

## **ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

### **REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH**

УДК 528.873 :551.4.042

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283

Е.А. Балдина<sup>1</sup>, Е.В. Лебедева<sup>2</sup>, А.А. Медведев<sup>3</sup>

#### **МЕТОДИКА ДЕШИФРИРОВАНИЯ АРХИВНЫХ И СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДОЛИНЕ Р. ГЕЙЗЕРНАЯ (КАМЧАТКА)**

#### **АННОТАЦИЯ**

На основе сформированной базы источников пространственных тематических данных для долины р. Гейзерной (Камчатка) проведены работы по выявлению участков наибольшей активизации современных экзогенных процессов и проявления эндогенных процессов на максимально возможном временном отрезке (более 50 лет). Материалами послужили космические снимки высокого пространственного разрешения (0,5–3 м), полученные со спутников Key-Hole-4 (1964 г.), GeoEye (2009 г.), Pleiades-1A/1B (2013, 2016 гг.), World-View-2 (2017 г.), использованы также результаты полевых обследований местности и съемка с БПЛА в 2021 г., литературные и фондовые материалы. Разработанная методика дешифрирования включала как последовательное дешифрирование предварительно геометрически согласованных разновременных снимков, так и их цифровую обработку: квантование яркостей, расчет вегетационного индекса NDVI, формирование цветного многовременного композита, что позволило разделить покрытые растительностью и обнаженные участки склонов по формальным признакам и повысило общую достоверность дешифрирования. Расчеты, выполненные на основе проведенных работ, позволили определить, что доля общей площади долины, пораженной современными склоновыми процессами, составила на 1964 г. 10,5 %, на 2009 г. – 14,8 % и 13 % в 2017 г. В процессе дешифрирования установлено, что современные склоновые процессы доминируют на левобережье р. Гейзерной, где сосредоточено более 75 % площади всех обнажений (или 10,2 % от общей исследуемой площади долины), что, по-видимому, обусловлено приуроченностью этого борта к ограничивающему кальдеру кольцевому разлому,

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [baldina@geogr.msu.ru](mailto:baldina@geogr.msu.ru)

<sup>2</sup> Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, Россия, *e-mail*: [ekaterina.lebedeva@gmail.com](mailto:ekaterina.lebedeva@gmail.com)

<sup>3</sup> Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, Россия, *e-mail*: [a.a.medvedeff@gmail.com](mailto:a.a.medvedeff@gmail.com)

сохраняющему свою активность, а также к наличию там участка современного поднятия территории. На правом берегу реки значительные площади занимают древние крупные гравитационные смещения, возможно, связанные с обвалами краев экструзивных массивов. Среди современных процессов тут преобладают оползни-сплывы и эрозия в местах выхода грунтовых вод. На правом берегу приходится менее 25 % площади всех обнажений (или 3,3 % от общей площади исследуемой территории).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** эндогенные и экзогенные процессы, база снимков, выделение контуров, NDVI, многовременной синтез, ГИС

**Elena A. Baldina<sup>1</sup>, Ekaterina V. Lebedeva<sup>2</sup>, Andrei A. Medvedev<sup>3</sup>**

## **TECHNIQUE FOR INTERPRETATION OF ARCHIVE AND RECENT SATELLITE IMAGES TO STUDY THE SLOPE PROCESSES DYNAMICS IN THE GEYZERNAYA RIVER VALLEY (КАМЧАТКА)**

### **ABSTRACT**

Based on the database of spatial thematic data sources for the Geysernaya River valley (Kamchatka), the work was carried out to identify the areas of the greatest activation of modern exogenous processes and the manifestation of endogenous processes over the maximum possible time interval (more than 50 years). Space images of high spatial resolution (0.5–3 m), received from Key-Hole-4 (1964), GeoEye (2009), Pleiades-1A/1B (2013, 2016), WorldView-2 (2017) satellites, results of field survey and UAV imagery in 2021, literature and archive materials were used as sources. The developed interpretation technique included both sequential interpretation of preliminary geometrically coordinated multi-temporal images and their digital processing: brightness quantization, calculation of vegetation index NDVI, formation of color multi-temporal composite, which allowed to separate vegetation-covered and bare slope areas by formal features and increased the overall reliability of interpretation. Calculations based on the interpretation results determined that the proportion of the total valley area affected by modern slope processes was 10.5 % in 1964, 14.8 % in 2009, and 13 % in 2017. In the process of images interpretation, it was established that slope processes dominated on the left bank of the Geysir River, where more than 75 % of the area of all outcrops (or 10.2 % of the total studied area of the valley) was concentrated, which is apparently caused by confinement of this valley side to the caldera limiting circular fault, which preserves its activity, and also by the presence of the area of modern uplift there. On the right bank of the river, large areas are occupied by ancient large gravitational shifts, possibly associated with collapsing edges of extrusive massifs. Landslides-slides and erosion in the groundwater outlets are predominant among the modern processes here. The right bank accounts for less than 25 % of the area of all outcrops (or 3.3 % of the total study area).

**KEYWORDS:** endogenous and exogenous processes, image base, contours delineation, NDVI, multitemporal synthesis, GIS

### **ВВЕДЕНИЕ**

Долина р. Гейзерной, расположенная на Камчатке, в одной из крупнейших геотермальных зон мира, привлекает внимание ученых по нескольким основаниям. Во-первых,

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: baldina@geogr.msu.ru

<sup>2</sup> Institute of Geography RAS, Staromonetny lane, 29. 119017, Moscow, Russia, e-mail: ekaterina.lebedeva@gmail.com

<sup>3</sup> Institute of Geography RAS, Staromonetny lane, 29, 119017, Moscow, Russia, e-mail: a.a.medvedeff@gmail.com

в этой долине крайне высока интенсивность эндогенных и экзогенных процессов, на ее бортах периодически формируются мощные оползни, которые перегораживают русло реки и провоцируют сходы катастрофических селей. Во-вторых, этот участок находится в пределах Кроноцкого заповедника и относится к объектам Всемирного наследия ЮНЕСКО, что определяет необходимость сохранения и популяризации этой территории в силу ее особой природной и экологической значимости. Последнее обстоятельство обуславливает также и целесообразность разработки дополнительных рекомендаций по организации здесь безопасного туризма.

В геотермальных зонах районов современного вулканизма на геоморфологические процессы на склонах речных долин значительное влияние оказывают многочисленные выходы разнообразных по составу газогидротерм, которые не только прогревают и увлажняют горные породы, но и изменяют их физические свойства. Эти обстоятельства приводят к тому, что на таких участках могут кардинально меняться особенности и темпы денудации. Однако эти вопросы практически не освещены ни в отечественной, ни в мировой научной литературе. Опубликованных материалов по воздействию газогидротермальных проявлений на характер протекания склоновых процессов и специфику строения речных долин чрезвычайно мало. Полевыми наблюдениями было установлено, что на термальных участках интенсифицируется размыв пород, происходит смещение значительных объемов материала со склонов, сопровождающееся сходом селей; в результате чего к подобным территориям часто приурочены расширения речных долин [Лебедева, 2019, 2021; Лебедева и др., 2020; Лебедева, Жарков, 2022].

При относительно большом количестве исследований долины р. Гейзерной в целом значительная их часть посвящена конкретным катастрофическим событиям, их причинам и последствиям. Так, после схода в июне 2007 г. гигантского оползня и связанного с ним мощного селевого потока, эта часть Долины гейзеров была всесторонне изучена специалистами [Кугаенко и др., 2007; Лобкова, Лобков, 2008; Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; и др.]. В.Н. Двигало была проведена стереофотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки, в результате чего получены количественные оценки объема смещенного материала, а также созданы карты участка оползня до и после события. Совместно с И.В. Мелекесцевым [Двигало, Мелекесцев, 2009] по материалам дешифрирования АФС им также была составлена схема распространения современных (1981 и 2007 гг.) и доисторических обвальных и обвально-оползневых форм. По заключению авторов, за последние 20–25 тыс. лет на бортах долины возникли десятки крупных оползней и обвалов, следы которых были в общих чертах очерчены ими по снимкам. В январе 2014 г. в долине произошел еще один оползень-обвал, также приведший к формированию мощного селя и возникновению подпрудного озера, обстоятельства и последствия которого подробно рассмотрены В.Л. Леоновым [Леонов В., 2014].

В упомянутых статьях приводятся детальные схемы отдельных событий, а также наземные и аэроснимки, однако о картографировании всей долины и об общем анализе процессов на ее бортах речь не идет. К числу работ, основанных на данных дистанционного зондирования, следует отнести и исследование сотрудников геологического факультета МГУ [Зеркаль и др., 2019], которыми было выполнено картографирование древних и современных оползней и обвалов в среднем течении р. Шумной и в нижнем течении р. Гейзерной. На основании дешифрирования космического снимка 2009 г. было выделено несколько типов гравитационных склоновых процессов общим числом свыше 650. Заслуживает упоминания и систематизация названий основных объектов в районе Долины гейзеров, содержащая 127 наименований, сопровождаемая огромным числом иллюстраций, включая карты и фотоснимки [Леонов А., 2012]. Но этот капитальный труд посвящен центральной части долины р. Гейзерной, где находятся термальные источники, и не захватывает верхнюю часть долины, где в 2014 г. произошел крупный оползень-обвал, оказавший влияние и на нижерасположенные участки.

