

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СНИМКОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДОЛИНЕ Р. ГЕЙЗЕРНОЙ (КАМЧАТКА)

Аннотация

На основе дешифрирования космических снимков высокого пространственного разрешения (0.5-3 м) трех временных срезов - 1964, 2009 и 2017 гг. - выявлены участки активизации современных процессов рельефообразования. Результатами дешифрирования явились контуры обнажений, выделенные путем визуального анализа разновременных снимков, квантования яркостей для панхроматического снимка 1964 г. и расчета вегетационного индекса по многозональным снимкам двух последних дат съемки. Проведенные работы показали, что сочетание визуального дешифрирования исходных снимков и результатов их цифровой обработки наилучшим образом позволяет разделить участки, покрытые растительностью разного типа и открытые обнажения горных пород, отчасти даже нивелируя различия в освещенности склонов разной крутизны. Результаты сравнивались с данными термальной съемки и заверялись в процессе полевых геоморфологических исследований и съемки с БПЛА.

Апробация методики составления карты динамики склоновых процессов на основе дешифрирования разновременных снимков на временном отрезке более 50 лет осуществлялась на двух ключевых территориях, характеризующихся наиболее разнообразными и разномасштабными проявлениями экзогенных процессов. Расчеты, выполненные на основе результатов дешифрирования, позволили определить, что 2 последних крупных обвало-оползня 2007 и 2014 гг. резко сократили площадь, покрытую растительностью: соответственно с 70% до 7% и с 60 до 4%. Установлено, что на Северном участке доля территории со следами активизации склоновых процессов за 53 года выросла с 20.9 до 30.2%, на Южном - увеличилась с 12 до 30%. Анализ пространственного и временного распределения участков активизации склоновых процессов показал, что помимо общеизвестных триггеров, таких как ливневые осадки и землетрясения, в данном районе очевидно влияние на смещение материала на склонах спектра эндогенных процессов.

Ключевые слова: космические снимки высокого разрешения, дешифрирование, цифровая обработка снимков, оползни, обвалы, газогидротермальные проявления

Введение

Масштабные смещения материала на склонах – оползни и обвалы различного типа - являются важнейшими формами проявлений опасных геоморфологических процессов, которые могут нанести вред как населению, так и инфраструктуре. В горных районах они, в том числе, влекут за собой цепочки катастрофических процессов [Лебедева, 2018] – сход селей, перегораживание речных долин массами пород с формированием подпрудных водоемов, при спуске которых нередко опять-таки возникают сели. Важную роль при формировании крупных смещений на склонах играют внешние (выпадение экстремальных осадков, землетрясения) и внутренние факторы (крутизна склонов, литологические свойства пород и гидрогеологические особенности строения территории).

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 физические свойства последних. Очевидно, что из-за этого на таких участках могут кардинально меняться особенности и темпы денудации. Однако эти вопросы практически не освещены ни в отечественной, ни в мировой научной литературе. Воздействие газогидротермальных проявлений на характер протекания склоновых процессов и, как следствие, на специфику строения речных долин в целом изучено плохо, масштабы и особенности подобных процессов редко рассматривались исследователями, и в настоящее время опубликованных материалов по

данному вопросу чрезвычайно мало. Однако наши полевые наблюдения в долинах водотоков на склонах ряда вулканов Южных Курильских островов и Камчатки показывают, что на термальных участках интенсифицируется размыв пород, происходит смещение значительных объемов материала со склонов речных долин, сопровождающееся сходом селей; в результате чего к подобным территориям часто приурочены расширения речных долин [Лебедева, 2019, 2021; Лебедева и др., 2020; Лебедева, Жарков, 2022].

Детальная оценка масштабов и характера активизации процессов на бортах долин геотермальных зон практически не проводилась. Исключением является, пожалуй, лишь работа сотрудников геологического факультета МГУ [Фролова и др., 2019; Зеркаль и др., 2019], составивших в 2013 г. по результатам дешифрирования снимков 2009 г. инвентаризационную карту проявлений склоновых процессов на участке бассейнов р. Шумной и ее левого притока р. Гейзерной (Камчатка), расположенных в одной из крупнейших геотермальных зон мира. Долина р. Гейзерной привлекла особое внимание ученых в 2007 г. после схода гигантского оползня, трансформировавшегося в сель, последствия и причины которого были детально и всесторонне изучены специалистами [Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Кугаенко и др., 2007, 2010 и др.]. Также были проведены исследования особенностей физико-химических свойств пород, слагающих борта долины, и последствий их преобразования под воздействием гидротермальных растворов [Фролова и др., 2015], однако картирование участков трансформации пород не проводилось. Произошедший в долине в 2014 г. оползень-обвал, также приведший к формированию мощного селя в долине реки, уже не привлек такого внимания исследователей [Леонов, 2014], однако показал, что подобные процессы весьма типичны для данной территории. Необходимо отметить, что долина р. Гейзерной (рис.1) является объектом природного наследия ЮНЕСКО и находится в пределах Кроноцкого заповедника, при этом она активно посещается туристами, а подобные явления делают ее территорию весьма небезопасной [Завадская и др., 2021].

Цель данной работы - выявление участков активизации современных склоновых процессов в бассейне р. Гейзерной, анализ их пространственного и временного распределения на основе дешифрирования разновременных снимков за максимально возможный временной интервал и полевых исследований. В дальнейшем это, с одной стороны, даст возможность понять причины распределения мест интенсивной трансформации рельефа и оценить скорость формирования долины, а с другой – позволит разработать дополнительные рекомендации по организации безопасного туризма на территории данного участка Кроноцкого заповедника.

Район исследований

Река Гейзерная является левым притоком р. Шумной (бассейн Тихого океана) и берет свое начало на отметке примерно 885 м на склонах вулкана Кихпиныч. Ее протяженность составляет около 11 км, перепад высот – более 700 м, средний уклон 0.06, площадь бассейна 57.8 км² [Воробьевский и др., 2010]. Продольный профиль ступенчатый, невыработанный; глубина вреза в приустьевой части превышает 400 м, ширина достигает 3.5 км. Склоны долины крутые (20-40°), на многих участках ступенчатые.

Долина р. Гейзерной расположена в восточной части Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки. Ее положение в целом совпадает с зоной разлома СВ ориентировки, протягивающейся от влк. Семячик к влк. Кихпиныч [Устинова, 1955; Сугробов и др., 2009]. В геологическом строении территории принимают участие три комплекса пород: докальдерный (Q₃¹⁻³), синхронный кальдерообразованию (39-40 тыс. л.н.) и посткальдерный. В среднем течении долина следует вдоль кольцевого разлома, ограничивающего кальдеру, и вскрывает лавы и пирокластику андезитов и дацитов докальдерного комплекса [Леонов и др., 1991; Атлас..., 2015]. При этом на ее правом борту и по обоим бортам нижнего участка долины

выходят заполняющие кальдеру слабо литифицированные вулканогенно-озерные отложения позднего плейстоцена - туфы, туфопесчаники, туфогравелиты с линзами брекчий (Q₃⁴). В бассейне р. Гейзерной выделяется пять водоносных комплексов. Первые четыре из них представляют собой горизонты холодных грунтовых вод, а пятый – самый глубокий - это высокотемпературные напорные воды, которые выходят по трещинам в виде многочисленных гейзеров, кипящих источников, паровых струй. Химический состав этих вод – хлоридно-натриевый с минерализацией – 1.8–2.2 г/л [Сугробов и др., 2009]. Проявлениями тепловых аномалий на поверхности являются также поля гидротермально измененных пород и нагретая до различных температур почва.

