ГЕОМОРФОЛОГИЯ, 2022, том 53, № 4, с. 3–16

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.435.6:551.432.7(571.66)

СКЛОНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДОЛИНЕ р. ГЕЙЗЕРНОЙ (КАМЧАТКА): РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАЗНОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Е. В. Лебедева[1,*], Е. А. Балдина[2,], А. А. Медведев[1,***]**

[1]*Институт географии РАН, Москва, Россия*

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*

**E-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com*

***E-mail: baldina@geogr.msu.ru*

****E-mail: a.a.medvedeff@gmail.com*

Поступила в редакцию 20.03.2022 г.
После доработки 16.04.2022 г.
Принята к публикации 15.07.2022 г.

На основе дешифрирования космических снимков высокого пространственного разрешения (0.5–3 м) трех временных срезов – 1964, 2009 и 2017 г. – выявлены участки активизации современных склоновых процессов. В результате дешифрирования составлены карты, на которых показаны 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 г. 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: дешифрирование, цифровая обработка снимков, оползни, обвалы, газогидротермальные проявления

DOI: 10.31857/S0435428122040095

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 рельефообразования на бортах долин геотермальных зон практически не проводилась. Исключением является, пожалуй, лишь работа сотрудников геологического факультета МГУ (Зеркаль и др., 2019; Фролова 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 (Кугаенко и др., 2007, 2010; Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; 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 полевых наблюдений и по материалам дешифрирования разновременных снимков за максимально возможный временной интервал. Проведенное исследование, 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 км^2 (Воробьевский и др., 2010). Продольный профиль ступенчатый, невыработанный; глубина вреза в приустьевой части превышает 400 м, ширина долины достигает 3.5 км. Склоны крутые (20°–40°), на многих участках ступенчатые.

Долина р. Гейзерной расположена в восточной части Узон-Гейзерной вулкано-тектонической 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 (Q_3^{1-3}), 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, а также по обоим бортам нижнего участка долины выходят заполняющие кальдеру слабо литифицированные вулканогенно-озерные отложения позднего плейстоцена – туфы, туфопесчаники, туфогравелиты с линзами брекчий (Q_3^4). В бассейне р. Гейзерной выделяется пять водоносных комплексов. Первые четыре из них представляют собой горизонты холодных грунтовых вод, а пятый – самый глубокий – это высоко-