Современные методы картографирования на основе материалов аэро- и космической съемки, включавшие геодезическую привязку детального (0,5 м) снимка со спут-

ника GeoEye-1, полученного 6 сентября 2009 г. (который используется также и в нашем исследовании), и формирование цифровой модели рельефа (по стереопаре снимков со спутника CartoSat от 19.09.2007) позволили создать виртуальную 3D-модель Долины и привязать к точным координатам все источники и гейзеры [Леонов А., 2017]. Наиболее полная сводка картографических материалов по долине р. Гейзерной представлена в тематическом Атласе, изданном в 2015 г., где систематизированы и представлены в наглядной форме результаты исследований, накопленные за долгие годы изучения долины р. Гейзерной [Атлас..., 2015]. При этом подробная характеристика различных элементов ландшафта представлена в этом Атласе в виде карт лишь на небольшой, детально обследованный, участок долины рядом с кордоном заповедника.

Ввиду высокой активности склоновых процессов в долине р. Гейзерной было признано целесообразным проследить особенности их распространения и динамики на склонах долины вплоть до ее верховьев (слияния реклевой и Правой Гейзерной), на основе доступных разновременных космических снимков, охватывающих временной интервал до 56 лет.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Характеристика базы изображений.** Для исследования динамики склоновых процессов в долине р. Гейзерной была собрана массив разновременных космических снимков разного охвата, пространственного и спектрального разрешения. Первым этапом работы стала систематизация и оценка пригодности доступных снимков для решения поставленных задач. Примеры снимков приведены на рис. 1. и 2.

Наиболее раннюю ситуацию на середину 1960-х гг. характеризуют снимки с разведывательного спутника Key-Hole-4 (серия спутников американского проекта CORONA 1960-1972 [Жуковский, 2012]) – 1964 и 1967 гг. При общем числе снимков в базе более 50 шт., долина р. Гейзерной изображается лишь на двух из них, не составляющих стереопару. Эти снимки черно-белые с пространственным разрешением ~3 м, несколько различающимся по полю изображения. Снимки со спутника Key-Hole-4 CORONA получены с помощью панорамной камеры, поэтому в них присутствует несколько видов геометрических искажений, и эти искажения растут к краям кадра. Традиционные фотограмметрические методы для таких снимков по заключению специалистов [Sohn et al., 2004] не применимы. Для эффективного устранения искажений, вызванных действием панорамного сканирования и движения спутника, этими авторами были, например, разработаны и опробованы методы математического моделирования, предназначенные для построения модели рельефа по стереопаре таких снимков. Из литературы известны и другие примеры геометрической коррекции снимков проекта CORONA и последующего построения цифровой модели поверхности [Lee et al., 2003, Mészáros et al., 2008], которое возможно также лишь при наличии стереопар. Пары к имеющимся в нашем распоряжении снимкам отсутствуют, что пока не позволяет выполнить их геометрическую коррекцию за счет особенностей выполнения съемки. Кроме этих искажений на данных снимках присутствуют искажения за счет значительных перепадов высот на исследуемом участке, усиленные наклоном камеры при съемке.

Устранение всех перечисленных искажений при отсутствии стереопар снимков невозможно. Однако учитывая важность для исследования изображений долины р. Гейзерной на столь отдаленный момент времени как середина 1960-х гг., были предприняты попытки привязки фрагментов этих снимков по идентичным точкам к высококачественным современным снимкам и последующая коррекция изображения методом «резинового листа».

Наиболее высоким качеством обладают материалы космических съемок со спутников GeoEye-1 (6 сентября 2009 г.), Pleiades-1A/1B (6 августа 2013 г., 29 сентября 2016 г. и 4 августа 2017 г.), World-View-2 (20 июня 2016 г.). Предварительная обработка этих снимков включала ортокоррекцию (устранение искажений, обусловленных рельефом местности) и повышение пространственного разрешения, в результате чего они представлены в виде 4 спектральных каналов с пространственным разрешением 0,5 м. Этих

снимков всего 5, однако они с очень высоким качеством представляют исследуемую местность за относительно большой временной промежуток: 2009, 2013, 2016 (2 снимка) и 2017 гг., а потому их детальное дешифрирование на следующих этапах работы следует признать наиболее перспективным. Однако приходится иметь в виду сезонные особенности получения каждого из снимков. Так, оба снимка 2016 года (20 июня и 29 сентября) отображают территорию с некоторым количеством снежного покрова, а на осеннем снимке также большие площади закрыты темными тенями из-за низкого положения Солнца. Снимок со спутника Pleiades-1, полученный 4 августа 2017 года, вероятно, из-за наклонной съемки в отдельных местах имеет искаженные очертания объектов, а на склонах долины имеются нерастаявшие снежники.

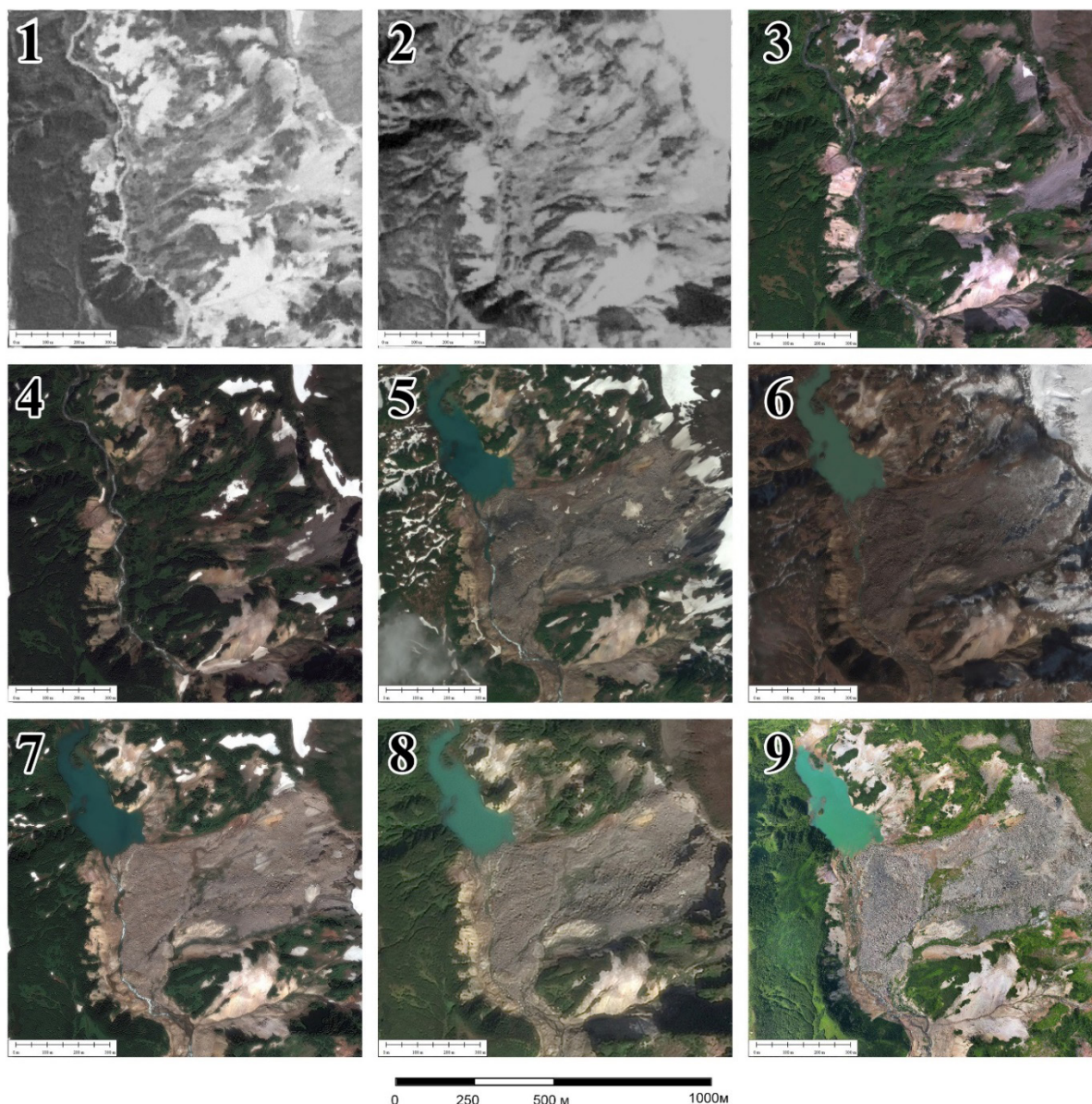


Рис. 1. Фрагменты изображений участка долины, где в 2014 г. сошел оползень-обвал: (1) Key-Hole-4, 1964 г.; (2) - Key-Hole-4, 1967 г.; (3) – GeoEye-1, 06.09.2009; (4) - Pleiades, 06.08.2013; (5) - Pleiades, 29.09.2016; (6) – WorldView2, 20.06.2016; (7) - Pleiades, 04.08.2017; (8) – Spot 6, 17.09.2017; (9) – Съемка с БПЛА, 10.08.2021.