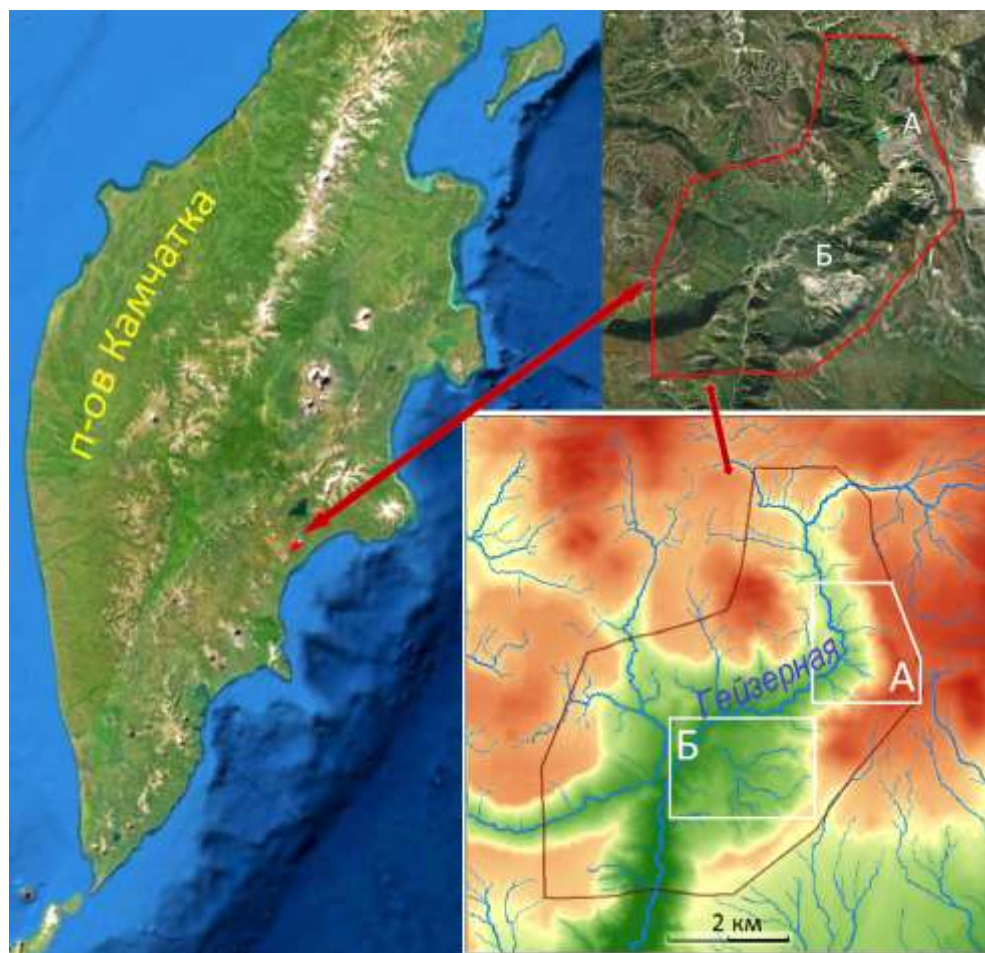


Рис.1. Положение района исследований и ключевые территории, на которых проводилась апробация методики дешифрирования. А – Северный участок, Б – Южный участок.

Fig.1. Location of the study area and key areas where the interpretation technique was tested. А - Northern section, Б – Southern section

Растительный покров территории характеризуется высотной поясностью: на абс. отметках до 700 м встречаются высокотравье и парковые леса из каменной березы, выше доминируют ольховый и кедровый стланики, на высотах от 900-1000 м – горные тундры. [Сугробов и др., 2009]. Ситуация усложняется наличием термальных полей, растительность на которых при температуре выше 48° С разрежена либо находится в угнетенном состоянии, а при 70-100 ° С - отсутствует [Атлас..., 2015].

Материалы

Выявление участков активизации склоновых процессов в долине р. Гейзерной на максимально возможном временном отрезке (более 50 лет) проводилось на основе

сформированной базы источников пространственных тематических данных. Наиболее ранний временной срез – лето 1964 г. – представлен снимком с американского разведывательного спутника Key-Hole-4 (серия спутников американского проекта CORONA 1960–1972 [Жуковский, 2012]). Наилучшим качеством обладают материалы космических съемок со спутников GeoEye, Pleiades -1A/1B, World-View-2, которые представляют с очень высоким пространственным разрешением (0.5 м) относительно большой временной промежуток: 2009, 2013, 2016 и 2017 гг. Принимая во внимание сезонные особенности съемки, нам пришлось отказаться от использования снимков 2016 г. (20 июня и 29 сентября), поскольку один из них отображает территорию со значительным количеством снежного покрова, а на осеннем снимке большие площади закрыты темными тенями из-за низкого положения солнца. На разных этапах исследования использовались цифровые модели рельефа (ЦМР): ArcticDEM с разрешением 2 м и модель, созданная на основе снимков SPOT6 за сентябрь 2017 г. с разрешением 3 м.

Все источники пространственных данных были объединены в ГИС-проект, где была обеспечена возможность одновременного анализа различных материалов и выполнена привязка архивных снимков Key-Hole 1964г. к снимкам высокого разрешения за 2009 и 2017 гг. Кроме того в проект были добавлены тематические карты на территорию долины: геологическая В.Л. Леонова, проявления склоновых процессов О.В. Зеркаля с коллегами (все – из фондов Кроноцкого заповедника), а также результатов термальной съемки 2010 г. [Kiryukhin et al., 2012].

Для интерпретации данных использовались материалы полевых обследований местности 2020-21гг. - аэровизуальных и пеших маршрутных наблюдений, а также съемки территории с БПЛА DJI Phantom 4 (рис. 2).



Рис. 2. Перспективный снимок с БПЛА: вид вверх по долине в среднем течении р. Гейзерной (съемка А.А. Медведева, 2021г.). На переднем плане по центру – обвальная плотина и подпрудное озеро 2014г., следы оползня 1981г.(белая стрелка). Слева – обнаженные склоны правобережья реки в месте удара обвальной массы 2014г. Справа – стенка срыва оползня-обвала 2014г., видны парогазовые струи термальных проявлений (черные стрелки); белые пятна на переднем плане – участки гидротермально измененных пород.

Fig. 2. Perspective UAV image: view up the valley in the middle reaches of the river. Geysernaya (survey by A.A. Medvedev, 2021). In the foreground, in the center, there is a landslide dam and a dammed lake formed in 2014, traces of a landslide in 1981 (white arrow). On the left - the exposed slopes of the right bank of the river at the site of the impact of the landslide mass in 2014. On the right - the wall of the collapse of the landslide-collapse of 2014, steam-gas jets of thermal manifestations are visible (black arrows); white spots in the foreground are areas of hydrothermally altered rocks

Методика дешифрирования снимков выбранных временных срезов

Наиболее очевидный, подтвержденный полевыми наблюдениями способ оценки активности проявления экзогенных процессов в горном районе – это выявление и прослеживание изменений очертаний участков, лишенных растительного покрова, во времени и по площади. Дешифрирование проводилось по снимкам со спутников Key-Hole (1964 г.), GeoEye (2009 г.) Pleiades-1B (2017г.) и современным материалам БПЛА съемки. Разное исходное качество снимков потребовало применения различных подходов к их дешифрированию. Обилие факторов, влияющих на особенности изображения на снимках участков без растительности, обусловило первостепенную роль визуального анализа в их дешифрировании и оконтуривании. Вспомогательным методом стала цифровая обработка снимков: квантование яркостей для панхроматического снимка 1964 г. и расчет значений вегетационного индекса (NDVI) по многозональным снимкам 2009 и 2017 гг.

Дешифрирование архивного панхроматического снимка со спутника Key-Hole (1964 г.). Доступный одиночный снимок 1964 года характеризуется существенными геометрическими искажениями, обусловленными как свойствами камеры, так и наклоном оси при съемке [Жуковский, 2012], которые усилены глубоким расчленением рельефа. Хорошо известно, что растительный покров на черно-белых снимках изображается более темным фототонном, а обнажения горных пород чаще всего значительно светлее. Исключение составляют участки, куда падают тени, которые представлены темным тоном независимо от того, есть там растительный покров или нет. Другие источники возможных ошибок при опоре на фототон заключаются в неоднозначности трактовки светлых тонов. Во-первых, в долине р. Гейзерной распространены породы, различающиеся по цвету: светлые озерные туфы и темные лавы, экструзивные породы и дайковый комплекс, во-вторых, яркость обнаженных участков зависит также и от экспозиции склонов. А кроме того, наиболее светлый тон характерен для снежников. Однако перелетывающие снежники, засыпанные мелкообломочным материалом, по фототону почти не отличаются от обнаженных горных пород. Эти обстоятельства существенно осложняют применение автоматизированных методов распознавания объектов с опорой на цифровые значения яркости.