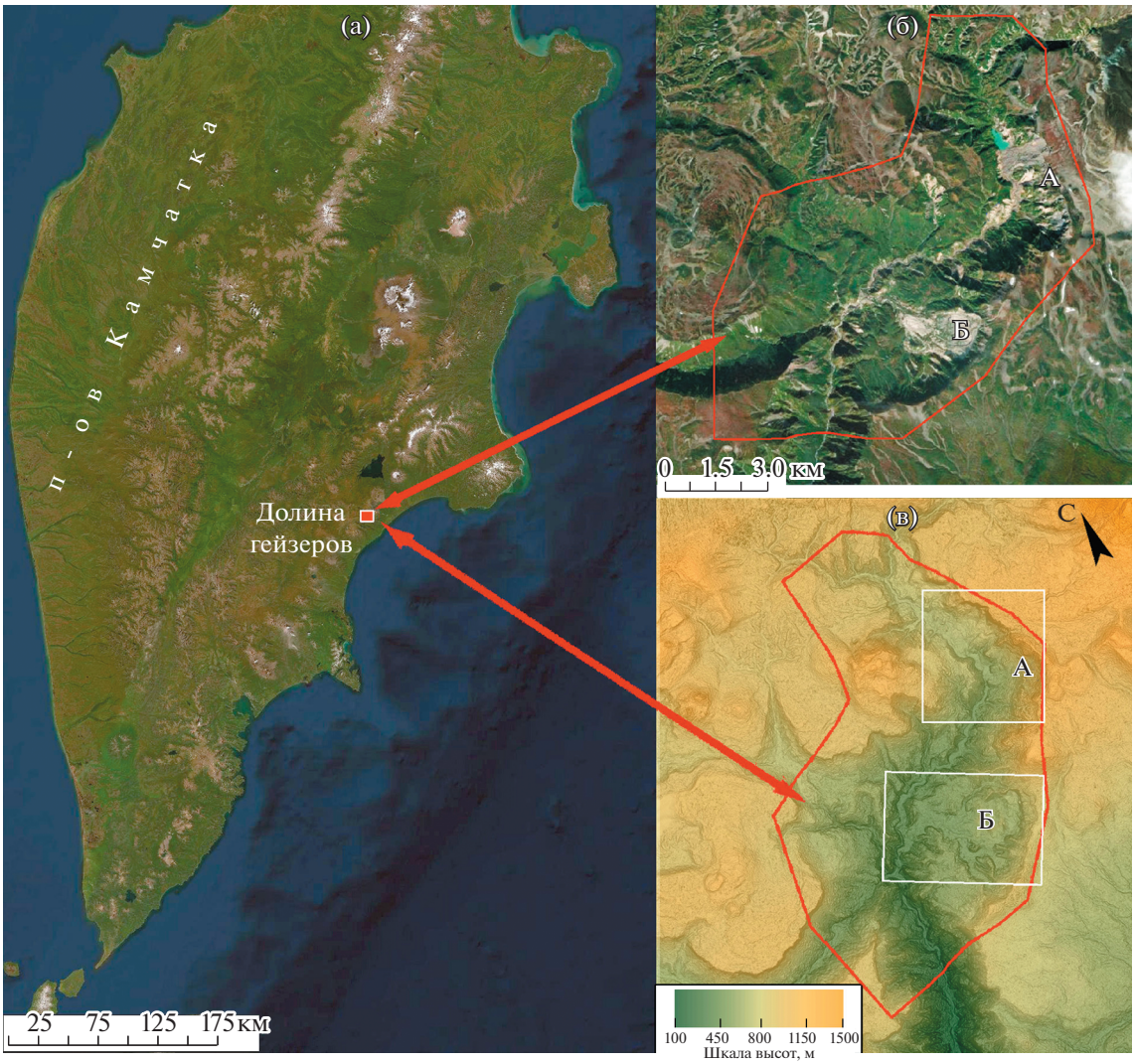

Рис. 1. Положение района исследований (граница показана красной линией) и ключевые территории, на которых проводилась апробация методики дешифрирования: А – Северный участок, Б – Южный участок. (а) и (б) – снимки ESRI World Imagery, (в) – фрагмент ЦМР Arctic DEM.

Fig. 1. Location of the study area (the boundary is shown by the red line) and key areas where the interpretation technique was tested: А – Northern section, Б – Southern section. (а) and (б) – ESRI World Imagery, (в) – Arctic DEM fragment.

температурные 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.

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 историческом 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 KeyHole-4 (серия спутников 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 г. 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 использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM с разрешением 2 м (рис. 1).

Все источники пространственных данных были объединены в ГИС-проект, где была обеспечена возможность одновременного анализа различных материалов и выполнена привязка архивных снимков Key-Hole 1964 г. к снимкам высокого разрешения за 2009 и 2017 г. 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 термальной съемки 2010 г. (Kiryukhin et al., 2012).

Для интерпретации данных использовались материалы полевых обследований местности 2020–2021 гг. – аэровизуальных и пеших маршрутных наблюдений, а также съемки территории с БПЛА DJI Phantom 4 (рис. 2). Съемка с БПЛА с учетом сложного рельефа местности производилась с нескольких высотных эшелонов. Основным был эшелон 400 м, дополнительными для съемки днища долины – 200 и 300 м.

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 (2017 г.) 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 г.