Fig. 1 Fragments of images of the valley section where the landslide-valley collapsed in 2014: (1) - Key-Hole-4, 1964; (2) - Key-Hole-4, 1967; (3) - GeoEye-1, 06. 09.2009; (4) - Pleiades, 06.08.2013; (5) - Pleiades, 29.09.2016; (6) - WorldView2, 20.06.2016; (7) - Pleiades, 04.08.2017; (8) - Spot 6, 17.09.2017; (9) - UAV imagery, 10.08.2021.

Самый обширный массив составляют снимки со спутников CubeSat американской компании Planet Labs, которые охватывают 5-летний период (2016–2021 гг.), представляя исследуемую территорию в летний период с июля по конец сентября (2016 г. – 2 снимка, 2017 г. – 7, 2018 г. – 5, 2019 г. – 6, 2020 г. – 6, 2021 г. – 5). Эти снимки относительно невысокого качества по яркостным характеристикам, их пространственное разрешение составляет 3–4 м, но они отображают ситуацию в долине р. Гейзерной на несколько дат летнего периода, а потому их дешифрирование, возможно, позволит отследить некоторые изменения, происходящие за теплый период этих последних лет, хотя и с невысокой детальностью (рис. 2).

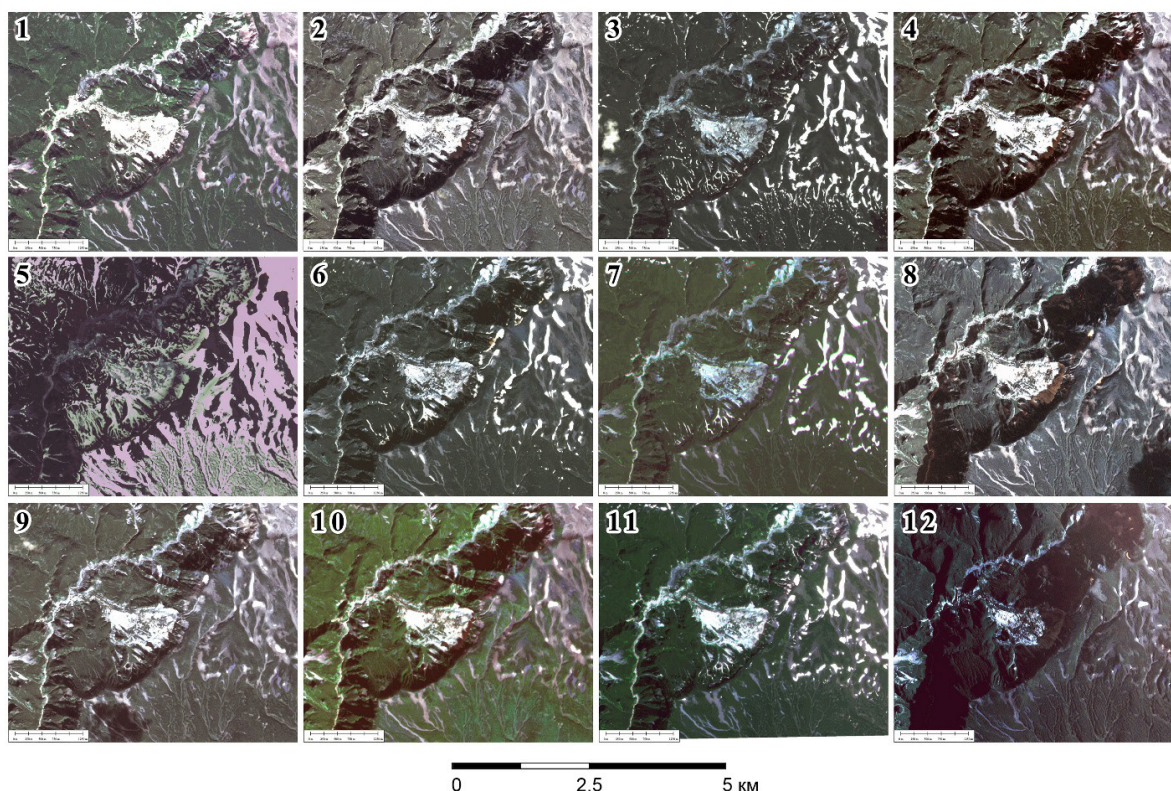


Рис. 2. Фрагменты изображений разновременной серии снимков Planet на участок оползня 2007 г.: (1) – 22.08.2016; (2) – 13.09.2016; (3) – 30.07.2017; (4) – 14.09.2017; (5) – 15.07.2018; (6) – 15.09.2018; (7) – 24.07.2019; (8) – 11.09.2019; (9) – 31.08.2020; (10) – 09.09.2020; (11) – 12.07.2021; (12) – 03.08.2021

Fig. 2 Fragments of images of the different Planet image series: (1) - 22.08.2016; (2) - 13.09.2016; (3) - 30.07.2017; (4) - 14.09.2017; (5) - 15.07.2018; (6) - 15.09.2018; (7) - 24.07.2019; (8) - 11.09.2019; (9) - 31.08.2020; (10) - 09.09.2020; (11) - 12.07.2021; (12) - 03.08.2021

Снимки с российского спутника Ресурс-П1/П2 (Геотон-Л) относятся к 2015, 2016 и 2018 годам. Эти снимки представлены в многозональном (пространственное разрешение ~1,7 м) и панхроматическом (~0,5 м) вариантах. Однако эти данные не скорректированы по рельефу (они представлены без ортотрансформирования), что затрудняет их использование для получения количественных параметров и очертаний контуров, сопоставимых с другими ортотрансформированными снимками, без дополнительной обработки. Несмотря на высокий уровень детальности (размер пиксела около 0,5 м) на панхроматических снимках смещение объектов достаточно велико. Вероятно, эти снимки станут возможным использовать после дополнительной обработки на основе созданной впоследствии точной ЦМР долины по качественно привязанным данным беспилотной съемки (да и то в случае получения достаточного количества наземных опорных точек, особенно в русле реки).

Летом 2021 г. А.А. Медведевым выполнена беспилотная съемка бортов и днища долины р. Гейзерной. На территорию было сделано более 16 тыс. снимков в различных высотных эшелонах, из которых был смонтирован ортофотоплан. Пространственное разрешение ортофотоплана составляет 10 см, что обеспечивает очень подробную характеристику местности. При этом приходится отметить геометрическую несогласованность ортофотоплана 2021 г. и увязанных между собой космических снимков со спутников GeoEye, Pleiades-1A/1B, WorldView-2, вероятно, в силу разных методов получения пространственных координат для привязки и ортотрансформирования.

Еще один источник детальной пространственной информации – глобальное покрытие World Imagery ESRI<sup>1</sup>. На участок долины р. Гейзерной в этой мозаике использован снимок со спутника WorldView-3, полученный 17 сентября 2020 г. с пространственным разрешением 0,3 м. Этот снимок представляет собой цветное изображение в натуральной цветопередаче, позволяющее детально рассмотреть основные проявления склоновых процессов на момент съемки, хотя и не имеет спектральных каналов в отличие от остальных высококачественных снимков. Часть склонов закрыта тенями из-за относительно невысокого положения Солнца во время съемки осенью.

Совокупность этих материалов позволяет выполнить дешифрирование проявлений склоновых процессов в долине р. Гейзерной на разные временные срезы от 1964 до 2021 года и оценить их динамику. Для оценки динамики были выбраны 3 срока: 1964 г. (как наиболее ранний), 2009 г. (доступный промежуточный срок, снимок наиболее высокого качества), а современный этап представлен снимком 2017 г. и глобальным покрытием 2020 г. Совместное использование этих снимков при дешифрировании позволяет до некоторой степени устранить недостатки каждого из них.

**Методика дешифрирования** для оценки изменений, особенно в тех случаях, когда используются снимки, существенно различающиеся по качеству, предполагает применение разных приемов с последующим сравнением полученных результатов и выбором наиболее достоверных. Дешифрирование объектов в долине проводилось на основании предположения, подтвержденного полевыми наблюдениями, что участки наиболее активного проявления склоновых процессов лишены растительного покрова.