Дешифрирование архивного снимка со спутника Key-Hole 1964 г. потребовало предварительной коррекции геометрии изображения. Относительно приемлемые результаты, обеспечивающие возможность использования этого снимка для сравнения с более поздними ортотрансформированными изображениями, были достигнуты при наборе более 400 опорных точек на весь фрагмент. Однако и после такой привязки нельзя быть до конца уверенным, что очертания объектов адекватно отражают существовавшую ситуацию, поэтому не всегда можно однозначно определить, произошли ли изменения в очертаниях обнажений, или несовпадение контуров со снимка 1964 г. с более поздними обусловлено различиями в их геометрии (рис.3). Это обстоятельство снижает точность расчетов площадей по этому снимку.

На детальных цветных снимках, доступных начиная с 2009 г., разделение обнажений, нарастающих снежников и растительного покрова осуществляется более достоверно благодаря высокому пространственному, радиометрическому и спектральному разрешению, что обеспечивает уверенное разделение объектов и

проведение границ контуров, а также более точный последующий подсчет площадей выделенных участков.

Анализ цифровых значений яркости. Для формализованного разделения обнаженных участков и растительности по снимку 1964 г. было выполнено квантование яркостей с последующим цветокодированием: весь диапазон яркостей разделен на 7 ступеней в соответствии со значениями, свойственными разным видам поверхности (определены на основе анализа снимка 1964 г. с опорой на разновременные снимки), ступеням присвоены цвета от темно-зеленого – наиболее густая растительность до ярко-розового – полное отсутствие растительного покрова, то есть обнажения или снег (рис. 4). Для аналогичного разделения обнажений и покрытых растительностью участков по более современным многозональным снимкам 2009 и 2017 гг. более эффективным оказалось использовать значение нормализованного разностного вегетационного индекса – NDVI (отношение разности яркостей в ближнем инфракрасном и красном каналах к их сумме).

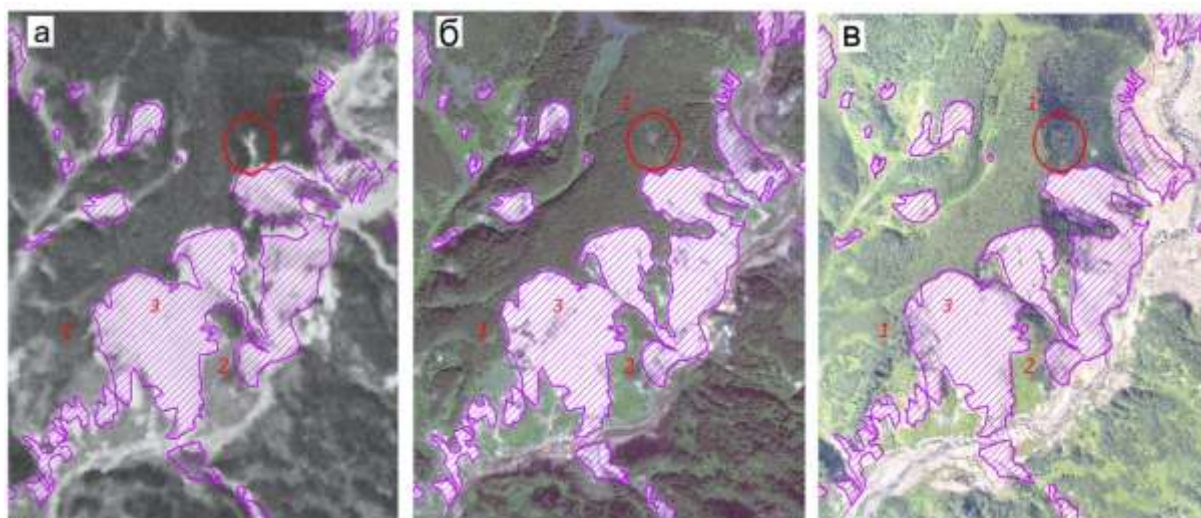


Рис. 3. Участок долины р. Гейзерной на снимках трех сроков с выделенными по снимку 2009 года (спутник Geo Eye) контурами обнажений: (а) – Key-Hole, 1964 г., (б) - GeoEye, 2009 г., (в) – ортофотоплан по БПЛА-съемке, 2021 г. Цифрами обозначены: 1 – плотная древесная растительность, 2 – травянистая растительность, 3 – обнажения горных пород. Кругом выделен участок, где произошло восстановление растительного покрова

Fig. 3. Section of the Geysernaya river valley on images of three periods with contours of outcrops determined on the image of 2009 (Geo Eye satellite): (a) – Key-Hole, 1964, (б) - GeoEye, 2009, (в) - orthophotomap according to UAV survey , 2021. The numbers indicate: 1 - dense woody vegetation, 2 - herbaceous vegetation, 3 - rock outcrops. The circle shows the area where the restoration of the vegetation cover has occurred.

Сочетание визуального дешифрирования исходных снимков и результатов их цифровой обработки позволило наилучшим образом разделить участки, покрытые растительностью разного типа и открытые обнажения горных пород, отчасти даже нивелируя различия в освещенности склонов разной экспозиции (рис. 4). Результаты дешифрирования подтверждаются полевыми исследованиями и съемкой с БПЛА (рис.2).

Полученные результаты

В результате анализа разновременных снимков была разработана легенда и методика создания карты динамики склоновых процессов на временном отрезке более 50 лет. Апробация методики осуществлялась на двух ключевых территориях – Северной (А) и Южной (Б) - с наиболее активным развитием склоновых процессов на протяжении

последних 5 десятилетий. Площади участков соответственно около 4.3 км² и 5.0 км², расположены они в среднем и нижнем течении р. Гейзерной на ее левобережье (рис. 5 А, Б). Результатами 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. Дополнительно отражались изменения растительного покрова на тех участках, где они имели место: в частности, начавшееся зарастание обвала-оползня 2007 г.

Особенностью исследуемой территории является наличие проявлений активной газогидротермальной деятельности. Сравнение результатов дешифрирования снимков с картой термальных аномалий [Kiryukhin et al., 2012], показало, что площадь термальных полей с разреженной травяно-моховой растительностью либо вовсе ее лишенных на изученных участках колеблется в пределах 4.7 - 6% площади.

