

**ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ИЗ КОСМОСА ОПАСНЫХ ГЛЯЦИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ТРУДНОДОСТУПНЫХ ГОРНЫХ РАЙОНАХ  
НА ПРИМЕРЕ КАРМАДОНСКОЙ КАТАСТРОФЫ 2002 г.**

*Г.А. Носенко\*, О.В. Рототаева\*, О.А. Носенко\*\**

*\* Институт географии РАН. E-mail: nosenko@bues.ru*

*\*\* Центр космических наблюдений*

Хозяйственная и рекреационная деятельность человека в горных регионах требует актуальной информации о снеге и ледовых объектах. Отсутствие или недостаточность такой информации могут привести к большим финансовым потерям и человеческим жертвам. Спутниковые изображения с высоким разрешением типа ASTER (TERRA) и другие такого класса могут помочь в установлении важных характеристик опасных природных процессов: лавин и селевых потоков, ледниковых пульсаций, озер в нивально-гляциальной зоне — и их изменения во времени. Для иллюстрации этих проблем авторы используют космические снимки катастрофических событий подвижки ледника Колка (Северная Осетия, сентябрь 2002 г.) и данные наземных и аэровизуальных наблюдений 2002–2003 гг.

Прошедшее столетие характеризуется глобальным потеплением климата, которое заставило человечество обратить внимание на состояние окружающей среды и существующие в ней взаимосвязи. Ледники как динамически неустойчивые системы быстро реагируют на климатические изменения. Это проявляется в динамике процессов массообмена — аккумуляции осадков на леднике, преобразовании вещества в его толще и потере в виде стока талых вод и содержащихся в них примесей.

Ледники тают, насыщая окружающие рыхлые моренные отложения водой, что приводит их в нестабильное состояние. Сокращение размеров современных ледников влечет за собой изменения ландшафтов в гляциальной зоне, образование новых озер и активизацию стихийно-разрушительных процессов: катастрофических селей, ледяных обвалов, прорывных паводков и т. п.

Своим присутствием ледники создают угрозу человеческой жизни, деятельности и разрастающейся инфраструктуре. Проблема мониторинга их текущего состояния возникла давно. Ее решение традиционными контактными методами осложнено труднодоступностью объектов наблюдений, а в последние годы еще и удручающим состоянием Росгидромета. Поэтому попытки обращения к аэрокосмическим средствам в современных условиях приобретают особую актуальность, учитывая, с одной стороны, возросшее за последние годы число проявлений опасных гляциальных процессов и, с другой — наметившуюся активность на рынке данных ДЗЗ [1].

В качестве примера рассматривается произошедшая в сентябре 2002 г. катастрофа в Кармадонском ущелье, связанная с подвижкой ледника Колка. Ледник Колка расположен в массиве горы Казбек (рис. 1) и известен своими подвижками, зафиксированными как в исторических документах, так и нашими современниками.

Одна из наиболее впечатляющих произошла в 1902 г., когда выброс ледника по долине достиг створа села Тменикау [2]. Затем известна подвижка 1969, 1970 гг. [3], которая не имела столь катастрофических последствий и была тщательно изучена за 9 лет работы экспедиции Института географии. И, наконец, катастрофа 2002 г., очень похожая на события 100-летней давности и столь же неожиданная из-за недостатка регулярных наблюдений.

Пульсирующими могут быть ледники разных размеров, форм и морфологических типов [4]. В то же время можно выделить два основных типа подвижки. К первому относятся подвижки, происходящие без разрыва сплошности ледового потока по сравнительно пологим долинам со скоростями от нескольких десятков до сотен метров в сутки. Ко второму — подвижки ледников, расположенных в висячих долинах или на крутых склонах. Во время

подвижки их языки могут обрываться при выходе на крутой участок, вызывать обвалы или ледово-каменные сели, с большой скоростью (десятки километров в час) устремляющиеся вниз по долине.