Несмотря на относительно высокое заявленное пространственное разрешение архивных снимков 1964 и 1967 гг. Key-Hole-4 Corona – 3 м, изображение местности на них существенно искажено. Выполнению дешифрирования этих снимков предшествовала его привязка к принятой системе координат (WGS-84 в проекции UTM) и коррекция геометрии изображения. Привязку и коррекцию пришлось выполнять в 2 этапа. На первом обзорный фрагмент снимка привязывался путем набора опорных точек к снимку со спутника Sentinel-2. Относительно приемлемые результаты геометрической коррекции были достигнуты при наборе более 400 опорных точек. Суммарная среднеквадратичная ошибка при этом составила 4,5 м. Однако после этого этапа остались существенными геометрические искажения в пределах исследуемой части долины р. Гейзерной, которые обусловлены значительными перепадами высот на небольших площадях. Для дальнейшей коррекции, призванной обеспечить возможность использования этого снимка для сравнения с современными, в пределах уже небольшой площади был проведен дополнительный набор точек на отдельные участки долины. Несмотря на набор еще 500 точек в пределах долины дополнительно со сгущением в местах видимых обнажений, среднеквадратичная ошибка сохранилась на уровне 4,5 м, а размер пиксела для трансформированного фрагмента составил 3,1x2,9 м. Точность привязки при этом оказывалась разной для разных участков снимка, но удалось добиться определенного сходства очертаний неизменившихся объектов. Однако нельзя быть до конца уверенным, что очертания изменившихся объектов адекватно отражают существовавшую в 1960-х гг. ситуацию,

<sup>1</sup> World Imagery. Электронный ресурс: [://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9](http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9)

поэтому не всегда можно уверенно определить, произошли ли изменения в очертаниях обнажений, или несовпадение контуров со снимка 1964 г. с более поздними обусловлено различиями в их геометрии. Таким образом, в результате двухэтапной привязки оказалось возможным дешифрирование состояния склонов долины и дальнейшая оценка произошедших изменений.

На черно-белых панхроматических снимках растительность изображается более темным тоном, обнажения – значительно светлее, хотя их фототон может быть разным в зависимости от цвета пород (рис. 3). В долине р. Гейзерной распространены породы, различающиеся по цвету: светлые озерные туфы и темные лавы, экструзивные породы и дайковый комплекс. Яркость обнаженных участков зависит также и от освещенности склонов, которая определяется высотой солнца, крутизной и экспозицией. Осложнения создают падающие тени и неосвещенные участки крутых склонов, которые изображаются темным тоном независимо от наличия растительного покрова. На снимках всех трех сроков (рис. 3) не выделяется как обнажение участок темноцветных или переувлажненных пород (1). Кроме того, на том же рисунке можно заметить, что тени от высоких останцов в пределах обнажения (2), хорошо различимые на снимках 2009 и 2017 гг., выглядят как темные (похожие на растительность) участки на снимке 1964 г. Следует отметить и неоднозначность интерпретации светлых тонов, которые могут быть свойственны разным видам обнажений склонов и другим объектам местности с высокой яркостью. Наиболее светлый тон характерен и для снежников, хотя перелетовывающие снежники, засыпанные мелкообломочным материалом, по фототону почти не отличаются от обнаженных горных пород.



*Рис. 3. Разновременные космические снимки участка в верховьях руч. Лавовий (правый приток р. Гейзерной, нижнее течение) с обширными обнажениями пород: а – 1964 г. (Key-Hole-4 Corona), б – 2009 г. (GeoEye), в – 2017 г. (Pleiades-1A/1B), пояснения цифр – в тексте*

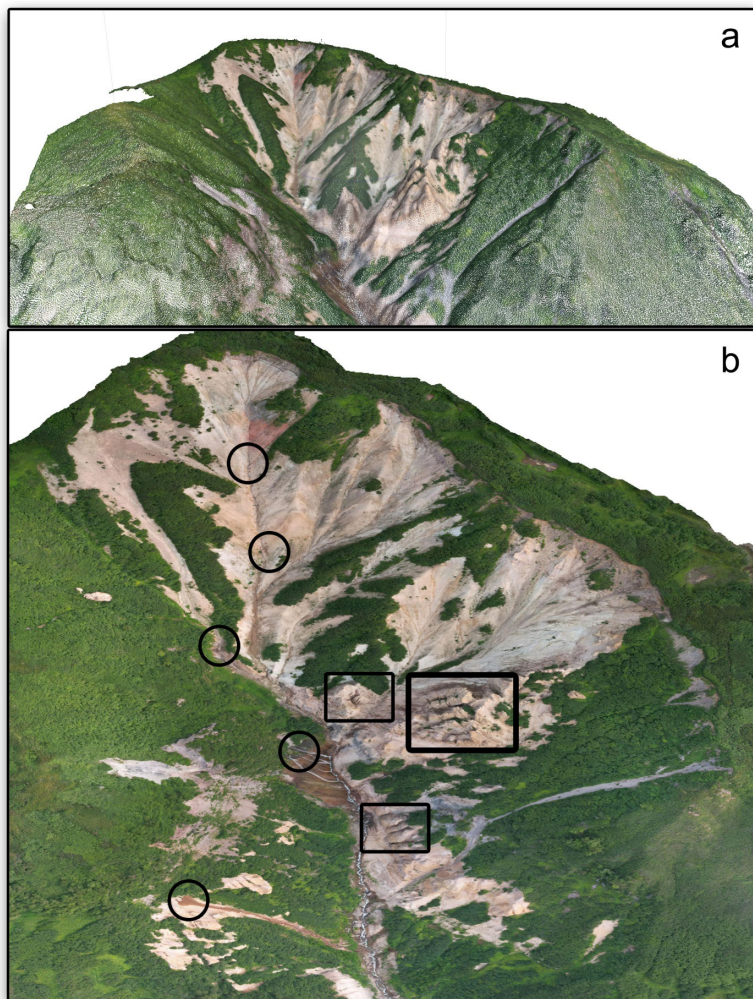
*Fig. 3. Multi-temporal space images of the site in the upper reaches of the Lavoviy Creek (right tributary of the Geyser River, lower reaches) with extensive rock outcrops: а – 1964 (Key-Hole-4 Corona), б – 2009 (GeoEye), в - 2017, (Pleiades-1A/1B), numbers are explained in the text*

Эти обстоятельства существенно осложняют применение автоматизированных методов распознавания объектов с опорой на цифровые значения яркости. Обилие факторов, влияющих на особенности изображения на снимках участков без растительности, обусловило первостепенную роль визуального анализа в их дешифрировании и оконтуривании.

Большое значение для проведения дешифрирования имел также материал, собранный при полевых исследованиях, включавших аэровизуальные наблюдения и съемку с БПЛА DJI Phantom 4 (рис. 4). Ортофотоплан, составленный на тот же участок, дает прекрасное представление о характере современного рельефа и особенностях протекающих процессов.



На цветных снимках, доступных начиная с 2009 г. эти трудности проявляются в меньшей степени, поскольку более высокое пространственное, радиометрическое и спектральное разрешение обеспечивают значительно более уверенное разделение пород разного цвета и нерастаявшие снежники, хотя плотные тени при съемке при невысоком Солнце все же скрывают некоторые обнажения пород.



*Рис. 4. Съемка с БПЛА верхний ручья Лавовый (правый приток р. Гейзерной, нижнее течение): a - трехмерное облако точек; b – ортофотоплан (2021 г.). Кружки – участки выхода холодных вод, квадратики – эрозионно-денудационные останцы.*

*Fig.4. UAV imaging of the Lavovy Creek basin upper area (right tributary of the Geysernaya River, lower reaches): a – three-dimensional point cloud; b – orthophotoplan (2021).*

Помимо визуального дешифрирования – выделения обнажений по прямым признакам – для повышения достоверности выделения участков без растительности были применены простейшие методы цифровой обработки снимков. Для панхроматического снимка 1964 г. – разбиение всего диапазона значений яркости на участки, соответствующие разным видам объектов – квантование яркостей (рис. 5, а). Важным этапом при этом являлось выявление граничных значений яркости для категорий, относящихся к разным классам, которое в значительной степени опиралось на субъективную оценку и современные снимки. Для многозональных снимков 2009 и 2017 гг. выделение участков без растительности более эффективно и достоверно осуществляется путем вычисления значений вегетационного индекса (NDVI) с последующим квантованием на то же число ступеней (рис. 5, d). Одинаковое число ступеней для категорий участков с растительностью и без нее на снимках трех сроков представлено на рис. 5. Этот прием позволил наглядно продемонстрировать изменения на левом борту долины р. Гейзерной в районе, где сошел самый большой оползень в 2007 г. Сравнение

изображений вегетационного индекса, рассчитанных по снимкам 2009 и 2017 гг., показывает восстановление там растительности за прошедший промежуток времени.