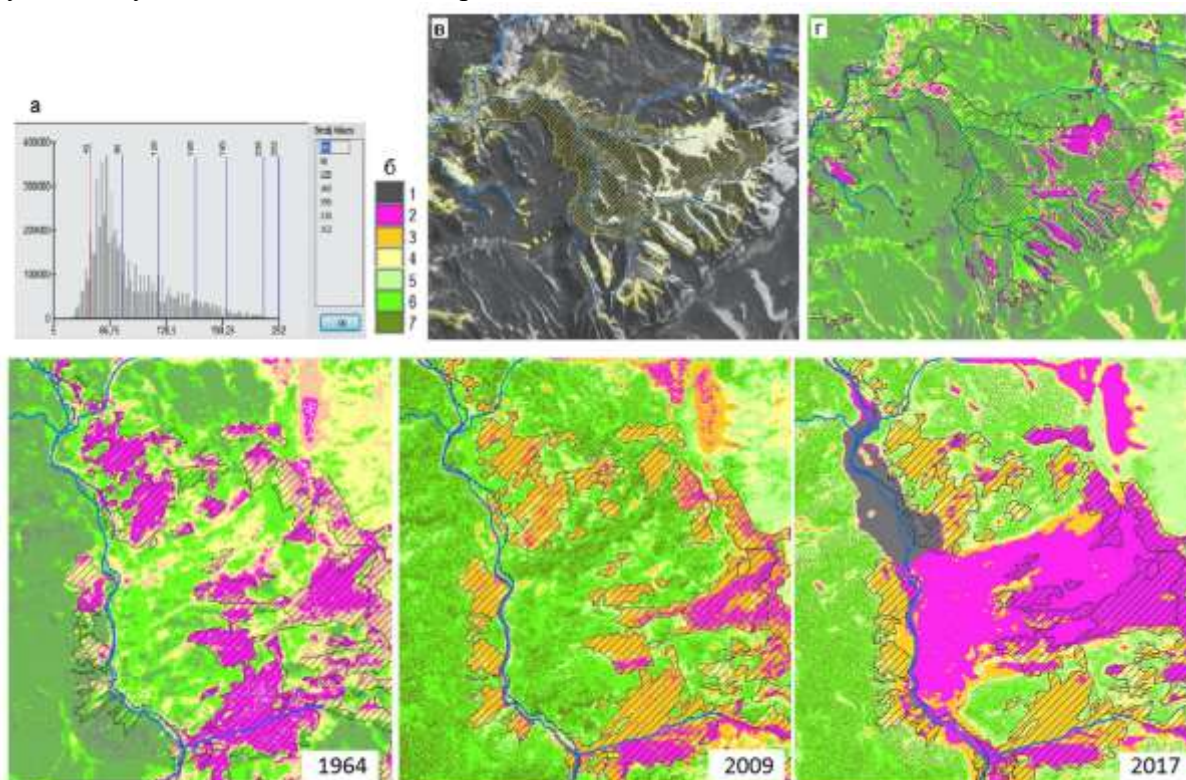


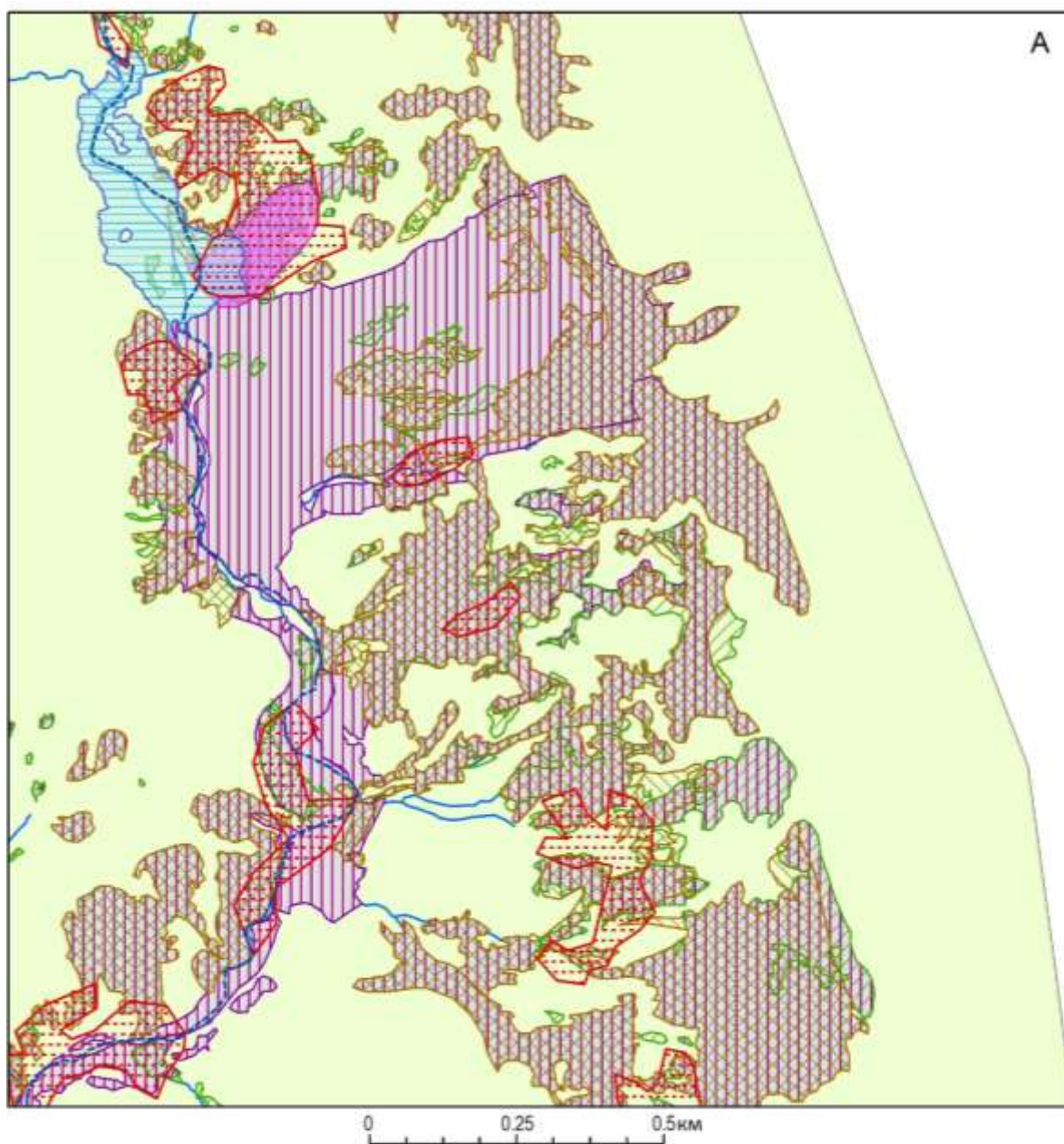
Рис.4. Цифровая обработка разновременных снимков. *Верхний ряд:* квантование значений яркости снимка 1964 года для выделения основных классов объектов и результат применения метода на участке, где произошел оползень 2007 г.: (а) - гистограмма значений яркости снимка; (б) - цветовая шкала, соответствующая выделенным ступеням яркости: черный (1) – вода, оранжево-розовые цвета (2-4) – отсутствие растительного покрова, оттенки зеленого (5-7) – травянистая и древесная растительность; (в) - фрагмент снимка 1964 г., (г) - результат его квантования. *Нижний ряд:* состояние склона на участке, где произошел обвал в 2014 г. (см. рис. 2), по разновременным снимкам высокого разрешения: (д) - 1964 г. (Key-Hole), (е) - 2009 г. (GeoEye), (ж) - 2017 г. (Pleiades -1A/1B) на основе квантования значений яркости (1964 г.) и вегетационного индекса (2009 и 2017 гг.). Контуры – результат визуального дешифрирования снимка 2009 г.

Fig. 4. Digital processing of multitemporal images. *Upper row:* image brightness values quantization in 1964 to identify the main classes of objects and the result of applying the method in the area where the landslide occurred in 2007: (a) - histogram of image brightness values, (б) - color scale for selected brightness steps, (в) - fragment of 1964 image, (г) - the result of its quantization. *Bottom row:* the condition of the slope in the area where the collapse occurred in

2014, based on multitemporal high-resolution images: (д) - 1964 (Key-Hole), (е) - 2009 (GeoEye), and (ж) - 2017 (Pleiades -1A/1B) based on quantization of brightness values (1964) and vegetation index (2009 and 2017): black (1) – water, orange and pink colors (2-4) - no vegetation cover (pink in some areas corresponds to snowfields), green (5-7)- grass and woody vegetation. The contours are the result of a visual interpretation of the 2009 image.

Обсуждение результатов: характер и масштабы склоновых процессов и возможные причины их активизации

Проведенные ранее наблюдения со всей очевидностью показывают, что для бортов долины р. Гейзерной характерно активное развитие гравитационных склоновых процессов [Двигало, Мелекесцев, 2009; Пинегина и др., 2008; Воробьевский и др., 2010 и др.]. Еще на начальных этапах наблюдений в долине (1960-70-е гг.) в ее верховьях исследователи отмечали остатки оползней на берегах реки и следы обрушений обрывистых склонов, о чем свидетельствуют фотографии из архивов В.М. Сугробова и В.Л. Леонова. Многочисленные обвалы видны на обоих бортах долины и хорошо дешифрируются на аэрофотоснимках 1950-1990 гг. [Двигало и др., 2014]. Работами последних лет [Зеркаль и др., 2019] по результатам дистанционного зондирования на внутридолинных склонах в нижнем и среднем течении реки и на прилегающей части Горного плато выделено свыше 650 проявлений активных склоновых процессов – оползней, обвалов, осыпей. Среди них доминируют небольшие оползни течения (360), из которых более 20 впоследствии трансформировались в сели.



