

# Выявление признаков очагового магматизма в пределах Казбекского вулканического центра по данным тепловой космической съемки

С.Г. Корниенко<sup>1</sup>, О.В. Ляшенко<sup>2</sup>, А.Г. Гурбанов<sup>3</sup>

*В пределах Казбекского вулканического центра на площади около 900 км<sup>2</sup> проведен ретроспективный анализ теплового поля земной поверхности по снимкам со спутниковой системы NOAA (AVHRR) за период с 1990 по 2003 гг. Выявлены тепловые аномалии в верхнем течении р. Геналдон, в районе ледника Мна и восточнее г. Казбек, которые могут быть связаны с наличием промежуточных магматических камер, что подтверждается гравиметрическими измерениями и магнитотеллурическим зондированием (см. статьи в данном журнале).*

*По данным разновременных (до и после катастрофы) космоснимков ASTER (со спутника TERRA) отдешифрированы современные разрывные нарушения, свидетельствующие об активизации современной тектонической деятельности, в том числе вдоль правого борта р. Геналдон, которая могла спровоцировать катастрофический обвал коренных пород массива г. Джимара и последующий сход ледника Колка.*

## ВВЕДЕНИЕ

По каталогу извержений вулканов мира Казбек относится к категории Б – потенциально действующих вулканов с приблизительной датировкой последних извержений не свыше 3,5 тыс. лет (И.И. Гуценко. Извержения вулканов мира. Каталог. Издво «НЕДРА», М., 1979).

В связи с произошедшим обвалом на Колкинский ледник и сходом лавины в Геналдонском ущелье была поставлена задача выявления эндогенных причин этого катастрофического явления. В комплексе методов для решения этой задачи был задействован и метод тепловой съемки.

Настоящая работа является одной из первых попыток системного анализа космических данных теплового диапазона с целью выявления признаков наличия или отсутствия промежуточной(ых) (близповерхностной) магматической(их) камер в пределах Казбекского вулканического центра (рис. 2, см. цв. вкл.).

В работе даны предварительные выводы о характере и изменчивости теплового поля земной поверхности в пределах Казбекского вулканического центра, а также оценка применимости метода для решения поставленных задач.

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ТЕПЛОвого ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И МОНИТОРИНГА СПЯЩИХ ВУЛКАНОВ КАЗБЕКСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Тепловое дистанционное зондирование (ТДЗ) – метод, основанный на бесконтактном определении плотности потока излучения поверхности в инфракрасном (ИК) – тепловом диапазоне длин волн. Тепловой принято считать дальнюю область ИК-излучения в диапазоне 8–14 мкм, попадающую в окно прозрачности атмосферы.

Регистрируемое излучение, выраженное в значениях радиационной температуры (РТ), является функцией термодинамической температуры и спектрального коэффициента излучения, характеризующего оптические свойства излучающей поверхности. Современные технические средства ТДЗ

могут обеспечить измерение РТ с чувствительностью порядка 0,1° С.

Приповерхностное тепловое поле – условное понятие, характеризующее термический режим Земной коры от поверхности до глубины нейтрального слоя (влияния инсоляции) и выраженное в значениях теплового потока, температуры, градиента температур или РТ. Тепловое поле земной поверхности – индикатор свойств составляющих ее элементов и проходящих в них процессов.

Высокое быстродействие ИК-систем обеспечивает возможность исследования свойств земной поверхности на больших территориях с различной

<sup>1</sup> С.Г. Корниенко - к.г.-м.н., РОО «ГЕО-ИНВЭКС».

<sup>2</sup> О. В. Ляшенко - к.г.-м.н., РОО «ГЕО-ИНВЭКС».

<sup>3</sup> А.Г. Гурбанов - к.г.-м.н., с.н.с. ИГЕМ РАН.

степенью детальности. Информативность ТДЗ существенно повышается при исследовании временных вариаций РТ поверхности. В приповерхностном тепловом поле отражаются:

- вещественно-структурные неоднородности природного и техногенного происхождения от поверхности до глубины проникновения суточных (0,5–1,0 м), сезонных и годовых (20–50 м) колебаний температуры;
- процессы тепломассопереноса в геологической среде и технических объектах;
- экзогенные и эндогенные источники теплового воздействия.

Тепловая инерция (ТИ) пород и веществ характеризует их свойства восприятия и отдачи тепла. Породы и вещества с высокой ТИ характеризуются медленной скоростью восприятия и отдачи тепловой волны, и наоборот – вещества с низкой ТИ быстрее реагируют на тепловое воздействие.