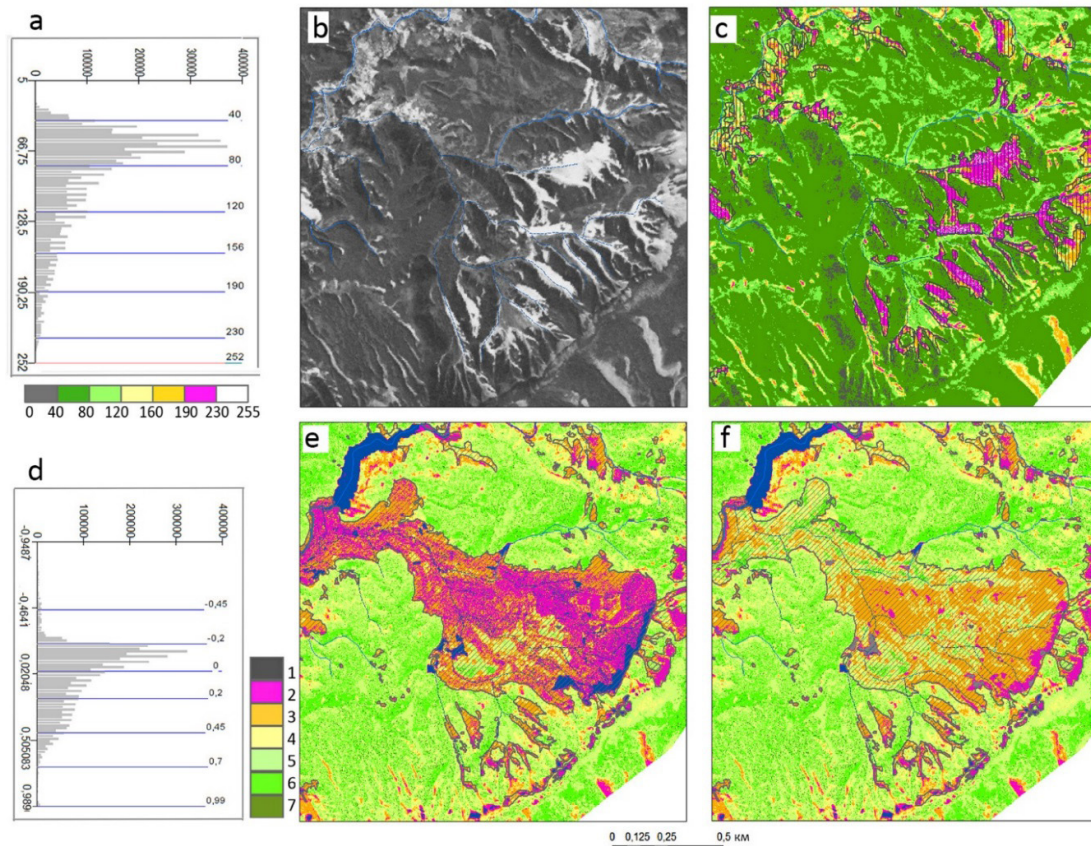
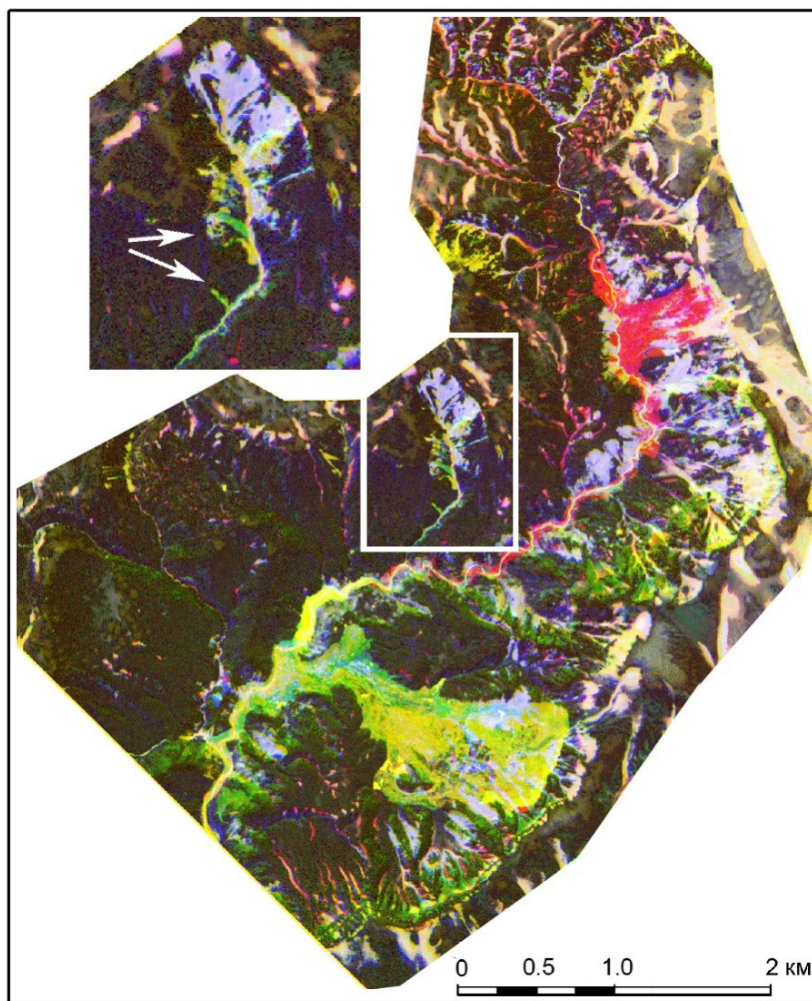


Рис. 5. Выявление изменений на местности при цифровой обработке разновременных снимков. Верхний ряд: квантование значений яркости снимка 1964 г. для выделения основных классов объектов и результат применения метода на участке, где произошел оползень 2007 г.: (a) – гистограмма значений яркости снимка; (b) – фрагмент снимка 1964 г. (Key-Hole), (c) – результат его квантования; контуры – результат визуального дешифрирования снимка 1964 г. Нижний ряд: сравнение разновременных квантованных значений вегетационного индекса, определенного по разновременным многозональным снимкам высокого разрешения: (d) – гистограмма значений индекса, (e) – 2009 г. (GeoEye), (f) – 2017 г. (Pleiades -1A/1B). Контуры – результат визуального дешифрирования снимка 2009 г. Согласованные цветовые шкалы обозначают: черный (1) – вода, оранжево-розовые цвета (2-4) – отсутствие растительного покрова, оттенки зеленого (5-7) – травянистая и древесная растительность.

Fig. 5. Local changes detection in digital processing of multitemporal images. Upper row: Image brightness values quantization for detecting main classes of objects on the image from 1964 and the result of the method applied to the area where the 2007 landslide occurred: (a) – histogram of the image brightness values; (b) – fragment of the 1964 image. (Key-Hole), (c) – result of its quantization, contours – result of visual interpretation of 1964 image. Bottom row: comparison of multi-temporal quantized values of vegetation index determined from multi-temporal high-resolution multispectral images: (d) – histogram of index values, (e) – 2009. (GeoEye), (f) – 2017. (Pleiades – 1A/1B). The contours are the result of visual interpretation of the 2009 image. Consistent color scales indicate: black (1) – water, orange and pink colors (2-4) – no vegetation, shades of green (5-7) – herbaceous and woody vegetation.

Для быстрого предварительного выявления произошедших изменений эффективен метод многовременного синтеза, при котором из полностью согласованных разновременных снимков формируется цветное изображение по принципу R (красный) – наиболее поздний снимок, G (зеленый) – промежуточный срок и B (голубой) – наиболее ранний. Здесь в каче-

стве раннего и среднего сроков использовались инвертированные (негативные) изображения NDVI 2017 и 2009 гг., а ранее – черно-белый снимок 1964 г. Анализируемая часть долины ограничена площадью перекрытия разновременных снимков. При таком подходе на всех трех снимках участки без растительности имеют наиболее светлый тон, а покрытые растительностью – темный. Сформированное таким путем многовременное изображение приведено на рис. 6. Все темные участки такого изображения соответствуют площадям, покрытым растительностью, самые светлые – обнажения во все три срока. Интерес представляют участки, изобразившиеся разными цветами, которые соответствуют различным изменениям: появлению обнажений (красный и желтый оттенки) и их зарастанию (зеленый).