Как было сказано выше, ледник Колка демонстрировал оба типа подвижек. По морфологическому типу он относится к карово-долинным. Это означает, что его питание, в основном, происходит за счет обвалов льда и снега, увлекающих с собой породу с крутых склонов на дно цирка сравнительно небольшой площади. Поэтому тело ледника содержит большое количество обломочного материала, а поверхность почти сплошь покрыта мореной. Равномерный отток льда из цирка затруднен асимметрией области питания и сужением на выходе, создаваемым поворотом левой морены и правым притоком. Это способствует пульсирующему характеру разгрузки при достижении ледником критической массы.

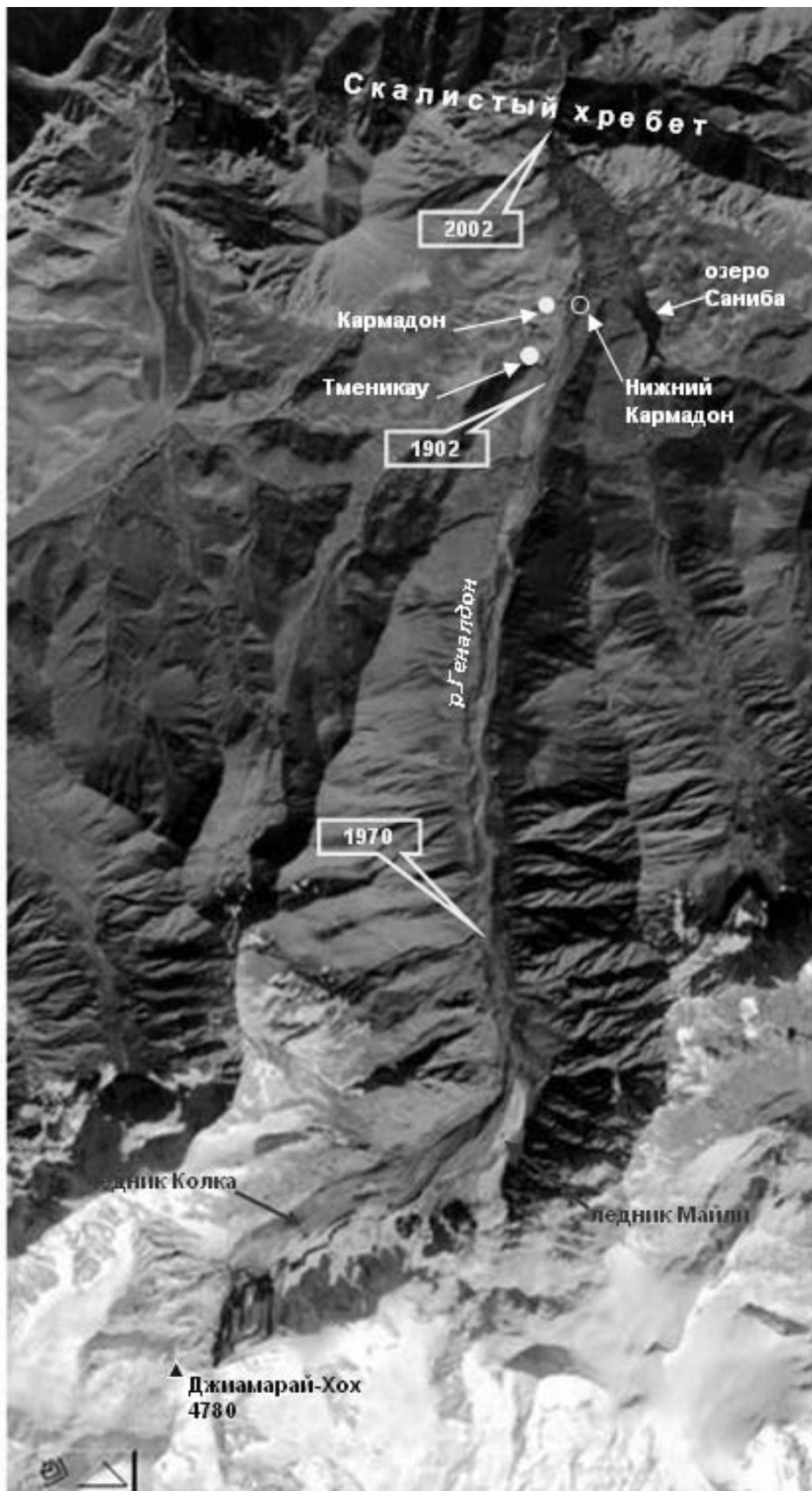
Исследования экспедиции Института географии в течение 9 лет показали, что эту массу, при постоянстве внешних условий, ледник накопит через 65–70 лет после подвижки 1969 г. [3], т. е. к 1930-м гг. XXI столетия. Однако, по всей видимости, процесс восстановления ледника был ускорен экстремальными внешними воздействиями.