Практически все изучаемые методами ТДЗ поверхности и объекты подвержены процессам нестационарного теплового воздействия. В этой связи информативной оказывается «кажущаяся тепловая инерция» (КТИ), параметр, определяемый по РТ, измеренной в ночное и дневное время в течение небольшого отрезка времени (до недели) [1].

Для построения распределений РТ и различных производных параметров могут быть использованы данные сканирующих радиометров AVHRR 2,3 (NOAA 11-17), TM и ETM+ (Landsat 5, 7), MODIS и ASTER (Terra). Для решения поставленной задачи наиболее приемлемы данные AVHRR 2,3 и ASTER.

На Кавказский регион в настоящее время есть возможность получения архивных данных спутника NOAA с пространственным разрешением 1100 м как ночного, так и дневного времени суток. Спутник Landsat осуществляет съемку только в дневное время суток, что существенно ограничивает возможности метода. Со спутника Terra съемка может осуществляться как в дневное, так и в ночное время суток. Данные радиометра MODIS по тепловым спектральным каналам имеют такое же пространственное разрешение, что и данные AVHRR, однако архивируются с 1999 года. В настоящее время на территорию Кавказа уже создается архив дневных и ночных снимков радиометра ASTER. Пространственное разрешение тепловых каналов ASTER составляет 90 м, что позволяет на порядок укрупнить масштаб картирования.

Обобщение публикаций по проблеме обнаружения проявлений вулканической, тектонической, сей-

смической и современной геодинамической активности в приповерхностном тепловом поле указывает на возможность изучения и мониторинга этих процессов средствами космического теплового зондирования [2, 3]. Объективными предпосылками разработки метода космического теплового мониторинга являются результаты теоретических и экспериментальных исследований неоднородностей глубинного и приповерхностного геотермического поля областей активной тектоники, вулканизма и современной геодинамики.

Теоретической основой для разработки метода могут служить системные представления о нормальных и аномальных геотермических полях, геотермические критерии тектонической, сейсмической, геодинамической и вулканической активности [4, 5]. Тектоническая активность может характеризоваться усилением процессов вертикального тепломассопереноса по разломам и разрывным нарушениям, что приводит к возникновению линейно вытянутых положительных аномалий температур поверхности или к последовательному чередованию положительных и отрицательных температурных аномалий вдоль разлома [6, 7]. Модель конвективной самоорганизации в пределах флюидосодержащей пластовой системы (дизъюнктива), приводящей к образованию закономерного сочетания восходящих и нисходящих потоков, в определенной мере объясняет чередование положительных и отрицательных аномалий (и, соответственно, высокую дисперсию) наблюдаемого над активными разломами геотермического поля [8]. Мозаичная структура геотермического поля вдоль разлома на относительно однородном тепловом фоне, таким образом, может служить признаком тектонической активности разлома.

Подобное проявление активных разломов отмечалось не только в значениях теплового потока, наблюдаемых на глубине нейтрального слоя (~50 м). Характерная мозаичная картина наблюдалась по температуре приповерхностного слоя (1–2 м), а также по плотности потока излучения (радиационная температура) земной поверхности [9]. Причем средние значения температур вдоль разлома могут не отличаться от средних значений по блоку. В этой связи информативным параметром является разброс значений температур по выбранному участку анализа. Таким образом, высокое значение среднеквадратического отклонения (СКО) поверхностной температуры при определенных условиях может характеризовать тектоническую и сейсмическую активность.

По данным тепловой космической съемки в Среднеазиатском сейсмоактивном регионе в зоне пересечения разломов были обнаружены короткоживущие (2–10 суток) поверхностные тепловые аномалии положительного знака. На основе ретроспективного анализа тепловых космических снимков установлена связь между возникновением положительных температурных аномалий и крупнейшими землетрясениями (в Газли 1976 и 1984 гг., Китае 1998, 1999, Турции 1999 г.), когда накануне их проявления амплитуда аномалий увеличивалась на 3–7°C [10, 11]. Отмечается связь между очагами долговременной сейсмической активности и изменением теплофизических свойств верхнего слоя земной поверхности над ними, что может быть зафиксировано средствами космического теплового дистанционного зондирования (ТДЗ) в виде локальных температур-

ных аномалий над очаговыми зонами [12].