*Рис. 6. Цветовой RGB синтез разновременных снимков: R – 2017 г. (Pleiades-1A/1B), G – 2009 г. (GeoEye), B – 1964 г. (Key-Hole-4 Corona). Наиболее темный цвет – растительный покров без изменений, наиболее светлый – участки без растительности (или снежники) во все три срока. Остальные яркие цвета соответствуют изменениям, проявившимся на снимках разных сроков. На врезке показан бассейн руч. Лавового. Стрелки указывают на лишенные растительности участки, выявленные на снимке 2009 г., где (по-видимому, в начале 2000-х гг.) сошли оползни-сплывы (к 2017 г. эти участки уже заросли и плохо дешифрируются)*

*Fig. 6. RGB color-composite of multi-temporal images R – 2017, (Pleiades-1A/1B), G – 2009 (GeoEye), B – 1964 (Key-Hole-4 Corona): the darkest color – vegetation cover without changes, the lightest – areas without vegetation (or snowfields) at all dates. The remaining bright colors correspond to the changes shown in the images of different dates. The inset shows the Lavovy Creek basin. The arrows indicate areas devoid of vegetation identified on the 2009 image, where landslides-slides apparently occurred in the early 2000s (by 2017, these areas are already overgrown and poorly recognized)*

Наибольшие по площади участки изображения, имеющие красный цвет, в основном соответствуют оползню-обвалу 2014 г. и его последствиям в виде селевых отложений в русле р. Гейзерной. Желтый цвет соответствует обнажениям, которые незаметны на снимке 1964 г., но наблюдаются и в 2009, и в 2017 гг. Зеленый цвет соответствует обнажениям, отмечаемым только на снимке 2009 г. Участок обширного оползня 2007 г. имеет на изображении преимущественно желтый цвет, соответствующий обнажениям, зафиксированным двумя последними съемками. Однако на нем выделяются и зеленые участки, свидетельствующие о появлении растительности, и почти черные – уцелевшие участки растительного покрова, сползшие вместе с породами. На увеличенном фрагменте композита (рис. 6) выделен участок в правом борту ручья Лавовый, где на снимке 2009 г. отчетливо видны относительно свежие обнажения, изобразившиеся здесь ярко-зеленым цветом, обозначающим, что к 2017 г. они уже в основном заросли травянистой растительностью. Мелкие красные, реже желтые, точки и линии, которых особенно много в верховьях долины, соответствуют нерастаявшим снежникам на снимке 2017 г. Участки зеленого цвета соответствуют не только изменениям в состоянии склонов, но глубоким теням, присутствующим на снимке 2009 г. Снежники и падающие тени на крутых склонах искажают картину изменений, что обуславливает необходимость анализировать каждый цветной участок. Однако однородный темный цвет изображения однозначно свидетельствует о ненарушенном во все три срока растительном покрове.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатами проведенного дешифрирования явились контуры участков обнажений на каждый из трех временных срезов, а также зоны их пересечения, что позволило показать как неизменность состояний отдельных участков во все три срока, так и различия в их состоянии в два или в один срок. Составленная схема дешифрирования площадей развития современных склоновых процессов (рис. 7) позволяет судить о динамике последних с 1964 г. по настоящее время. Общая площадь изученной территории составляет 27,37 км<sup>2</sup>, к 2017 г. суммарная площадь обнажений – 3,7 км<sup>2</sup> (без учета углов наклона), т.е. около 13,5 % всей площади. Расчеты, выполненные на основе результатов дешифрирования, позволили определить, что доля общей площади долины, пораженной современными склоновыми процессами, составила на 1964 г. 10,5 %, на 2009 г. – 14,8 % и 13 % в 2017 г.

В целом, по результатам проведенного дешифрирования можно заключить, что обнаженные участки склонов наиболее широко развиты на левобережье реки и в ее верхнем течении. Полевые исследования показали, что в верховьях долины – по бортам Правой илевой Гейзерных – доминируют крутые обнаженные склоны с развитием преимущественно осыпных процессов. В то же время установлено, что значительные участки пологих (менее 8°) приводораздельных склонов лишены растительности в связи с широким распространением здесь снежников, которые сохраняются на этих отметках (выше 850–900 м над у. м.) до 11 месяцев в году, и, соответственно, с активным развитием нивальных процессов. При отсутствии снежников, эти участки, безусловно, были бы покрыты растительностью.

В верхних частях склонов левобережной части долины р. Гейзерной доминируют отседание краев вулканического плато с формированием обвалов, осыпи, а в средней части – оползни; в местах повышенного увлажнения и развития гидротермально измененных пород – оползни-сплывы. В нижних частях склонов как правого, так и левого бортов на подрезаемых рекой участках отмечаются осыпи (рис. 8). Обнаженные обваль-ные стенки масштабных смещений 2007 и 2014 гг. на левобережье долины р. Гейзерной достигают протяженности 500–800 м при высотах 150–200 м, их формированию предшествовало образование трещин отседания [Пинегина и др., 2008; Двигало и др., 2014]. По нашим оценкам, более 75 % всей площади обнажений приходится на левобережье реки (это 10,2 % от общей площади долины). По долинам притоков р. Гейзерной прослеживаются следы периодического формирования селей, явившихся следствием схода небольших оползней и оползней-сплывов.

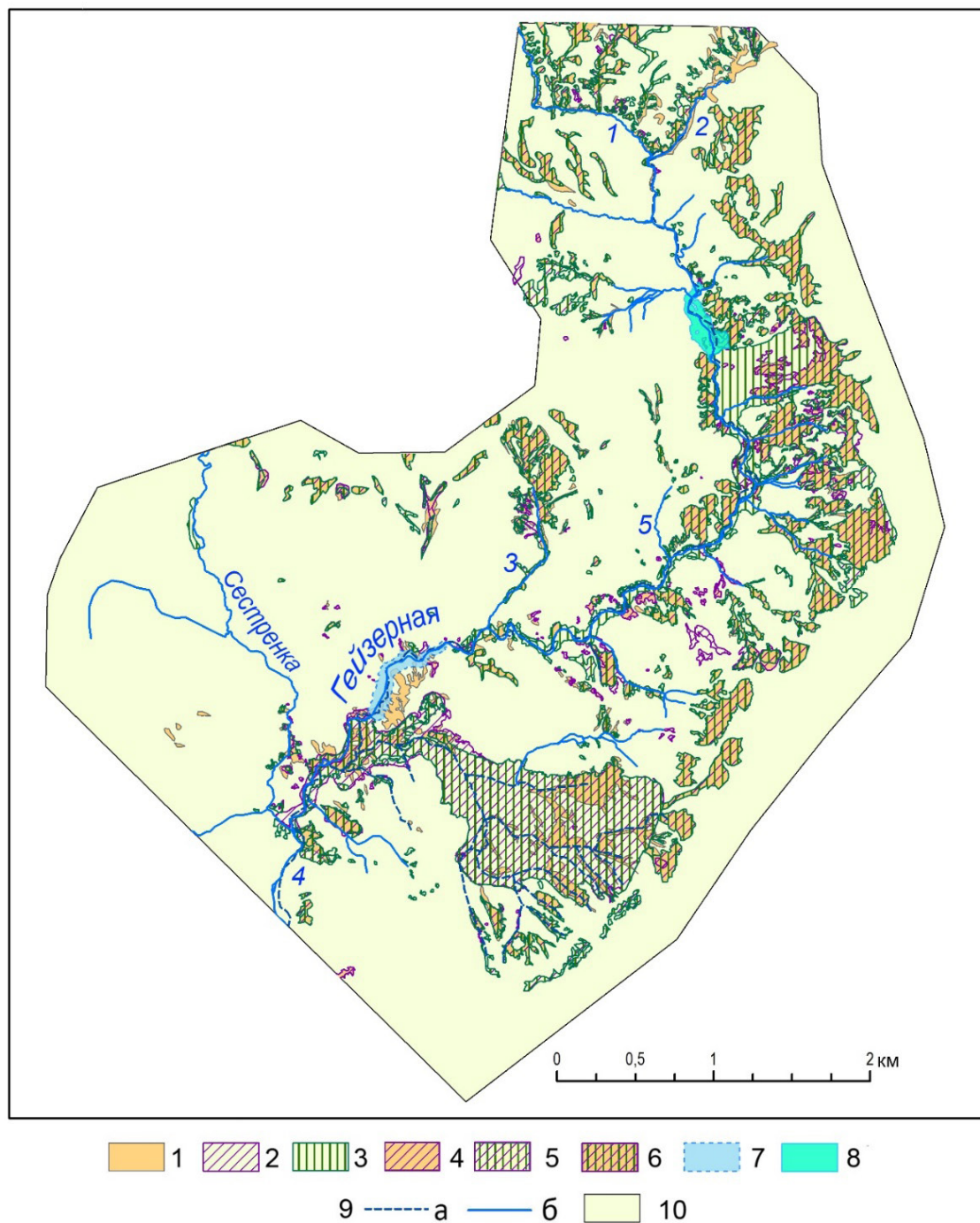


Рис. 7. Схема дешифрирования проявлений современных склоновых процессов в долине р. Гейзерной по разновременным снимкам. Участки активизации склоновых процессов (лишенные растительности) на временные срезы: 1 – 1964 г., 2 – 2009 г.; 3 – 2017 г.; 4 – 1964 и 2009 гг., 5 – 2009 и 2017 гг.; 6 – 1964, 2009 и 2017 гг.; подпрудные водоемы: 7 – 2009 г., 8 – 2017 г.; 9 – водотоки: а – 1964 г., б – 2009 г.; 10 – участки, покрытые растительностью во все три срока. Цифрами на рисунке обозначены водотоки: 1 – Правая Гейзерная, 2 – Левая Гейзерная, 3 – руч. Лавовый, 4 – Шумная, 5 – Игрушка.