Исследование возможностей использования космических снимков для выявления признаков будущей подвижки ледника, определения ее причин и механизма, а также оценки масштабов и последствий разрушительного процесса выполнено на основе материалов многозональных съемок ASTER со спутника TERRA, съемок переносной цифровой камерой с борта международной космической станции (МКС), а также результатов аэровизуального и наземного обследования места событий экспедицией ИГРАН летом 2003 г. (рис. 2).

Как уже было сказано выше, к числу признаков пульсирующего ледника относятся особенности его строения, доступные для определения из космоса. В методическом отношении эти вопросы в свое время были хорошо проработаны на материалах съемки МКФ-6 с борта КК «Союз-22» [5]. Поэтому спектральные диапазоны VNIR ASTER и геометрическое разрешение 15 м можно считать вполне пригодными для решения этой задачи. Использование комбинации или отдельных спектральных каналов в изображениях ASTER позволяет исследовать состояние как областей питания, так и языковых частей ледников, имеющих разные отражательные характеристики. Для свободных от обломочного материала участков ледника в области питания эффективнее работает третий канал, а для заморенных поверхностей более информативен первый (рис. 3).

К другим признакам ледниковой пульсации относятся увеличение толщины ледника, появление фронта активизации и скорость его перемещения, изменения границ пульсирующей части ледника и структуры его поверхности. Оценить информативность снимков ASTER по выявлению этих признаков для ледника Колка не представилось возможным, поскольку ближайшие съемки проводились за год до катастрофы. Можно предположить, что для выявления этих признаков разрешения этих снимков было бы недостаточно. Впрочем, на снимке с МКС с разрешением 5 м, полученном за месяц до начала подвижки, их тоже не видно. Скорее всего, это означает, что ледник еще не накопил критической массы и подвижка развивалась не по «классической» схеме 1969, 1970 гг.

Совместный анализ снимков и данных наземного обследования позволяет предположить, что сошедший в 2002 г. ледово-каменный селя был подготовлен большим количеством воды на ложе и внутри ледника. Ее накоплению способствовали четыре последних года интенсивного таяния, что подтверждается расчетами для ледника Колка по метеоданным и измерениями на других ледниках Кавказа (Гарабаши, Джанкуат и др). К этому добавились обильные летние жидкие осадки 2002 г. На космических снимках ASTER и МКС после подвижки видно, что структура поверхности ледника Майли после прохождения по ней волны ледово-каменного селя практически не изменилась (рис. 4). Аналогичные следы обнаружены на левой морене ледника Колка.