Обобщение работ по данному направлению показывает, что для характеристики активности эндогенных процессов по данным ТДЗ информативными параметрами могут быть:

- радиационная температура (РТ) поверхности;
- среднеквадратическое отклонение (СКО) РТ;
- тепловая инерция верхнего слоя земной поверхности, определенная по разновременным значениям РТ.

Интенсивность приповерхностных тепловых аномалий, связанных с активными геологическими процессами, – от десятых долей до нескольких градусов. Нижний предел обусловлен, в большей степени, методическими погрешностями, связанными с геоморфологическими и ландшафтными неоднородностями района.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ТДЗ

В период подготовки материалов космической съемки были получены 83 снимка со спутников NOAA весеннего, летнего и осеннего периодов за 1990, 1998, 2000, 2001, 2002 и 2003 годы. В работе было использовано двадцать наиболее кондиционных (по условиям облачности и угла поля обзора) снимков, в основном ночного времени суток.

Погрешность измерения абсолютных значений РТ радиометром AVHRR имеет порядок 1,0–1,5°K. Минимально различимый сигнал по РТ составляет 0,1°K. Для оценки значений РТ использовались данные 4-го спектрального канала радиометра. С учетом динамического диапазона РТ (на изученных участках летом в ночное время он может превышать 30°С) минимально различимый сигнал имеет величину порядка 0,14°K. Для выявления неоднородностей РТ анализ данных и все построения проводились в виде оценки относительных изменений РТ. В зависимости от угла поля зрения, пространственное разрешение радиометра колеблется от 1 130 до 1 210 м.

Предварительная обработка материалов космической съемки включала радиометрическую, геометрическую коррекцию, калибровку данных тепловых каналов в значения РТ, масштабирование и точную привязку снимков к топографической карте масштаба 1:1 000 000 (лист К-38).

Основу метода составляет динамический анализ данных тепловой космической съемки, реализуемый путем сравнения данных разных лет, различного времени года и времени суток. Предполагалось, что за 10–15 лет изменения рельефа и альбедо земной поверхности не существенны и изменения РТ обус-

ловлены в основном вариациями термодинамической температуры.

Выявлены сезонный характер распределений температуры, а также вариации СКО РТ, связанные со временем суток. На температурных распределениях ряда снимков прослеживается неравномерный характер влияния метеоусловий вдоль Большого Кавказского хребта, что выражается в наличии трендов температуры. На основе комплексной обработки различных сюжетов были определены характерные частоты трендов для их устранения без потери информации об объекте исследований.

Сопоставление значений СКО РТ для снимков, полученных в ночное время, свидетельствует о том, что СКО РТ одних и тех же участков может существенно меняться даже на коротком отрезке времени суток, приблизительно с 2 до 4 часов ночи, что объясняется неоднородностью ТИ элементов ландшафта [13, 14]. Подобные колебания могут достигать значений первых градусов. В этой связи, в первую очередь рассматривались данные разных лет для одного и того же времени года (июль–август) и времени суток (2:16 – 2:48).

Одной из исходных предпосылок настоящей работы было представление о возможной вулканической активизации, сопровождающейся локальным повышением температуры земной поверхности за счет подъема магматического расплава, разогретого до 1 100 °С (по данным изучения температур гомогенизации расплавных включений в кварце и плагиоклазах), из промежуточной магматической камеры к дневной поверхности в районе Казбекского вулканического центра (включая ледники Колка

и Майли), в том числе с тенденциями за последние 10–15 лет. Возможно, что подобный отрезок времени слишком мал для выявления признаков развития предполагаемых эндогенных геологических процессов. В этом случае попытка обнаружения очаговой зоны может быть сведена к выявлению устойчивых тепловых аномалий на фоне флуктуаций РТ, обусловленных влиянием различных факторов, включая вариации ТИ, изменчивость релье-

фа и характера покрова земной поверхности. Связь с наличием промежуточной магматической камеры может быть выражена и в самой неоднородности теплофизических свойств верхнего слоя земной поверхности как зоны более интенсивного теплообмена с атмосферой. В этом случае могут быть приняты во внимание аномальные зоны ТИ пород, или параметров, отражающих изменение ТИ, к числу которых, в частности, относится КТИ.

### ИЗУЧЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В РАЙОНЕ КАЗБЕКСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Было проведено исследование неоднородностей и динамики теплового поля земной поверхности на участке территории размером 28×28 км в районе г. Казбек. Целью работы являлось выявление устойчивых или вновь образовавшихся тепловых аномалий радиусом менее 12 км. При подготовке данных была проведена низкочастотная фильтрация исходных распределений РТ с устранением структур радиусом более 12 км.