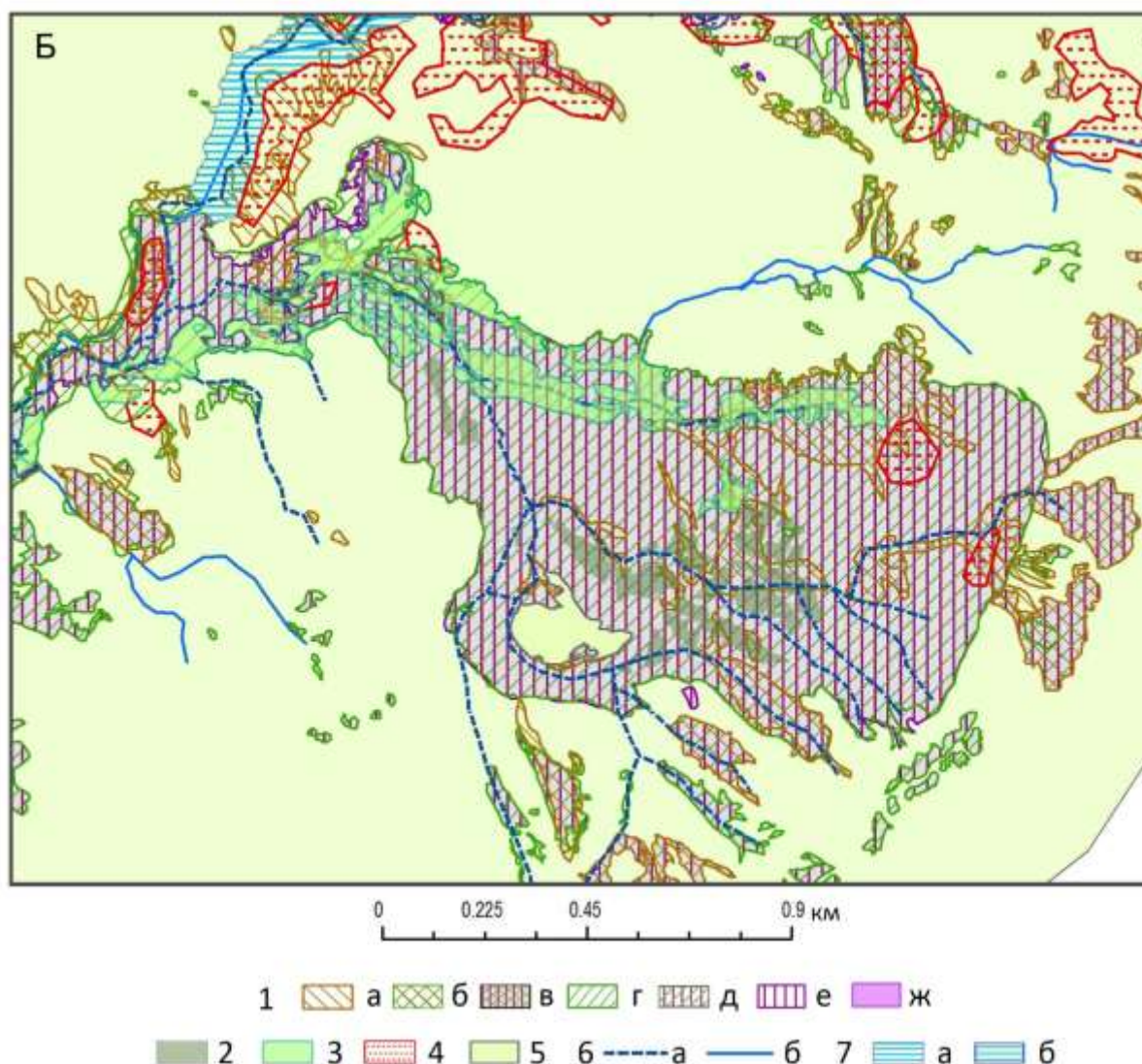


Рис. 5. Карта динамики склоновых процессов в долине р. Гейзерной по результатам дешифрирования разновременных снимков. Ключевые территории: А – Северная, Б – Южная. 1 - участки активизации склоновых процессов (лишенные растительности) на временные срезы: а - 1964г., б - 1964 - 2009гг., в – 1964-2017гг., г - 2009г., д - 2009 - 2017гг., е - 2017 гг., ж - событие 1981г. по [Двигало, Мелекесцев, 2009]; 2 - блоки пород, смещенные с растительностью; 3 - участки, где идет активное восстановление растительности; 4 - термальные поля по результатам вертолетной съемки 2010г. [Kiryukhin et al., 2012]; 5 - участки, покрытые растительностью; 6 - водотоки: а - 1964 г. , б - 2009 г.; 7 - подпрудные водоемы: а - 2009г., б - 2017г.

Fig. 5. Map of the dynamics of slope processes in the valley of the Geysernaya river based on the results of interpretation of multi-temporal images. Key territories: A - North, Б - South. 1 - areas of activation of slope processes (devoid of vegetation) for time slices: а - 1964, б - 1964 - 2009, в - 1964-2017, г - 2009, д - 2009 - 2017, е - 2017, ж - event of 1981. after [Dvigalo and Melekestsev, 2009]; 2 - rock blocks displaced with vegetation; 3 - areas where there is an active restoration of vegetation (overgrowing); 4 - thermal fields based on the results of a helicopter survey in 2010 [Kiryukhin et al., 2012]; 5 - areas covered with vegetation; 6 - watercourses: а - 1964, б - 2009; 7 - dammed lakes: а - 2009, б - 2017.

251

252

253

Но иногда, благодаря экстремальным осадкам или удаленным сейсмическим толчкам [Пинегина и др., 2008; Кугаенко и др., 2007], события на склонах приобретали

катастрофический характер: за последние 40 лет на исследуемой территории произошло три крупных обвала-оползня, сопровождавшихся масштабным селеобразованием: 04.10.1981 г., 03.06.2007 г. и 03–04.01.2014 г., в результате чего только с 2007 по 2014 гг. зафиксировано поступление в днище долины с бортов более 24 млн м³ пород [Двигало, Мелекесцев, 2009; Двигало и др., 2014; Дроздин и др., 2008; Леонов, 2014; Шевченко и др., 2018].

Расчеты, выполненные нами на основе дешифрирования, позволили определить, что 2 последних крупных гравитационных события 2007 и 2014 гг. резко сократили площадь склонов, покрытую растительностью. На участке крупного обвала-оползня 2007 г. – с начальных 70% до 7%, а для обвала 2014 г. – с 60 до 4%. При этом можно заметить, что вокруг сохранившихся небольших участков с растительностью на месте тела оползня 2007 г., начиная с 2013 г. заметно восстановление растительного покрова. Важно отметить, что оба участка с наиболее активным развитием разномасштабных склоновых процессов на протяжении последних 5 десятилетий оказались приурочены к левому борту долины р. Гейзерной.

Северный участок (рис. 5 А) находится в пределах Верхнегейзерного термального поля, которое вытянуто почти на 2 км в виде отдельных пятен по левобережью средней части долины р. Гейзерной и приурочено к выходам лав докальдерного комплекса. Основные термопроявления здесь – это мощные струи насыщенного пара, кипящие или грязевые бессточные котлы. Гидротермально измененные породы на склонах визуальнo выделяются в виде лишенных растительности белесых и желтых пятен на различных высотах над рекой (см. рис. 2). По данным вертолетной съемки 2010г. [Kiryukhin et al., 2012], участки термальных аномалий занимают на анализируемой территории около 0.2 км² (4.7% площади). Площадь отдельных термальных площадок достигает сотен квадратных метров.