Дешифрирование архивного панхроматического снимка со спутника Key-Hole (1964 г.). Доступный одиночный снимок 1964 г. характеризуется существенными геометрическими искажениями, обусловленными как свойствами камеры, так и наклоном оси при съемке (Жуковский, 2012), которые усилены глубоким расчленением рельефа территории. Хорошо известно, что растительный покров на черно-белых снимках изображается более темным фототоном, 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 перелетовывающие 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, нерастаявших снежников и растительного покрова осуществляется более достоверно благодаря высокому пространственному, радиометрическому и спектральному разрешению, что обеспечивает уверенное разделение объектов и проведение гра-

Рис. 2. Использование снимков с БПЛА (съемка А.А. Медведева, 2021 г.) для анализа склоновых процессов. (а) – Перспективный снимок вверх по долине р. Гейзерной в ее среднем течении. На переднем плане по центру – обвальная плотина и подпрудное озеро 2014 г., следы оползня 1981 г. (белая стрелка). Справа – стенка срыва оползня-обвала 2014 г. и обломочный материал у ее подножия, слева – обнаженные склоны правобережья реки в месте удара обвальной массы. Белые пятна на переднем плане – участки гидротермально измененных пород, черные стрелки указывают на выходы парогазовых струй. (б) – Фронтальный снимок стенки срыва оползня-обвала 2014 г. с выходами лав. Эллипсовидным контуром обозначен участок сохранившегося фрагмента трещины отседания, по которой произошло смещение. Прямоугольниками отмечены участки гидротермально измененных пород, кружочками – выходы термальных вод.

Fig. 2. Using images from UAVs (survey by A.A. Medvedev, 2021) to analyze slope processes. (a) – Perspective image up the Geysernaya River valley in its middle course. 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 right – the wall of the landslide-rockfall collapse of 2014 and colluvium at its foot; on the left – the exposed slopes of the right bank of the river at the site of the impact of the landslide mass. White spots in the foreground are areas of hydrothermally altered rocks, black arrows indicate steam-gas jets of thermal manifestations. (б) – Frontal image of the landslide-rockfall collapse of 2014 with lava outlets. The elliptical contour marks the area of the preserved fragment of the detachment crack, along which the displacement occurred. Rectangles mark areas of hydrothermally altered rocks, circles indicate outflows of thermal waters.

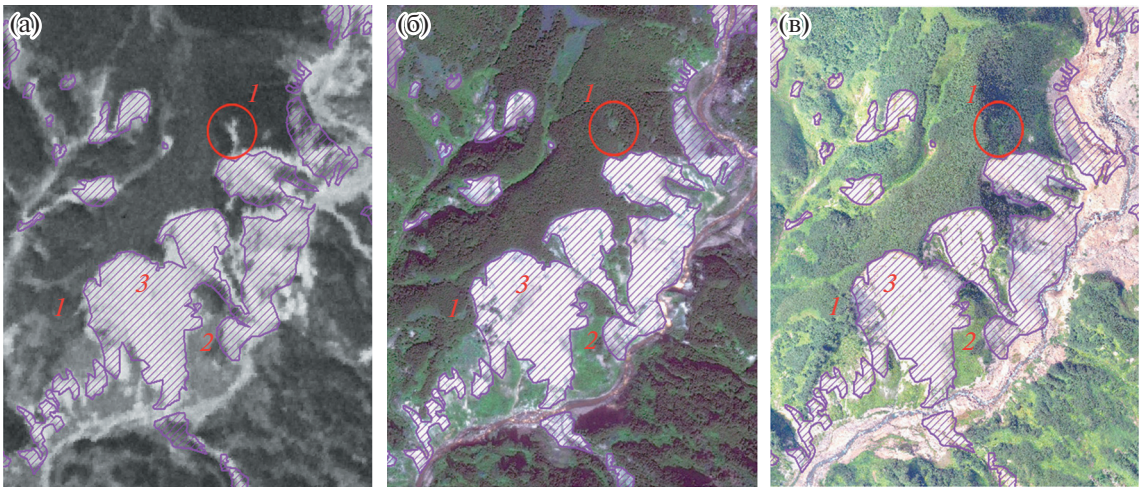

Рис. 3. Участок долины р. Гейзерной на снимках трех сроков с выделенными по снимку 2009 г. контурами обнажений: (а) – спутник Key-Hole, 1964 г., (б) – GeoEye, 2009 г., (в) – ортофотоплан по БПЛА-съемке, 2021 г. *Цифрами обозначены: 1* – плотная древесная растительность, *2* – травянистая растительность, *3* – обнажения горных пород. Кружком 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: (a) – Key-Hole satellite, 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.