Работа включала:

- детальный анализ изображений по району для выявления неоднородностей, соизмеримых с пространственным разрешением спутника,
- анализ средних значений РТ и разности РТ ( $\Delta RT$ ) по обозначенным участкам района.

Выражением  $\Delta RT$  обозначены все распределения, характеризующие разность значений РТ любой пары разновременных съемок.

Сравнение усредненных значений  $\Delta RT$  по участкам за периоды с 1990 по 1998, 2000, 2002 и 2003 годы, в целом, показало однотипный характер распределения  $\Delta RT$ . В значительной степени распределение  $\Delta RT$  обусловлено пространственными вариациями ТИ по участкам, несмотря на то, что  $\Delta RT$  определялась по данным, полученным практически в одно и то же время года и суток.

Анализ  $\Delta RT$  разносезонных съемок для одних и тех же лет показал идентичный характер распределения  $\Delta RT$ . Распределения  $\Delta RT$ , полученные по данным съемок лета и весны, осени и лета одного и того же года отражают ту же неоднородность, что и для разных лет одного сезона, причем проявляемую с различным знаком в зависимости от направления теплового воздействия. Подобный факт свидетельствует о том, что, кроме сезонных и суточных вариаций температуры у поверхности, есть влияние годовых колебаний, или непериодических воздействий (например, нестационарных метеорологических).

В связи с этим дальнейший анализ тепловых снимков проводился с поправкой на вариации ТИ. Для определения характера ТИ использовались сезонные вариации РТ ночных съемок весны и лета 2000 года. Исключение из расчетов снимков дневного времени суток в первую очередь связано со сложным, высококонтрастным характером теплового поля горного рельефа, когда, в зависимости от положения солнца и характера теней, нагрев поверхности в момент съемки сильно неоднороден. Ночной снимок также отражает неравномерность дневного нагрева, однако она гораздо ниже, поскольку эффект связан с суммарной аккумуляцией тепла на склонах. Таким образом, распределение  $\Delta RT$ , построенное по разносезонным съемкам, является образом (или моделью) ТИ, выраженным в условных, относительных значениях, что вполне допустимо при относительных построениях распределений РТ с поправкой на вариации ТИ.

Из всех серий наблюдений наиболее представительными оказались три сюжета летних съемок 1990 (04.07, 2:36), 2002 (01.08, 2:37) и 2003 (25.08, 2:18) годов. Распределения РТ с учетом вариаций ТИ даны на рис. 3, 4 и 5 (см. цв. вкл.). В качестве фонового значения РТ приняты модальные значения распределений, которым присвоено нулевое значение РТ.

После введения поправок на ТИ контрасты РТ существенно снизились: с 22–25°C до 12–13°C. Шаг между изотермами составляет порядка 0,4°C. При идеальной коррекции на ТИ подобные распределения должны отражать только неравномерность теплового воздействия экзогенных и эндогенных источников. Контраст РТ в значительной мере обусловлен неравномерным солнечным прогревом из-за сильной расчлененности рельефа, т. е. наличием теневых и освещаемых сторон. Это отчетливо проявляется на примере южного (более теплого) и северного (более холодного) склонов г. Казбек. В целом характер распределения РТ практически пол-

ностью повторяется, тем не менее отмечается и изменение интенсивностей некоторых аномалий (рис. 6, 7, см. цв. вкл.). Ряд устойчивых (т.е. существующих на всех снимках) аномалий РТ, происхождение которых явно не обусловлено неоднородностями ландшафта, в той или иной мере могут связываться с эндогенными процессами.

В целом следует отметить, что выявление устойчивых аномалий радиусом менее 5–7 км в данном случае достаточно сложно. Даже после коррекции сигнала на изменчивость ТИ контрасты РТ достаточно высоки. Основная проблема заключается в сильной расчлененности рельефа и высоких пространственных градиентах РТ. Пространственное разрешение спутника имеет порядок 1 км, и привязка данных к карте практически не выше этой величины. Спутник не может два раза отсканировать область с точным попаданием пиксела в пиксел, а поскольку перепад РТ на 1 км в плане в горах может достигать десятка градусов, то по этой причине возникает расхождение в характере распределения РТ даже полностью идентичных тепловых полей.