На восточном борту подпрудного озера 2014г. на высотных отметках около 700 м н.у.м дешифрируются следы крупного оползня 1981г., имеющего ширину до 120 м и протяженность до 300 м. Тело оползня частично затоплено водами озера. В 2014 г. обрушение края лавового плато у сопки Желтой (ниже по течению реки) вызвало мощный оползень-обвал [Леонов, 2014], объем которого достиг 2.85 млн м³. Днище долины р. Гейзерной оказалось перекрыто фронтальной частью обвалившейся массы на протяжении почти 700 м, максимальная мощность отложений над руслом составила 22 м [Шевченко и др, 2018]. Тело обвала состоит преимущественно из глыб лав размером до нескольких метров по длинной оси. Обвальная масса врезалась в правый борт долины, лишив его растительности в нижней части, что привело к активизации там в последующие годы осыпных процессов (см. рис. 2).

На Северном участке доля территории со следами активизации процессов рельефообразования с 1964 г. выросла с 20.9 до 30.2%. И если за первые 45 лет (1964-2009 гг.) ее прирост составил всего 2.4%, то за последующие 8 лет, благодаря масштабному событию 2014г., – уже почти на 17%. Восстановление растительного покрова на данной территории идет весьма слабо, что, в том числе связано вероятно и со значительными абсолютными отметками верхних частей склонов (более 800 м над у.м.).

На Южном участке (рис. 5 Б), который находится в пределах Гейзерного термального поля, доминируют выходы литифицированных вулканогенно-озерных отложений гейзерной пачки. Здесь на ЮВ борту долины отчетливо видны следы обвала-оползня 2007 г., который накрыл большую часть бассейна ручья Водопадного и распространился вниз по долине р. Гейзерной. До оползня в долине ручья происходила активная разгрузка высокотемпературных подземных вод в виде горячих источников и гейзеров, отмечались выходы пара, прогретые участки грунта. Гидротермальная деятельность на участке оползневого тела продолжается и в настоящее время: некоторые озера на его поверхности заполнены теплой водой, о чем свидетельствуют результаты термальной съемки 2021г.

По расчетам сотрудников ИВиС, объем перемещенных здесь в 2007г. пород достиг 21 млн м³ [Шевченко и др., 2018]. На этом участке доля территории со следами активизации процессов рельефообразования к 2009 г. увеличилась с 12 (0.6 км) до 32 % (1.6 км²), но затем началась постепенная стабилизация процессов и зарастание обвально-оползня, и к 2017 г. площадь лишенной растительности поверхности сократилась до 30%. Растительность восстановилась примерно на площади 0.21 км², чему вероятно способствовало наличие уцелевших холмов-останцов и блоков, смещенных в 2007 г. прямо с растительностью (общая их площадь около 0.063 км²).

В целом, по результатам проведенного дешифрирования и полевых работ можно заключить, что в верхних частях склонов левобережной части долины р. Гейзерной доминируют отседание краев вулканического плато с формированием протяженных трещин, обвалы, осыпи, а в средней части склонов - оползни, осыпи на активно подрезаемых водотоками крутосклонных участках, в местах повышенного увлажнения и развития гидротермально измененных пород – оползни-сплывы. В нижних участках склонов как правого, так и левого бортов преобладают комплексные, реже блоковые оползни. По долинам притоков р. Гейзерной отмечены следы неоднократного формирования селей.

Формированию всех масштабных смещений на склонах долины предшествовало образование трещин отседания. Ширина трещин, наблюдаемых в настоящее время в ее верховьях, достигает 1-4 м, а их протяженность - десятков метров. Это казалось бы вполне закономерно для бортов большинства глубоких врезов, но в рассматриваемых случаях о связи формирования трещин с гидротермальной деятельностью свидетельствовали наблюдавшиеся ранее [Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009] участки парения грунта в их пределах. Формирующиеся обвальные стенки на бортах р.Гейзерной достигают значительной протяженности и высоты. Так, в 2007 г. на левом борту долины образовался амфитеатр обрушения до 800 м длиной с почти вертикальной стенкой высотой около 150 м, а в 2014г. – стенка срыва высотой до 200м и протяженностью около полукилометра.

Интересно отметить, что на правобережье реки такого активного распространения масштабных склоновых процессов в настоящее время не наблюдается. Судя по результатам дешифрирования, здесь на склонах южной экспозиции, даже в верхних, очевидно более сухих их частях преобладают оползни-сплывы, оползни течения, часть из которых затем трансформируется в сели. Для них типичны узкие, вытянутые по склону контуры, которые нередко спускаются непосредственно в долины небольших водотоков и прослеживаются вдоль их днищ. Они отличаются специфическим “струйчатым” рисунком поверхности, свидетельствующим о жидкой консистенции перемещаемого материала. По данным [Зеркаль и др., 2019], аналогичные формы прослеживаются и на слабонаклонной на юг поверхности вулканического плато на левобережье р. Гейзерной. Это позволяет заключить о влиянии экспозиции на распределение склоновых процессов территории, выражающемся в более активной роли сезонных мерзлотных процессов, снеготаяния, солифлюкции на склонах, обращенных на юг.

Активизация склоновых процессов в речных долинах обычно происходит в результате как экзогенных (выпадение ливневых осадков, снеготаяние, эрозия), так и эндогенных (сейсмических, реже вулканических) процессов. Исследователи долины р. Гейзерной [Пинегина и др., 2008; Кугаенко и др., 2007, 2010; Kiryukhin et al., 2012; и др.] к причинам активизации смещений на склонах наряду с вышеперечисленными факторами относят также наличие отмерших термальных площадок, субвертикальных разрывных нарушений, мерзлотные процессы, а к возможным триггерам – резкие выбросы (“взрывы”) прогретого пара. Действительно, в долинах геотермальных зон наблюдаются весьма специфические процессы, обусловленные выходами термальных вод и пара, которые, наряду с повышенным увлажнением склонов, приводят к активному

выветриванию пород и трансформации их свойств, способствуют формированию трещин отседания [Лебедева, 2021; Lebedeva, Zharkov, 2021].

В связи с повышенной температурой, преобразование пород на геотермальных участках протекает в течение всего года. Исследованиями [Фролова и др., 2011, 2015, 2019] установлено, что под влиянием сильно минерализованных термальных вод вулканическое стекло в дацитовых туфах на склонах долины р. Гейзерной (впрочем, как и в иных геотермальных зонах Курило-Камчатского региона) замещается глинистыми минералами и цеолитами. При этом происходит снижение плотности породы практически вдвое и возрастает ее пористость, что приводит к резкому уменьшению сцепления.

Распространение гидротермальных глин и наличие выходов газогидротерм благоприятствуют образованию на склонах долин многочисленных смещений, в результате чего формируются локальные разноуровневые оползневые и блоково-гравитационные террасы. В некоторых случаях можно наблюдать несколько ярусов подобных террас. На таких участках происходит постепенное значительное расширение долин за счет активного выколаживания склонов, как мы можем это видеть в нижнем по течению участке долины р. Гейзерной. При этом в днище идет накопление смещенного в результате оползней и обвалов склонового материала с периодическим образованием временных плотин и подпрудных водоемов. Кроме того, многие крупные оползни формируют при смещении так называемые детрузивные валы (валы выпирания), подобные своеобразные удлиненные холмы также хорошо дешифрируются в долине.

Проведенное нами дешифрирование показало, что участки наиболее активных смещений на склонах на протяжении последних пяти десятилетий сосредоточены преимущественно на левобережье долины. Нельзя исключить, что такая локализация мест активизации современных склоновых процессов связана не только с положением разломов, которые трассируются по местам газогидротермальных проявлений [Kiryukhin et al., 2012], но и с зафиксированным по данным интерферометрии [Lundgren, Lu, 2006] современным поднятием левобережья р. Гейзерной в ее среднем-верхнем течении, амплитуда которого за 2000-2003 гг. достигла 15 см. Исследователи региона связывают это поднятие с наличием там активного магматического резервуара [Кугаенко и др., 2007; Kiryukhin, 2016]. Надеемся, что продолжение исследований позволит более аргументированно ответить на этот вопрос.

Заключение

Проведенное нами дешифрирование снимков, охватывающих временной интервал более пяти десятилетий, показало, что сочетание визуального дешифрирования исходных снимков и результатов их цифровой обработки позволяет хорошо разделить участки, покрытые растительностью разного типа и открытые обнажения горных пород, отчасти даже нивелируя различия в освещенности склонов разной экспозиции. Результаты дешифрирования подтверждаются также полевыми исследованиями и съемкой с БПЛА. Все это позволило выявить участки наиболее активного развития современных склоновых процессов и в первом приближении оценить их динамику.