ниц 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 (7) – наиболее густая растительность до ярко-розового (2) – полное отсутствие растительного покрова, т.е. обнажения или снег (рис. 4). Для аналогичного разделения обнажений и покрытых растительностью участков по более современным многозональным снимкам 2009 и 2017 г. эффективнее оказалось использовать значение нормализованного разностного вегетационного индекса – NDVI (отношение разности яркостей в ближнем инфракрасном и красном каналах к их сумме).

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 были разработаны легенда и методика создания карты динамики склоновых процессов на временном отрезке более 50 лет (рис. 5). 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 и 5.0 км^2, расположены они в среднем и нижнем течении р. Гейзерной на ее левобережье. Результатом дешифрирования явились схемы, на которых выделены контуры участков обнажений для каждого из трех временных срезов (рис. 5 (а, б)), сравнительный анализ которых позволил показать как неизменность состояний отдельных участков во все три срока, так и различия в их состоянии в два или в один срок (рис. 5 (в)). 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 доля термальных полей с разреженной травяно-моховой растительностью либо вовсе ее лишенных на изученных участках колеблется в пределах 4.7–6% от общей площади.

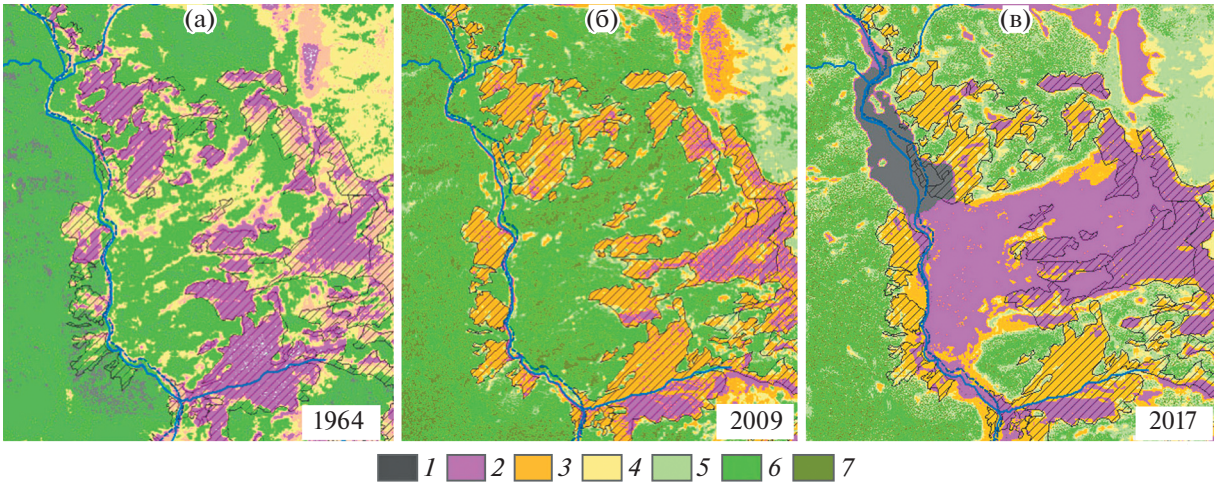

Рис. 4. Изменение состояния склона на участке, где произошел оползень-обвал в 2014 г. (см. рис. 2), по результатам цифровой обработки разновременных космических снимков: (а) – квантования значений яркости (1964 г., Key-Hole) и вегетационного индекса, (б) – 2009 г., GeoEye, (в) – 2017 г., Pleiades -1A/1B. *Выделенные ступени яркости и значений вегетационного индекса: 1* – водная поверхность и глубокие тени, отсутствие растительного покрова, *2* – наиболее яркие обнажения и снежники, *3–4* – более темные или менее освещенные обнажения, *5–7* – травянистая и древесная растительность разной плотности. Заштрихованные контуры – обнажения, выделенные по результатам визуального дешифрирования снимка 2009 г.