Более отчетливо изменения температуры поверхности видны на распределениях  $\Delta PT$ , построенных по данным съемок 1990–2002 и 1990–2003 гг. соответственно (рис. 6, см. цв. вкл.).

Шаг между изотермами имеет порядок 0,13–0,20°C, что практически на уровне инструментальной погрешности. При построении распределений  $\Delta PT$  фоновые значения также определялись как модальные, однако значения последних соответствуют рассчитанной разности РТ. Так, для первого распределения (1990–2002 гг.) фоновое значение  $\Delta PT$  соответствует величине 2,1°C, минимальное значение (0°C) оказались вблизи вершины горы Казбек (рис. 6, см. цв. вкл.). Для второго распределения фоновые значения соответствуют 0°C, и значения  $\Delta PT$  в районе вершины – около 1,5°C (рис. 7, см. цв. вкл.).

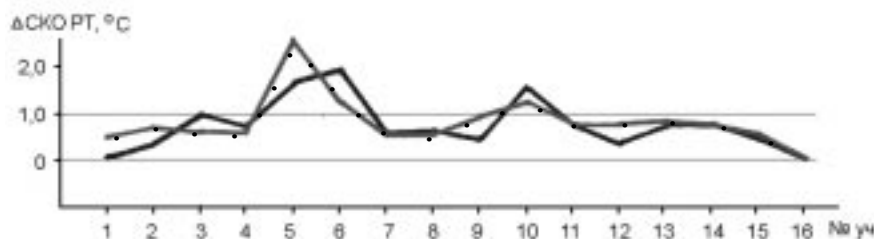


Рис. 2. Распределение разности СКО РТ без учета ТИ.

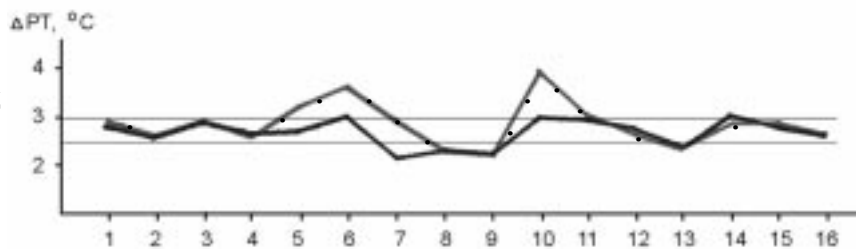


Рис. 1. Распределение разности средних РТ по участкам.

Подобные распределения должны отражать динамику тепловых процессов за соответствующие промежутки времени, хотя часть мелких и неповторяющихся аномалий скорее всего связана с погрешностями пространственного совмещения снимков.

Интерес представляет положительная аномалия с центром на южной границе ледника горы Казбек, проявившаяся за 12–13 лет соответственно на обоих распределениях. Положительная аномалия на северном склоне горы, у истоков реки Геналдон (рис. 7, см. цв. вкл.), на распределении  $\Delta PT$  1990–2002 гг. (до катастрофы) проявлена мелкими низкотемпературными аномалиями (рис. 6 и 8-1, синие, см. цв. вкл.), в то время как на распределении  $\Delta PT$  1990–2003 гг. ее площадь и интенсивность резко возросли (рис. 7 и 8-1, красная, см. цв. вкл.). По-видимому, это можно объяснить экранирующим влиянием ледника Колка, в то время как тепловой поток от предполагаемой промежуточной камеры мог вызвать таяние льда в подошве ледника и образование водяной подушки в его основании, которая, наряду с тектоническими подвижками, могла сыграть свою роль в процессе схода лавины. После исчезновения ледника тепловая аномалия приняла современный вид.

Итоговый результат дан на рис. 8 (см. цв. вкл.), где синими и красными контурами обозначены границы положительных аномалий  $\Delta PT$ , построенные по данным съемок, соответственно, 2002–1990 и 2003–1990 гг. Выделенные области предположительно связываются с проявлениями вулканической активности.