Fig. 7. The result of interpretation of slope processes manifestations in the valley of the Geysernaya river on multi-temporal images. Designations: areas of activation of slope processes (devoid of vegetation) on temporal sections: 1 – 1964, 2 – 2009; 3 – 2017; 4 – 1964 and 2009, 5 – 2009 and 2017; 6 – 1964, 2009 and 2017; sub-pond reservoirs: 7 – 2009; 8 – 2017. 9 – watercourses: a – 1964. b – 2009. 10 – areas covered by vegetation in all three terms. Numbers in the figure indicate watercourses: 1 – Right Geysernaya, 2 – Left Geysernaya, 3 – Lavovy creek, 4 – Shumnaya, 5 – Igrushka.

Исследованиями [Кугаенко и др., 2007; Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Лебедева и др., 2020] установлено, что развитию разномасштабного и разновременного смещения пород на склонах левобережья долины р. Гейзерной способствовали их гидротермальные изменения, наличие отмерших термальных площадок и субвертикальных разрывных нарушений, трещин отседания, а также обводнение и мерзлотные процессы. Масштабные склоновые процессы инициировались преимущественно ливневыми осадками и сейсмическими толчками. Активность современных гравитационных смещений на левобережье, по-видимому, обусловлена приуроченностью этого борта долины к ограничивающему кальдере кольцевому разлому, сохраняющему свою активность, а также к наличию там участка современного поднятия территории [Lundgren, Lu, 2006].



*Рис. 8. Панорама долины р. Гейзерной (фото с БПЛА, 2021 г.). В центре – левый борт долины в ее среднем течении с многочисленными обнажениями – участками смещения материала на склонах, наиболее масштабные из которых – оползень-обвал 2014 г. (1) и оползень 1981 г. (2). Правобережье р. Гейзерной представлено в левой (верхнее течение реки, подпрудное озеро 2014 г.) и правой частях панорамы. Обнаженные склоны с доминированием осыпных процессов приурочены к нижним частям бортов долины. Прослеживаются залесенные ступени древних блоковых оползней (белые стрелки).*

*Fig. 8. Panorama of the Geysernaya River valley (UAV photo, 2021). In the center is the left side of the valley in its middle reaches with numerous outcrops - areas of material displacement on the slopes, the most extensive of which are the landslide collapse of 2014 (1) and the landslide of 1981 (2). The right bank of the Geysernaya River is represented in the left (upstream of the river, dammed lake 2014) and right parts of the panorama. The exposed slopes with dominance of scree processes are confined to the lower parts of valley sides. The forested steps of ancient block landslides (white arrows) are traced*

Интересно отметить, что на правобережье реки широкого распространения следов активных склоновых процессов не наблюдается, на эту территорию приходится менее 25 % площади всех современных обнажений (или 3,3 % от общей площади долины). Судя по результатам дешифрирования, здесь на склонах южной экспозиции, даже в верхних, очевидно, более сухих их частях в настоящее время преобладают преимущественно небольшие оползни-сплывы, оползни течения, из которых многие затем трансформируются в сели. Наибольшая обнаженность склонов на правобережье реки наблюдается в верховьях ручья Лавового (рис. 3, 4, 6). Активная эрозия обусловлена здесь многочисленными выходами инфильтрационных грунтовых вод первого водоносного горизонта на контакте лав экструзии Гейзерной и пемзовых туфов, туфопесчаников, туфогравелитов с линзами брекчий озерных отложений Узон-Гейзерной кальдеры (пачка желтых скал, Q<sub>3</sub><sup>4</sup>). Вулканоогенно-озерные отложения легко поддаются эрозии с формированием участков бедленда практически начиная с водосборной воронки в истоках ручья, что хорошо видно на снимке с БПЛА (рис. 4). Наряду с многочисленными промоинами и врезами здесь в более плотных туфах на контакте с экструзией формируются эрозионно-денудационные останцы в виде конических башенок. Ниже по течению на правобережье ручья на снимке 2009 г. хорошо видны следы оползней-сплывов, которые к 2017 г. уже практически заросли. Однако еще ниже в долине ручья четко прослеживаются следы селя (селевый вал), который сформировался из материала данных оползней.

Необходимо также отметить, что при дешифрировании снимков на бассейн р. Гейзерной помимо признаков активных современных и исторических смещений материала

на склонах, которые наиболее широко представлены в виде обнажений на левом борту долины, на основе анализа морфологии рельефа и по данным полевых работ нами также были выявлены следы древних масштабных смещений. Так, в нижних участках склонов как правого, так и левого бортов долины р. Гейзерной дешифрируются покрытые растительностью тела древних блоковых оползней, которые придают бортам долины ступенчатый облик (рис. 8). Следы крупных гравитационных смещений отмечены в бассейне р. Сестренки, в низовьях ручьев Лавового и Игрушка, где они привели к изменению направления течения и однотипным перестройкам этих правых притоков р. Гейзерной. В долине р. Сестренка (правого притока р. Шумной, как и р. Гейзерная) следы древнего «мощного оползневого процесса» были описаны ранее В.Л. Леоновым [Двигало, Мелекесцев, 2009]. Дешифрирование осенних снимков 2016 г., на которых неровности рельефа прекрасно оттенены свежевыпавшим снегом, и маршрутные наблюдения 2021 г. позволяют заключить, что холмисто-западинный рельеф на междуречье ручья Скользкого (правый приток р. Гейзерной) и р. Сестренки, сформированный хаотичными нагромождениями глыб лав размером до 2–5 м, представляет собой тело гигантского обвала, возможно сейсмотектонической природы, сформированного в результате обрушения края экстрезии Гейзерной. Не исключено, что подобных событий здесь было несколько (о чем косвенно свидетельствует различная степень восстановления растительности на поверхности обвальных масс, наличие следов нескольких подпрудных озер, широкое распространение в разной степени сnivelированного холмисто-западинного рельефа). Результаты дешифрирования позволяют предположить, что на более ранних этапах развития долины происходили также, причем видимо неоднократные, обвалы краев экстрезии плато Круглого.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, сравнение современной ситуации, определяемой по снимкам высокого пространственного разрешения, с архивным, имеющим значительно худшее качество как по геометрическим, так и по яркостным характеристикам, позволяет лишь в некотором приближении охарактеризовать динамику развития активных склоновых процессов на протяжении последних 56 лет.

Относительно невысокая точность определения площадей и очертаний контуров по снимкам 1964 и 1967 гг. (ошибка планового положения достигает 5 метров против 1–1,5 м на современных снимках) влияет и на точность определения площадей изменившихся участков. Однако для масштабных событий, таких как оползень 2007 г. и оползень-обвал 2014 г. года, такую точность можно считать приемлемой.

В процессе дешифрирования следов современных склоновых процессов установлено, что они доминируют на левобережье р. Гейзерной, где сосредоточено более 75 % площади всех обнажений (или 10,2 % от общей исследуемой площади долины), что, по-видимому, обусловлено приуроченностью этого борта долины к ограничивающему кальдеру кольцевому разлому, сохраняющему свою активность, а также к наличию там участка современного поднятия территории.

На правобережье реки значительные площади занимают древние крупные гравитационные смещения, возможно, связанные с обвалами краев экстрезивных массивов. Среди современных процессов тут преобладают оползни-сплывы и эрозия в местах выхода грунтовых вод. На правобережье приходится менее 25 % площади всех обнажений (или 3,3 % от общей площади исследуемой территории).