Fig. 4. Changes in the condition of the slope in the area where the collapse occurred in 2014 (see Fig. 2), according to digital processing of satellite images by quantization of brightness values ((а) – 1964, Key-Hole) and vegetation index ((б) – 2009, GeoEye; (в) – 2017, Pleiades -1A/1B). *Painted brightness levels and vegetation index values: 1* – water surface and deep shadows, no vegetation cover, *2* – brightest outcrops and snowfields, *3–4* – darker or less illuminated outcrops, *5–7* – herbaceous and tree vegetation of different density. Hatched contours are the result of 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 (Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Воробьевский и др., 2010 и др.). Еще на начальных этапах наблюдений в долине (1960–1970 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 прилежащей части Горного плато выделено свыше 650 следов как современных, так и древних проявлений склоновых процессов – оползней, обвалов, осыпей. Среди них доминируют небольшие оползни течения (360), из которых более 20 впоследствии трансформировались в сели.

Но иногда, благодаря экстремальным осадкам или удаленным сейсмическим толчкам (Кугаенко и др., 2007; Пинегина и др., 2008), 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 г. зафиксировано поступление в днище долины с бортов более 24 млн м^3 пород (Дрознин и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Двигало и др., 2014; Леонов, 2014; Шевченко и др., 2018).

Расчеты, выполненные нами на основе дешифрирования, позволили определить, что 2 последних крупных гравитационных события 2007 и 2014 г. 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.