Несколько иной подход к анализу данных заключался в оценке временных изменений усредненных значений РТ по 16 участкам района. Информативным параметром при таком подходе является среднее значение РТ и СКО РТ по каждому участку. В данном подходе

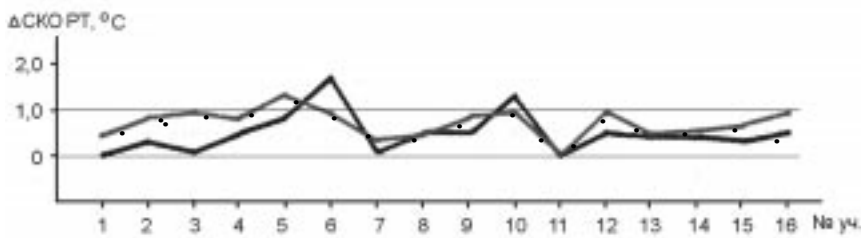


Рис. 3. Распределение разности СКО РТ с учетом ТИ.

проблема пространственного совмещения данных оказывает не столь существенное влияние на формирование контрастов РТ, однако размеры выявляемых тепловых аномалий соответствуют размеру участка. При таких построениях контрасты  $\Delta$ РТ имеют порядок 1,0–1,5°C, т. е. в четыре раза меньше, чем для детальных распределений.

Схема размещения 16 участков территории, по которым проводилось сравнение средних значений РТ и СКО РТ, дана на рис. 8 (см. цв. вкл.).

Размер каждого участка составляет 7×7 км.

Кривая без точек на рис. 1 отражает разность средних значений РТ 2002 и 1990 годов, кривая с точками характеризует разность средних значений РТ 2003 и 1990 годов. Область методической ошибки принята 0,5°C, что несколько выше утроенной величины минимально различимого сигнала.

Если интерпретировать разность РТ как изменения за соответствующий период, то за 12 лет (кривая без точек) отмечается весьма незначительное увеличение РТ на участках 6, 10, 14 и некоторое понижение РТ на участках 7, 8, 9. За 13 лет (кривая с точками) участки 6 и 10 отмечены более значительным повышением РТ. С 2002 по 2003 год РТ повысилась на участке 5 (0,5°C), участке 6 (0,6°C),

на участке 7 (0,7°C) и на участке 10 (0,9°C). Возможно, что для относительных построений область ошибки завышена, поскольку на 12 остальных участках за год отклонения РТ не превышают 0,2°C. В этом случае можно более уверенно говорить о повышении РТ за 12 лет на

участках 3, 6, 10, 11, 14.

На участке 5 повышение РТ за год, по-видимому, произошло за счет возникновения аномалии на месте сошедшего ледника Колка (рис. 8, см. цв. вкл.). Участки 6 и 10 перекрывают восточную часть горы Казбек, и, возможно, повышение РТ здесь связано с эндогенными процессами или какими-либо неучтенными природными процессами.

Как было показано выше, флуктуации РТ и изменение их интенсивности во времени могут связываться с активностью геологических процессов. Для характеристики флуктуаций использовались значения СКО РТ и их изменения по годам. На рисунках 3 и 4 даны кривые разности СКО РТ 2002–1990 гг. (кривая без точек) и 2003–1990 гг. (кривая с точками), полученные по данным соответствующих распределений без учета и с учетом вариаций ТИ. Сравнение этих распределений позволяет отделить флуктуации РТ, обусловленные вариациями ТИ. Уровень фоновых флуктуаций установлен в диапазоне значений от 0 до 1,0°C.

Разница СКО РТ без учета ТИ показывает явное увеличение интенсивности флуктуаций РТ на участках 5, 6 и 10 по обеим сериям (рис. 2). Разница СКО РТ с учетом ТИ показывает, что к 2002 году