Увеличение площади обнаженных участков в верховьях реки связано как с развитием осыпных процессов на бортах молодых врезов, так и с широким распространением там снежников на междуречьях.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Методики исследований разрабатывались в рамках темы государственных заданий Института географии РАН № АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005) и № ААА-

A-A19-119022190168-8, а также географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова – № 121051400061-9. Дешифрирование снимков и полевые работы в долине р. Гейзерной проведены за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00216 (<https://rscf.ru/project/21-17-00216/>). Авторы признательны сотрудникам Кроноцкого заповедника за помощь при проведении работ и предоставленные архивные материалы.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research methods were developed within the framework of the topics of state assignments of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. AAAA-A19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005) and No. AAAA-A19-119022190168-8, and No. 121051400061-9 of the Department of Geography, Lomonosov Moscow State University; the interpretation of images and field work in the Geysernaya River valley were conducted at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 21-17-00216 (<https://rscf.ru/project/21-17-00216/>). The authors are grateful to the staff of the Kronotsky Reserve for their assistance in this work and for the archival materials provided.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике. Ред. Завадская А.В. М.: КРАСАНД, 2015. 88 с.
2. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии). Вулканология и сейсмология, 2009. № 5. С. 24–37.
3. Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В., Жарков Р.В. Мониторинг и прогноз селевых процессов в камчатской Долине гейзеров на основе фотограмметрических исследований. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Материалы III Межд. конф. Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 2014. С. 105–108.
4. Жуковский М.О. Использование данных спутников CORONA в археологических исследованиях. Краткие сообщения Института археологии, 2012. № 226. С. 45–54.
5. Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В. Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной (Камчатка). Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тезисы докл. III Всерос. Научн. конф. с межд. участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 138.
6. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Сеницын В.И. Сейсмические наблюдения в Долине гейзеров. Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2007. № 2. Вып. 10. С. 171–172.
7. Лебедева Е.В. Виды воздействия вулканической и поствулканической деятельности на флювиальный рельеф. Геоморфология, 2019. № 4. С. 49–66. DOI: 10.31857/S0435-42812019449-66.
8. Лебедева Е.В. Влияние газогидротермальной деятельности на формирование рельефа речных долин геотермальных зон. Пути эволюционной географии, 2021: Мат-лы II Всерос. Научн. конф., посвящ. памяти проф. А.А. Величко. М.: ИГ РАН, 2021. С.185–190.
9. Лебедева Е.В., Жарков Р.В. Аккумулятивные формы рельефа в долинах с газогидротермальными проявлениями (на примере водотоков ряда вулканических массивов Курило-Камчатского региона). Геоморфология, 2022. Т. 53. № 1. С. 81–101. DOI: 10.31857/S0435428122010096.
10. Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования. Геоморфология. 2020, № 2. С. 60–73. DOI: 10.31857/S0435428120020066.
11. Леонов А.В. Каталог основных объектов Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка). М.: ИИЕТ РАН, 2012. 217 с. Электронное издание, № гос. регистрации 0321200426. Электронный ресурс: <http://www.kscnet.ru/ivs/lggp/cat/catalogue-2012.pdf>
12. Леонов А.В. Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника. Долина гейзеров и кальдера вулкана Узон: история и современность. М.: Издательство ООО «Реарт», 2017. 384 с.



13. *Леонов В.Л.* Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2014. № 1. Вып. 23. С. 7–20.
14. *Лобкова Л.Е., Лобков Е.Г.* Экологические последствия оползня, произошедшего в Долине гейзеров 3 июня 2007 г. (первый сезон после природной катастрофы). Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Доклады VIII межд. научн. конф., посвященной 275-летию с начала Второй Камчатской экспедиции (1723–1733 гг.). Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатпресс, 2008. С. 114–140.
15. *Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин В.А., Калачева Е.Г., Чирков С.А., Мелекестев И.В., Двигало В.Н., Леонов В.Л., Селиверстов Н.И.* Камчатская Долина гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. Вестник ДВО РАН, 2008. № 1. С. 33–44.
16. *Lee H.Y., Kim T., Park W., Lee H.K.* Extraction of digital elevation models from satellite stereo images through stereo matching based on epipolarity and scene geometry. Image and Vision Computing, 2003. V. 21. No. 9. P. 789–796.
17. *Lundgren P., Lu Zh.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations. Geophysical research letters. 2006. V. 33. Issue 6. DOI: 10.1029/2005GL025181.
18. *Mészáros M., Szatmári J., Tobak Z., Mucsi L.* Extraction of digital surface models from CORONA satellite stereo images. Journal of Environmental Geography, 2008. V. 1. No. 1–2. P. 5–10. DOI: 10.14232/jengeo-2008-43852.
19. *Sohn H., Kim G-H., Yom J-H.* Mathematical modelling of historical reconnaissance CORONA KH-4B imagery. The Photogrammetric Record, 2004. V. 19. Issue 105. P. 51–66. DOI: 10.1046/j.0031-868X.2003.00257.x.

#### REFERENCES

1. Atlas of the valley of the Geysernaya River in the Kronotsky Reserve. Ed. Zavadskaya A.V. Moscow: KRASAND, 2015. 88 p. (in Russian)
2. *Dvigalo V.N., Melekestsev I.V.* Geological and geomorphological consequences of catastrophic landslide and landslide-landslide processes in the Kamchatka Valley of Geysers (according to aerial photogrammetry data). Volcanology and Seismology, 2009. No. 5. P. 24–37 (in Russian).
3. *Dvigalo V.N., Svirid I.Yu., Shevchenko A.V., Zharkov R.V.* Monitoring and forecast of mudflow processes in the Kamchatka Valley of Geysers based on photogrammetric studies. Mudflows: catastrophes, risk, forecast, protection: Proceedings of III Int. conference Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin Branch of FEGI FEB RAS, 2014. P. 105–108 (in Russian).
4. *Zhukovsky M. O.* Use of data from CORONA satellites in archaeological research. Brief reports of the Institute of Archeology, 2012. No. 226. P. 45–54 (in Russian).
5. *Zerkal O.V., Gvozdeva I.P., Frolova Yu.V.* The development of landslide processes in the valley of the river Geysernaya. Geodynamic processes and natural disasters: Presentation abstracts of III All-Russian. scientific conf. with int. participants. Yuzhno-Sakhalinsk: IMG&G FEB RAS, 2019. P. 138 (in Russian).
6. *Kugaenko Yu.A., Saltykov V.A., Sinitsyn V.I.* Seismic observations in the Valley of Geysers. Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”. Earth Sciences, 2007. No. 2. Issue 10. P. 171–172 (in Russian).
7. *Lebedeva E.V.* Types of impacts of volcanic and post volcanic activity on fluvial relief. Geomorfology, 2019. No. 4. P. 49–66 (in Russian). DOI: 10.31857/S0435-42812019449-66.
8. *Lebedeva E.V.* Influence of gas-hydrothermal activity on the formation of the relief of river valleys of geothermal zones. Routes of evolutionary geography, 2021: Proceedings of the 2nd Scientific Conference in Memory of Prof. A.A. Velichko. Moscow: IG RAS, 2021. P. 185–190 (in Russian).
9. *Lebedeva E.V., Zharkov R.V.* Accumulative landforms in valleys with gas-hydrothermal manifestations (the Kuril-Kamchatka region as an example). Geomorphology, 2022. V. 53. No. 1. P. 81–101 (in Russian). DOI: 10.31857/S0435428122010096.

10. *Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., and Zavadskaya A.V.* River valley Geysernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief formation. *Geomorphology*, 2020. No. 2. P. 60–73 (in Russian). DOI: 10.31857/S0435428120020066.
  11. *Leonov A.V.* Catalog of the main objects of the Valley of Geysers (Kronotsky Reserve, Kamchatka). Moscow: IHST RAS, 2012. 217 p. Electronic edition, Reg. No. 0321200426. Web resource: <http://www.kscnet.ru/ivs/lggp/cat/catalogue-2012.pdf> (in Russian)
  12. *Leonov A.V.* Catalog of geysers in the Kronotsky Reserve. The Valley of Geysers and the Uzon Volcano Caldera: History and Modernity. Moscow: Publishing House LLC “Reart”, 2017. 384 p. (in Russian).
  13. *Leonov V.L.* The collapse and landslide that occurred on January 4, 2014 in the Valley of Geysers, Kamchatka, and their consequences. *Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”*. Earth Sciences, 2014. No. 1. Issue. 23. P. 7–20 (in Russian).
  14. *Lobkova L.E., Lobkov E.G.* Environmental consequences of the landslide that occurred in the Valley of Geysers on June 3, 2007 (the first season after the natural disaster). Conservation of the biodiversity of Kamchatka and adjacent seas: Presentations of the VIII International Scientific Conference Dedicated to 275 Anniversary of the Start of the Second Kamchatka Expedition (1723–1733). Publishing House Kamchatpress, 2008. P. 114–140 (in Russian).
  15. *Pinegina T.K., Delemen I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Leonov V.L., Seliverstov N.I.* Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on June 3, 2007. *Vestnik FEB RAS*, 2008. No. 1. P. 33–44 (in Russian).
  16. *Lee H. Y., Kim T., Park W., Lee H.K.* Extraction of digital elevation models from satellite stereo images through stereo matching based on epipolarity and scene geometry. *Image and Vision Computing*, 2003. V. 21. No. 9. P. 789–796.
  17. *Lundgren P., Lu Zh.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations. *Geophysical research letters*. 2006. V. 33. Issue 6. DOI: 10.1029/2005GL025181.
  18. *Mészáros M., Szatmári J., Tobak Z., Mucsi L.* Extraction of digital surface models from CORONA satellite stereo images. *Journal of Environmental Geography*, 2008. V. 1. No. 1–2. P. 5–10. DOI: 10.14232/jengeo-2008-43852.
  19. *Sohn H-G., Kim G-H., Yom J-H.* Mathematical modelling of historical reconnaissance CORONA KH-4B imagery. *The Photogrammetric Record*, 2004. V. 19. Issue 105. P. 51–66. DOI: 10.1046/j.0031-868X.2003.00257.x.
-