На составленных картах нами были выделены границы лишенных растительности участков активизации склоновых процессов на три временных среза (1964, 2009 и 2017 гг.). Установлено, что с 1964 по 2017 г. доля территории со следами активизации процессов рельефообразования на Северном участке выросла с 20.9 до 30.2%. На Южном участке доля территории со следами активизации процессов рельефообразования к 2009 г. увеличилась с 12 до 32 %, но затем началась постепенная стабилизация процессов и зарастание тела обвала-оползня 2007 г., и к 2017 г. площадь лишенной растительности поверхности сократилась до 30%. Были выделены территории, где активность склоновых процессов сохранялась на протяжении различных временных интервалов - 1964-2009,

1964-2017 гг. и 2009-2017 гг. В дальнейшем это позволит нам определить и количественные параметры динамики процессов.

Очевидно, что наряду с продолжающимся углублением долины р. Гейзерной, на современном этапе она расширяется, на ее бортах продолжают формироваться масштабные смещения и многочисленные террасовидные поверхности, имеющие в основном оползневой генезис. Проведенные исследования позволяют заключить, что активное проявление гравитационных процессов на склонах долин геотермальных зон является одним из главных факторов их развития и во многом обуславливает морфологию их бортов и днища.

В целом, рассмотренная ситуация оказывается весьма сложной: помимо общеизвестных триггеров, таких как ливневые осадки и землетрясения, в данном районе очевидно влияние на смещение материала на склонах спектра эндогенных процессов.

Список литературы

Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике/ Ред. Завадская А.В. М.: КРАСАНД, 2015. 88 с.

Воробьевский И.Б., Дрознин В.А., Фролова Н.Л., Чижова В.П. Гидрологические и рекреационные последствия катастрофического селя в Долине гейзеров (Камчатка). Вестник Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 2. С. 46–52

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.

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: Мат-лы III Межд. конф. Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал Дальневост. геол. ин-та ДВО РАН, 2014. С. 105–108.

Дрознин В. А., Двигало В. Н., Муравьев Я. Д. Оползень 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров на Камчатке // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды II Межд. конф. Пятигорск, 2008. С. 41-44.

Жуковский М. О. Использование данных спутников CORONA в археологических исследованиях // Краткие сообщения Института археологии. 2012. Т. 226. С. 45–54.

Завадская А.В., Лебедева Е.В., Чижова В.П. Механизмы регулирования туристских потоков в долине Гейзеров (Камчатка)// Вестник Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 5. С. 63-77.

Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В. Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной / / Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тезисы докл. III Всерос. научн конф. с межд. участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 138 .

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Коновалова А.А. Локальная сейсмичность района Долины гейзеров по данным полевых наблюдений 2008-2009 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. № 15. С. 90–99.

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.

Лебедева Е.В. Цепочки катастрофических геоморфологических процессов в речных долинах вулканических регионов // Геоморфология. 2018. № 4. С. 36-52.

Лебедева Е.В. Виды воздействия вулканической и поствулканической деятельности на флювиальный рельеф // Геоморфология. 2019. № 4. С. 49-66.

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.
- 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. 81-100.
- Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чиждова В.П., Завадская А.В.* Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования// Геоморфология. 2020. № 2. С. 60-73. DOI: 10.31857/S0435428120020066.
- Леонов В. Л.* Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров, Камчатка// Тр. региональной научно-технич. конф. “Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего востока России” Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. Т.1 С. 91-95.
- 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.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карнов Г.А., Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Зубин М.И.* Кальдера Узон и Долина Гейзеров /Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. II. С. 94-141.
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А., Калачева Е.Г., Чирков С.А., Мелекесцев 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.
- Сугробов В.М., Сугробова Н.Г.* Особенности разгрузки высокотемпературных подземных вод в Долине Гейзеров// Вопр. географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 1990. Вып. 10. С. 81-89.
- Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дрознин В.А., Карнов Г.А., Леонов В.Л.* Жемчужина Камчатки - Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
- Устинова Т.И.* Камчатские гейзеры. М.: Географгиз, 1955. 120 с.
- Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н.* Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов// Инженерная геология. 2011. № 3. С.40-54.
- Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П.* Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины гейзеров (полуостров Камчатка)// Инженерная геология. 2015. № 6. С.30-42.
- Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Гвоздева И.П.* Влияние гидротермальных преобразований на физико-механические свойства туфогенных пород Долины гейзеров и их роль в формировании оползней / Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тезисы докл. III Всерос. научн конф. с межд. участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 186.
- Шевченко А.В., Двигало В.Н., Свирид И.Ю.* Дистанционные исследования геоморфологических процессов на вулканических объектах Камчатки// XXXVI Пленум ГК РАН: Всерос. научн.-практич. конф. с межд. участием “Геоморфология - наука XXI века”. Барнаул: Изд-во АГУ, 2018. С.403-410.
- Kiryukhin A.V.* Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia)// Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2016. Vol. 323. P. 129-147.
- Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K.* Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // Applied Geochemistry. 2012. Vol. 27. P. 1753–1766. doi:10.1016/j.apgeochem.2012.02.011
- Lebedeva E.V., Zharkov R.V.* Accumulative landforms in valleys with gas-hydrothermal manifestations of the Kuril-Kamchatka region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 946. No. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012028

510 *Lundgren P., Lu Zh.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite
511 radar interferometry observations// Geophysical research letters. 2006. Vol. 33. L06301.
512 doi:10.1029/2005GL025181

513 **USE OF MULTI-TEMPORAL IMAGES TO ANALYZE THE SLOPE**
514 **PROCESSES IN THE GEYSERNAYA RIVER VALLEY (KAMCHATKA)**
515

516 The interpretation of high spatial resolution satellite images (0.5-3 m) of three time slices - 1964,
517 2009 and 2017 allowed to identify the areas of activation of modern processes of relief
518 formation. The results of the images interpretation were outlines of outcrops, identified by visual
519 analysis of multi-temporal images, by brightness quantization for the panchromatic image of
520 1964 and calculation of the vegetation index using multispectral images of the last two survey
521 dates. This work showed that the combination of visual interpretation of the original images and
522 the results of their digital processing makes it possible to distinguish areas covered by vegetation
523 of different types and open rock outcrops in the best way, partly even leveling out the differences
524 in illumination of slopes of different steepness. The results were compared with the thermal
525 survey data and verified in the course of geomorphological field studies and UAV surveys.

526 The methodology for mapping the dynamics of slope processes based on the interpretation of
527 multi-temporal images over a time interval of more than 50 years was tested in two key areas
528 characterized by diverse and different-scale manifestations of exogenous processes. Calculations
529 made on the basis of the interpretation results made it possible to determine that the last two
530 large landslides in 2007 and 2014 sharply reduced the area covered by vegetation: from 70% to
531 7% and from 60% to 4%, respectively. It was found that in the Northern key site, the proportion
532 of the area with traces of slope processes activation for 53 years increased from 20.9 to 30.2%, in
533 the Southern site it increased from 12 to 30%. Analysis of spatial and temporal distribution of
534 areas of slope processes activation showed that in addition to commonly known triggers, such as
535 heavy rainfall and earthquakes, the influence of the spectrum of endogenous processes on the
536 displacement of material on the slopes is obvious in this area.