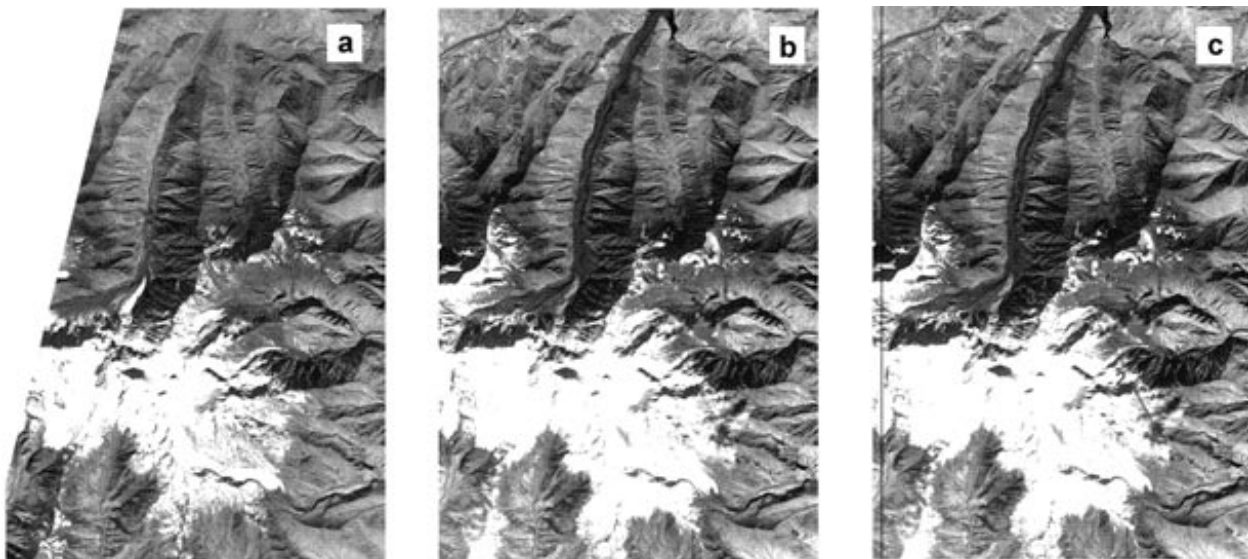


Рис. 4. Космоснимки до (а) и после (б) схода лавины, неотектонические нарушения (с).

СКО РТ также повысилось на участках 6 и 10 и незначительно на участке 5, однако в 2003 году величина СКО на участках 6 и 10 стала существенно ниже, а на участке 5 несколько увеличилась. Таким образом, на участках 6 и 10 увеличение СКО РТ за период с 1990 по 2002 годы не связано с ТИ, а повышение СКО к 2003 году в большей степени связано с флуктуациями ТИ, и только для участка 5

## РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ASTER

В процессе работы было проведено сравнительное дешифрирование двух космических снимков ASTER: до (03.10.2001 г.) и после (06.10.2002 г.) катастрофического схода ледника Колка.

Сравнение тектонических нарушений на разновременных снимках (рис. 4) позволяет говорить о возможном подновлении некоторых из них, что заметно, во-первых, по относительно резким контрастам линеаментов на более позднем снимке в связи, по-видимому, с расширением зоны дробления вдоль разрыва (1) и, во-вторых, относительно хорошей выраженности некоторых, по-видимому, вновь появившихся линеаментов в рельефе, под-

характерно некоторое увеличение СКО, не связанное с ТИ.

В целом сравнение кривых ΔРТ и ДСКО РТ говорит об аномальном характере изменений поля РТ на участках 5, 6 и 10, причем для последних двух за период с 2002 по 2003 год отмечается увеличение РТ с одновременным уменьшением СКО РТ.

черкнутом линейными прогалинами в новом снежном покрове (2).

Особенно хорошо на снимке 2002 г. дешифрируется разрывное нарушение восток-северо-восточного направления, которое прослеживается вдоль склона северо-западной экспозиции Геналдонского ущелья (3), где произошел сход лавины. Оно выражено уступом в северной части ледника Майлийский, прослеживается в виде промоин вдоль склона к западу. Восточнее, на правом борту р. Геналдон оно дешифрируется по более контрастно выраженным линеаментам, чем на снимке до катастрофы. Не исключено, что именно неотектонические подвижки явились одной из причин схода ледника.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации поставленной в настоящей работе цели была проведена оценка возможности выявления малоамплитудных тепловых аномалий в условиях высокогорной местности. В настоящий момент происхождение выявленных неоднородностей теплового поля в районе Казбекского вулканического центра не в полной мере ясно, однако привлечение дополнительного картографического материала (цифровые растровые модели рельефа, ландшафтные, почвенные карты и карты растительного покрова), а также данные тепловой съемки других сезонов года позволяют идентифицировать большую их часть. Тепловые аномалии, не получившие однозначной идентификации, могут рассматриваться в комплексе с другими материалами как проявления вулканической активности на данном участке.

К их числу могут быть отнесены (рис. 8, см. цв. вкл.):

1. Положительная тепловая аномалия (1), расположенная в верховьях р. Геналдон, включая ледник Колка. Уже после проведения работ были получены результаты гравиметрической съемки (А.В. Кобаев, «Гравиметрический профиль вдоль долины реки Геналдон», ГАИШ МГУ, 2004), которая зафиксировала зону разуплотнения. Интенсивность ее нарастает в южном на-

правлении за пределами пройденного профиля.