**Рис. 1.** Фрагмент космического снимка ASTER (13.10.2002 г.) района катастрофы



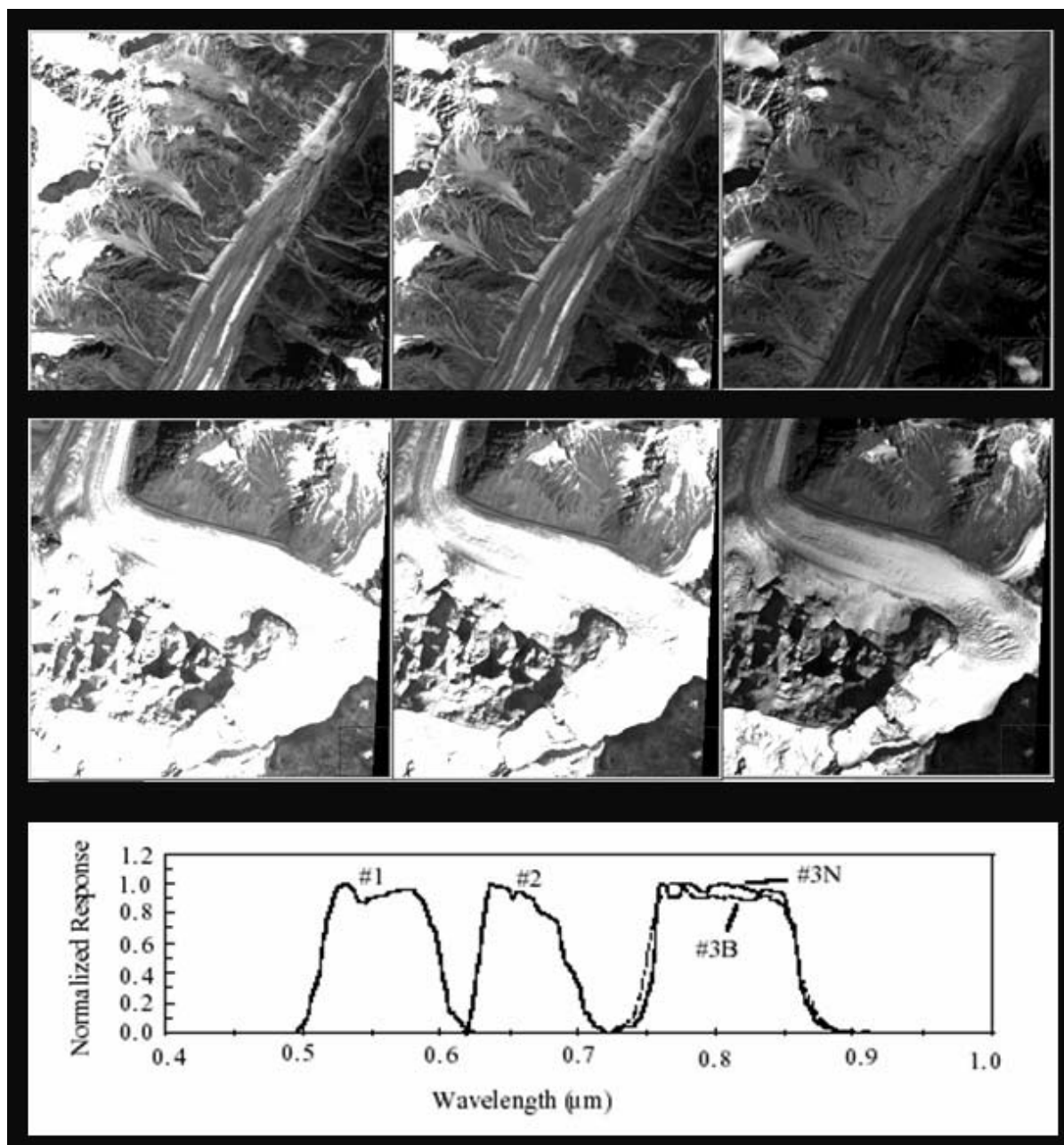
**Рис. 2.** Снимок переносной камерой цирка ледников Колка и Майли с борта Международной космической станции (МКС) с маршрутами наземного обследования и фрагменты разновременных снимков ASTER (Terra), использовавшиеся для оценки последствий и анализа причин катастрофы

Предшествовавшие летние землетрясения, особенно сильные 14 июля (до 5 баллов, с эпицентром в 70 км к северо-западу) и 22 августа, способствовали не только необычному усилению обвалов висячих ледников, но и разрушительным процессам внутри ледникового тела. Наблюдавшиеся после схода ледника выходы пара и газа в цирке и образование фумарол на большой высоте на холодной северной стене являются признаками активизации вулканической деятельности Казбека. На космических снимках с МКС и ASTER эти проявления хорошо видны (рис. 5).