537 **Keywords:** high resolution space images, image interpretation, digital image processing,
538 landslides, rockslides, gas-hydrothermal manifestations
539

REFERENCES

- Atlas doliny reki Geyzernoy v Kronotskom zapovednike (Atlas of the valley of the River Geyzernaya in Kronotsky Reserve)*. A.V. Zavadskaya (Ed.). M.: KRASAND, 2015. 88 p. (in Russ.)
- Vorob'evsky I. B., Droznin V. A., Frolova N. L., and Chizhova V. P. Hydrological and recreational consequences of catastrophic mudflow in the Valley of Geysers (Kamchatka). *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya* (Bulletin of Moscow Univ. Series 5. Geography). 2010. No. 2. P. 46-52 (in Russ.).
- Dvigalo V.N., and Melekestsev I.V. Geological and geomorphological consequences of catastrophic rockfall and rockfall – landslides processes in the Kamchatka Valley of Geysers (according to aerial photogrammetry). *Vulkanologiya i seismologiya* (Volcanology and Seismology). 2009. No. 5. P. 24–37 (in Russ.).
- Dvigalo V.N., Svirid I.Yu., Shevchenko A.V., and Zharkov R.V. Monitoring and forecasting of mudflow processes in the Kamchatka Valley of Geysers based on photogrammetric studies. *Selevyye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita: Mat-ly III Mezhd. konf.* (Mudflows: disasters, risk, forecast, protection: Materials III Int. conf.). Yuzhno-Sakhalinsk: Sahal. Phil. Far East. Geol. Institute of FEB RAS, 2014. P. 105–108 (in Russ.).
- Droznin V. A., Dvigalo V. N., and Muravyov Y. D. Landslide June 3, 2007 in the Valley of Geysers in Kamchatka . *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Selevyye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita"* (Proceedings of the International Conference "Mudflows: Disasters, Risk, Forecast, Protection"). Pyatigorsk, 2008. P. 41-44 (in Russ.).
- Zhukovsky M.O. Use of CORONA satellite data in archaeological research. *Kratkie soobshcheniya Instituta Arheologii* (Brief communications of the Institute of Archeology). 2012. Vol. 226. P. 45–54. (In Russ.).
- Zavadskaya A.V., Lebedeva E.V., and Chizhova V.P. Mechanisms of tourist flows regulation in the Valley of Geysers (Kamchatka). *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya* (Bulletin of Moscow Univ. Series 5. Geography). 2021. No. 5. P. 63-77.
- Zerkal' O.V., Gvozdeva I.P., and Frolova Yu.V. The development of landslide processes in the valley of the river Geyzernaya. *Geodinamicheskiye protsessy i prirodnnyye katastrofy: tezisy dokladov III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* (Geodynamical Processes and Natural Hazards: abstracts of the III National scientific conference with foreign participants). Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, 2019. P. 138. (in Russ.).
- Kugayenko Yu.A., Saltykov V.A., and Konovalov A.A. Local seismicity of the area of the Valley of Geysers according to field observations in 2008-2009. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2010. No. 1. Is. 15. P. 90 - 99 (in Russ.).
- Kugayenko Yu.A., Saltykov V.A., and Sinitsyn V.I. Seismic observations in the Valley of Geysers. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2007. No. 2. Is. 10. P.171–172 (in Russ.).
- Lebedeva E.V. Sequences of catastrophic geomorphic processes in the river valleys of volcanic regions. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2018. No. 4. P. 36–52. (in Russ.).
- Lebedeva E.V. Kinds of impacts of volcanic and post volcanic activity on fluvial relief/ *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 4. P. 49-66 (in Russ.).
- Lebedeva E.V. Influence of gas-hydrothermal activity on the formation of the relief of river valleys of geothermal zones. *Puti evolyutsionnoy geografii - 2021: Mat-ly II Vseros. Nauchn.konf., posvyashch. pamyati prof. A.A.Velichko* (Ways of evolutionary geography - 2021: Materials of the II All-Russian. Scientific conf., dedicated. memory of prof. A.A. Velichko). M.: IG RAN, 2021. P. 185-190. (in Russ.).
- Lebedeva E.V. and Zharkov R.V. Accumulative landforms in valleys with gas-hydrothermal manifestations (the Kuril-Kamchatka region as an example). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2022. Vol. 53. No. 1. P. 81-100 (in Russ.).
- Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., and Zavadskaya A.V. The valley of the river Geyzernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming.

- Geomorfologiya* (Geomorphology RAS). 2020. No. 2. P. 60-73. (in Russ.) DOI: 10.31857/S0435428120020066
- Leonov V. L. Geological preconditions and the possibility of forecasting a landslide that took place on June 3, 2007 in the Valley of Geysers, Kamchatka. *Tr. regional'noy nauchno-tekhnich. konf. "Geofizicheskiy monitoring i problemy seysmicheskoy bezopasnosti Dal'nego vostoka Rossii"* (Tr. regional scientific and technical. conf. "Geophysical monitoring and problems of seismic safety in the Far East of Russia"). Petropavlovsk-Kamchatsky: KB GS RAS, 2008. Vol. 1. P. 91-95. (in Russ.).
- Leonov V.L. The collapse and landslide that occurred on January 4, 2014 in the Valley of Geysers, Kamchatka, and their consequences. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2014. No. 1. Is. 23. P. 7-20 (in Russ.)
- Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A., Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., and Zubin M.I. Caldera Uzon and the Valley of Geysers. *Deystvuyushchiye vulkany Kamchatki* (Active volcanoes of Kamchatka). Moscow: Nauka, 1991. Vol. II. C. 94-141 (in Russ.)
- Pinegina T.K., Delemen' I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Leonov V.L., and Seliverstov N.I. Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007. *Vestnik DVO RAN*. 2008. No. 1. P. 33-44. (in Russ.).
- Sugrobov V.M., and Sugrobova N.G. Peculiarities of discharge of hightemperatured underground waters in the Valley of the Geysers. *Voprosy geografii Kamchatki* (Kamchatka geography issues). Petropavlovsk-Kamchatsky, 1990. Pp. 81–89 (in Russ.).
- Sugrobov V. M., Sugrobova N. G., Droznin V. A., Karpov G. A., and Leonov V. L. *Zhemchuzhina Kamchatki - Dolina Geyzerov. Nauchno-populyarnyy ocherk, putevoditel'* (The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular science essay, guide). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2009. 108 p. (in Russ.).
- Ustinova T.I. *Kamchatskiye geyzery* (Kamchatka geysers). Moscow: Geografiz, 1955. 120 p. (in Russ.).
- Frolova Yu.V., Ladygin V.M., and Rychagov S.N. Engineering-geological features of hydrothermal-metasomatic rocks of Kamchatka and the Kuril Islands. *Inzhenernaya geologiya* (Engineering geology). 2011. No 3. P.40-54. (in Russ.)
- Frolova Yu.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., and Kuznetsov N.P. Geotechnical aspects of hydrothermal transformations of tuffaceous rocks of the Valley of Geysers (Kamchatka Peninsula). *Inzhenernaya geologiya* (Engineering geology). 2015. No 6. P.30-42. (in Russ.)
- Frolova Yu.V., Zerkal' O.V., Gvozdeva I.P. The influence of hydrothermal transformations on the physicomechanical properties of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers and their role in the formation of landslides. *Geodinamicheskiye protsessy i prirodnyye katastrofy: tezisy dokladov III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* (Geodynamical Processes and Natural Hazards: abstracts of the III National scientific conference with foreign participants). Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, 2019. P. 186. (in Russ.).
- Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., and Svirid I.Yu. Remote Studies of Geomorphological Processes at Volcanic Objects of Kamchatka. *XXXVI Plenum Geomorfologicheskoi komissii RAN: Vseros. nauchno-praktich. konf. s mezhd. uchastiyem «Geomorfologiya - nauka XXI veka»* (XXXVI Plenum of the Geomorphological Commission of Russian Academy of Sciences: All-Russian. scientific and practical conf. with int. participation "Geomorphology - the science of the XXI century"). Barnaul: ASU Publishing House, 2018. P. 403-410. (in Russ.).
- Kiryukhin A.V. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2016. Vol. 323. P. 129-147.
- Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., and Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant

643 Landslide. *Applied Geochemistry*. 2012. Vol. 27. P. 1753–1766.
644 doi:10.1016/j.apgeochem.2012.02.011
645 Lebedeva E.V., and Zharkov R.V. Accumulative landforms in valleys with gas-
646 hydrothermal manifestations of the Kuril-Kamchatka region. *IOP Conference Series: Earth and*
647 *Environmental Science*. 2021. Vol. 946. No. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012028
648 Lundgren P., and Lu Zh. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by
649 satellite radar interferometry observations. *Geophysical research letters*. 2006. Vol. 33. L06301.
650 doi:10.1029/2005GL025181