский активный правый сдвиг // Геотектоника. 1990. № 5. С. 81–90.
- Трифонов В.Г., Шульц С.С. мл.* Особенности геологического применения космической информации // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 32–42.
- Тронин А.А.* Возможность применения космической тепловой съемки для исследования землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 86–96.

- Трофимов Д.М., Борисюк А.П., Борисюк Н.В.* К проблеме контрастности проявления на космических снимках изометричных магматогенных структур // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 1. С. 45–48.
- Трофимов Д.М., Полканова Л.П., Петров А.И., Алипова Н.Ю., Алференок А.В., Жигалин А.А., Михайлов А.В.* Результаты аэрокосмогеологических исследований при поисках локальных структур основных нефтегазовых территорий СССР // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 4. С. 33–41.
- Трофимов Д.М., Страхов Н.А., Богословский В.А., Ильина Е.Б., Казанцев В.А., Кузьмина Э.Н.* Использование космических снимков при выявлении и геолого-геофизическом изучении скрытых плутонов в раннепротерозойских трогах // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 51–56.
- Флоринский И.В.* Расчет производящей функции высоты для выделения структурных линий рельефа по спутниковым данным и топографическим картам // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 43–51.
- Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкерев С.А.* Изучение глубинных неоднородностей тектоносферы и мантии Земли по спутниковым магнитным и гравитационным данным // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 3. С. 81–87.
- Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкерев С.А., Фонарев Г.А., Харитонова Г.П.* Использование комплекса спутниковых геофизических данных для изучения глубинных неоднородностей строения тектоносферы Земли в пределах Европейско-Африканского меридионального сектора // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 34–42.
- Хассан Г.С., Харитонов А.Л., Серкерев С.А.* Закономерности изменения основных трехмерных статистических характеристик потенциальных полей Восточной Азии по спутниковым данным и их связь с эпицентрами землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 5. С. 29–38.
- Хассан Г.С., Харитонов А.Л., Серкерев С.А.* Исследование глубинного строения по спутниковым магнитным и гравиметрическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 1. С. 28–38.
- Хренов А.П., Пиери Д., Блинков А.Н., Зайцев В.В., Шкарин В.Е.* Аэрокосмические исследования действующих вулканов Камчатки в 1993–1996 годах // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 6. С. 70–82.
- Чалмаев Л.В., Абдуллаева З.Г.* Селевые явления Исык-кульской котловины и их оценка с использованием материалов космических съемок // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 3. С. 84–90.
- Шеремет О.Г., Моралев В.М.* Использование кластерного анализа при цифровой обработке линейных сетей, выявляемых на космических снимках // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 3. С. 71–83.
- Шеремет О.Г., Моралев В.М., Гоникберг В.Е.* О способе определения оптимальной площади осреднения геометрических параметров линейных сетей // Исслед. Земли из космоса. 1982а. № 4. С. 15–19.
- Шеремет О.Г., Моралев В.М., Перфильев Ю.С., Рейтлингер А.С.* Методика количественной обработки результатов дешифрирования космических снимков для решения геологических задач // Исслед. Земли из космоса. 1982б. № 5. С. 12–19.
- Шеремет О.Г., Перфильев Ю.С., Моралев В.М.* Особенности методики линейного анализа при горно-геологической оценке месторождений фосфоритов // Исслед. Земли из космоса. 1983. № 6. С. 30–38.
- Шкарин В.Е., Шаповалов Д.М.* Использование данных радиолокационной космической съемки для исследования районов современного вулканизма (на примере Ключевской группы вулканов) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 79–87.
- Щепин М.В., Евдокимов С.В., Головченко Ю.В.* Выявление кольцевых структур по результатам обработки изображений космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 4. С. 74–87.
- Яхимович Н.Н.* Геоморфологическое выражение нефтегазовых локальных структур Оренбургской области на космических снимках // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 2. С. 32–38.
- Wallace R.E.* Notes on stream channels offset by the San Andreas fault, southern Coast Ranges, California // Proc. Conf. on Geol. Probl. of San Andreas Fault System. Stanford Univ. Publ. Geol. Sci., 11. 1968. P. 6–20.

30 Years of the Geological Studies with Using Space Means: Tendencies, Achievements and Perspectives

V. G. Trifonov

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

Main achievements and tendencies of development of the geological studies with using space means for the last 30 years are analyzed. These studies included interpretation of structure of surficial layers of the Earth's crust and deep-seated levels of the lithosphere, search of ore deposits, hydrocarbons and underground waters, prediction of natural hazards and consequences of recent geological processes. It is shown that some methods and techniques transformed into routine elements of the geological works and new possibilities were opened and new methods and techniques were created with progress of means of obtaining and processing of the space information. The results are distinguished that helped to solve the important geological tasks.

Key words: processing of space information, geological structure, deep-seated structural features, metallogenesis, oil and gas, neotectonics, seismotectonics, active faults, prediction of earthquakes, engineering geology.