Возможно, геотермальное тепло усугубляло ситуацию, способствуя таянию ледника снизу. В свою очередь обвалы льда и породы увеличивали нагрузку на поверхность ледника, создавая дополнительные напряжения. Основная часть ледовых масс со склона Джиямарай-Хох к 20 сентября уже была сброшена, хотя активная обвальная деятельность продолжалась.

Пусковым импульсом схода ледника мог оказаться очередной обвал, толчок даже небольшого землетрясения и просто разрушительный процесс внутри ледника, создавший критические напряжения в его теле. Можно предположить, что процесс начался с обрушения сводов над внутренними полостями. Ледник выдавил из-под себя часть воды, которая вместе со льдом и мелкой обломочной фракцией переклестнула потоком через правую морену на Майли и на отдельных участках — через левую морену. Разрушение основного тела лишило опоры боковые висячие притоки, нижние части которых оторвались по зонам трещин и ушли вниз, что добавило массы и энергии в начавшееся движение утратившего целостность ледника. Направление их схода реконструируется по системе ориентирован-

ных вниз по правому склону борозд на остатках старого придонного льда. Основная масса водно-ледово-каменного селя пошла по основному ущелью р. Колки и набрала дополнительную скорость на разгонном участке ниже впадения р. Гольды, где уклон долины возрастает с 7 до 15–20°. В результате ледник практически полностью освободил свое ложе и в виде селя пронесся 15 км по долине р. Геналдон, остановившись в уости «Кармадонских ворот» (рис. 6).



**Рис. 3.** Ледник Безенги (Центральный Кавказ), в разных каналах диапазона VNIR (ASTER): слева направо – каналы 1, 2 и 3N. Верхний ряд — язык ледника, нижний ряд — область питания. Фрагменты снимка ASTER, 1В, 15 сентября 2001 г.