2. Положительная тепловая аномалия (2), расположенная в восточной части ледника Сависити и южной части ледника Мна, на южных склонах Кавказского хребта.

3. Положительные тепловые аномалии (3), расположенные на левом берегу р. Терек на восточных отрогах г. Казбек.

4. Положительная тепловая аномалия (4), расположенная в районе ледника Кибиши.

Вдоль склона северо-западной экспозиции левого верхнего притока р. Геналдон (рис. 4) на космическом снимке ASTER, полученном после катастрофического обвала, отдешифрировано неотектоническое нарушение, которое, по нашему мнению, могло спровоцировать каменно-ледовый обвал с массива г. Джимара на ледник Колка и катастрофически быстрый сход последнего вниз по долине р. Геналдон.

Для окончательного суждения о природе выявленных тепловых аномалий их необходимо заверять независимыми геофизическими методами (гравиметрическое и магнитотеллурическое зондирование по профилям над выявленными аномалиями, слежением за термическими условиями минеральных источников).

В целом полученные результаты уже сейчас свидетельствуют о возможности выявления в высокогорной местности малоампли-

тудных тепловых аномалий, в том числе связанных с приповерхностными очагами магматизма.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 03-05-64215).*

## Литература

1. **Kahle A.B., Alley R.E.** Calculation of Thermal Inertia from Day-Night Measurements Separated by Days or Weeks / *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. V. 51. № 1, January 1985. P. 73–75.
2. **Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Корниенко И.А., Якубсон К.И., Ораевский В.Н., Алексеев В.А.** Космические методы выявления зон активной тектоники и современной геодинамики / *Наука и техника в газовой промышленности*, 2000. № 2. С. 76–82.
3. **Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Корниенко И.А., Якубсон К.И., Ораевский В.Н., Алексеев В.А.** Исследование зон активной тектоники и современной геодинамики космическими методами / *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы Международной конференции памяти академика П.Н. Кропоткина, 20–24 мая 2002 г., г. Москва.* – М.: ГЕОС, 2002. С. 122–124.
4. **Сардаров С.С. (мл), Савин А.В., Суетнова Е.И.** Геотермический критерий тектонической активности // *Геофизические методы в геотермии: Сб. научн. тр. Института проблем геотермии Даг. ФАН СССР*, 1986. Вып. 6. С. 5–9.
5. **Сардаров С.С. (мл), Савин А.В., Пащук М.Г.** Нормальные и аномальные геотермические поля и их связь с иерархией геологических тел // *Докл. АН СССР*, 1984. Т. 275. № 5. С. 1084–1087.
6. **Аэрокосмические методы в геоэкологии** / Под ред. В.И. Лялько. – Киев.: Наукова думка, 1992. 205 с.
7. **Савин А.В.** Изучение геотермических полей различных уровней иерархии в связи с поисками месторожде-
- ний нефти, газа и парагидротерм // *Тр. Ин-та проблем геотермии. Даг. ФАН СССР*, 1984. Вып. 2. С. 41–55.
8. **Савин А.В.** Результаты натурных геотермических исследований замкнутой конвекции в зонах разломов / *Тезисы докладов Региональной конференции «Геотермия и ее применение в региональных и поисково-разведочных исследованиях», Свердловск*, 1989. С. 80.
9. **Корниенко С.Г., Ляшенко О.В., Савин А.В.** Поиск нефтегазовых залежей методом наземной тепловой съемки // *Геология нефти и газа*, 1996. № 8. С. 32–36.
10. **Горный В.И.** Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // *Докл. АН СССР*, 1988. Т. 301. № 1. С. 67–69.
11. **Tronin A.A.** Thermal Infrared Satellite Data for Seismic Area Research (Japan, China and Europe) / *Proceedings of the International Conference «The Earth's Thermal Field and Related Research Methods», June 17–20, 2002, Moscow, Russia*. P. 280–284.
12. **Бойков А.М., Корниенко С.Г.** Отражение долговременной сейсмической активности на температурных картах по данным космической съемки // *Геодинамика и сейсмичность Восточного Кавказа. Материалы научно-практической конференции 2–5 сентября 2002 г., Махачкала*, 2002. С. 10–12.
13. **Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И.** Тепловая аэрокосмическая съемка. – М.: Недра, 1993. 128 с.
14. **Корниенко С.Г.** Проявление ландшафтных неоднородностей в поле радиационных температур земной поверхности // *Геотермия. Геотермальная энергетика. Махачкала*, 1994. С. 86–91.