**Рис. 4.** Следы прохождения водно-ледово-каменного селя по поверхности ледника Майли



**Рис. 5.** Признаки проявлений вулканической активности на космических снимках МКС и ASTER

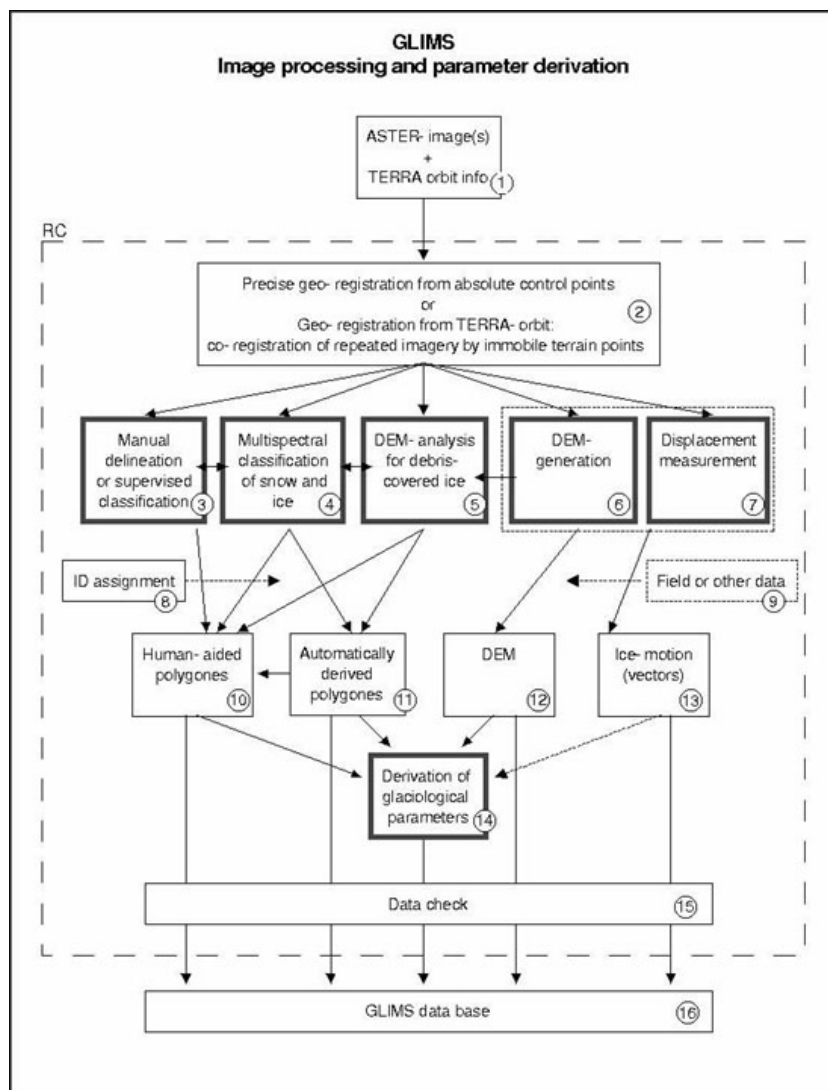


**Рис. 6.** Ледово-каменный завал у селения Кармадон и образовавшееся в соседней долине озеро, затопившее часть селения Саниба

Высота ледово-каменного завала составила порядка 150 м, объем льда и породы — до 80 млн м<sup>3</sup>. Последующие проблемы связаны с образованием подпруженных озер общей площадью до 400 000 м<sup>2</sup> и объемом до 10 млн м<sup>3</sup> и их возможным прорывом. Космические снимки позволяют осуществлять мониторинг динамики их развития и контролировать процесс деградации завала.

Одно из озер размером 150×50 м было обнаружено в цирке ледника после его схода. Оно образовалось за ригелем, происхождение которого в тот момент было неясно. Высказывались предположения, что он является возможной причиной пульсирующего характера ледника, и обсуждались предложения об его разрушении направленным взрывом. Наземное обследование не подтвердило наличия скального основания и необходимости активного воздействия на него. Ригель оказался ледовой плотиной, образовавшейся из оторвавшегося «хвоста» ушедшего ледника. Озеро к концу лета ушло без катастрофических последствий.

Снимки ASTER были получены через день после случившегося, а на следующий — уже доступны для нас через FTP-сервер благодаря участию в этом Геологической службы США (Флагстаф, Аризона) и Национального центра снега и льда (Боулдер, Колорадо). По их инициативе в настоящее время предпринимается попытка реализации мониторинга ледников с использованием космических снимков в рамках международного проекта GLIMS (Global Land Ice Measurement from Space). В его основе — идея создания ГИС глобального масштаба, в рамках которой накапливаются и обрабатываются разновременные и разномасштабные (от наземных наблюдений до космических снимков) данные с целью наблюдения и моделирования процессов в гляциосфере Земли. В настоящее время разрабатываются технологии обработки снимков (рис. 7) и структура базы данных.



**Рис. 7.** Схема обработки космических снимков в проекте GLIMS

В качестве регионального Центра Институт географии принимает участие в проекте и имеет возможность оперативного получения и обработки снимков ASTER. Будущее проекта представляется трудным, но интересным.

### Литература

1. *Desinov L., Nosenko G., Listochenkova N., Rudakov V.* Space monitoring of dangerous glacial situations in mountainous regions with the help of high resolution space images of cameras KVR-1000 and MOMS/PRIRODA // MOMS-2 Symp. 1995. P. 243–251.
2. *Штебер Э.А.* Ледниковые обвалы в истоках Генал-дона // Терский сб. Владикавказ, 1903. Вып. 7. С. 72–81.
3. *Роттаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н.* Исследование пульсирующего ледника Колка. М., 1983. 169 с.
4. *Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г.* Мониторинг пульсирующих ледников и проблемы прогноза их подвижек // Сб. II науч.-практич. конф. МЧС по проблемам прогнозирования чрезвычайных ситуаций, 23 окт. 2002 г. Доклады и выступления. М.: Едиториал УРСС, 2003. С. 184–200.
5. *Кравцова В.И., Книжников Ю.Ф.* Надежды и реальности космической гляциологии. М.: МГИ. Вып. 84. С. 41–47.