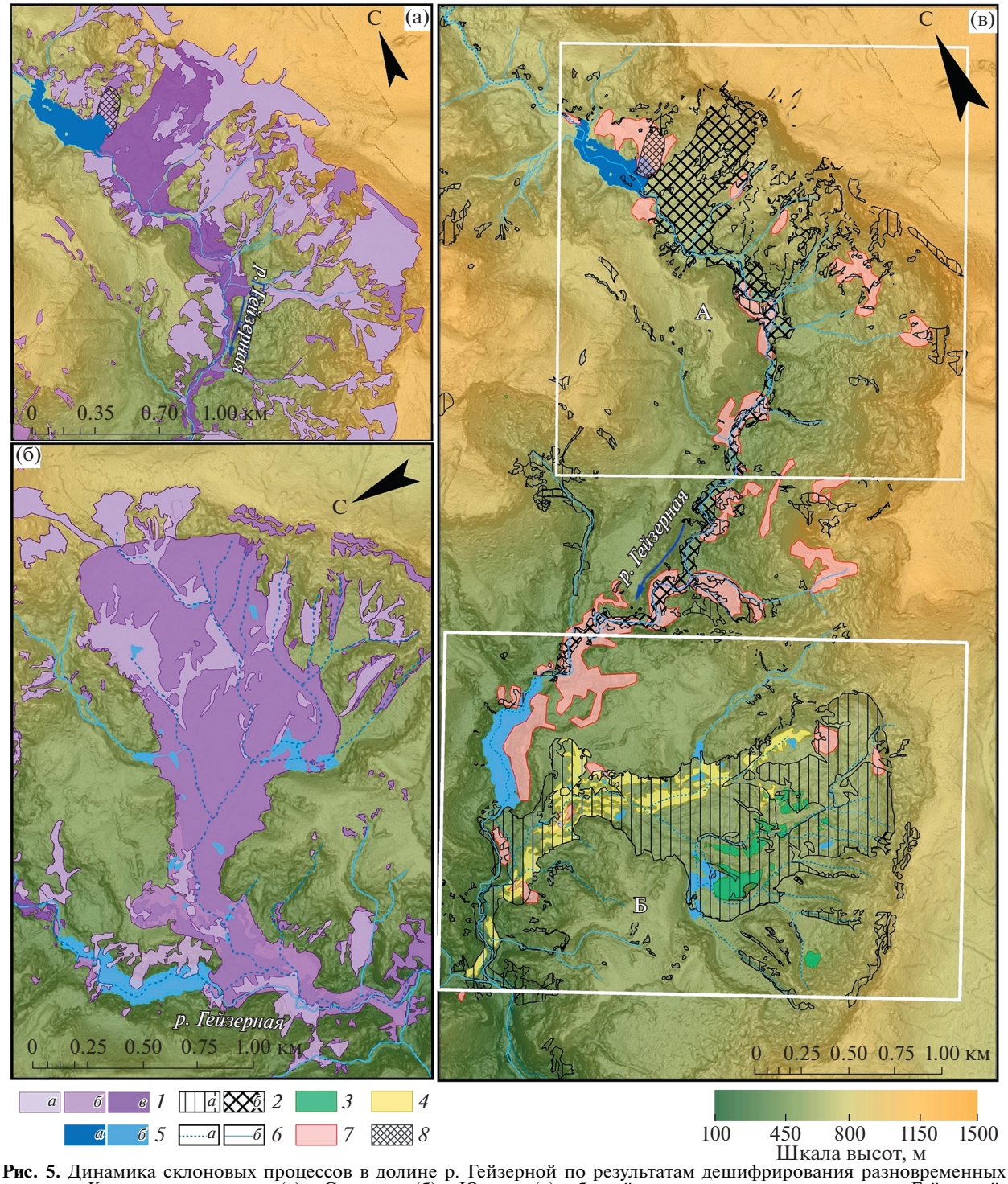

Рис. 5. Динамика склоновых процессов в долине р. Гейзерной по результатам дешифрирования разновременных снимков. *Ключевые территории:* (а) – Северная, (б) – Южная, (в) – бассейн среднего и нижнего течения р. Гейзерной. *Результаты дешифрирования: 1* – лишенные растительности участки активизации склоновых процессов, впервые отмеченные на снимках (*а* – 1964 г., *б* – 2009 г., *в* – 2017 г.); *2* – увеличение площади обнажений во временные интервалы (*а* – 1964–2009 гг., *б* – 2009–2017 гг.); *3* – блоки пород, смещенные с растительностью; *4* – участки с активным восстановлением растительности; *изменения гидрографической сети: 5* – границы подпрудных водоемов по снимкам (*а* – 2017 г., *б* – 2009 г.), *6* – положение русел водотоков (*а* – 1964 г., *б* – 2009 г.); *данные из литературных источников: 7* – термальные поля по результатам вертолетной съемки 2010 г. (Kiryukhin et al., 2012), *8* – оползень 1981 г. по (Двигало, Мелекесцев, 2009).

Fig. 5. Dynamics of slope processes in the valley of the Geysernaya River based on the results of interpretation of multi-temporal images. *Key territories:* (а) – North, (б) – South, (в) – basin of the middle and lower reaches of the Geysernaya River. *Images interpretation results: 1* – areas of activation of slope processes (devoid of vegetation) for the first time noted in the images (*а* – 1964, *б* – 2009, *в* – 2017); *2* – increase in devoid of vegetation area in time intervals (*а* – 1964–2009 гг., *б* – 2009–2017 гг.); *3* – rock blocks displaced with vegetation; *4* – areas where there is an active restoration of vegetation (overgrowing); *changes in the hydrographic network: 5* – dammed lakes according to images (*а* – 2017, *б* – 2009), *6* – the position of watercourses (*а* – 1964, *б* – 2009); *data from literary sources: 7* – thermal fields based on the results of a helicopter survey in 2010 (Kiryukhin et al., 2012), *8* – event of 1981 after (Dvigalo, Melekestsev, 2009).

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 визуально выделяются в виде лишенных растительности белесых и желтых пятен на различных высотах над рекой (см. рис. 2). По данным вертолетной съемки 2010 г. (Kiryukhin et al., 2012), участки термальных аномалий занимают на анализируемой территории около 0.2 км^2 (4.7% площади). Размер отдельных термальных площадок достигает сотен квадратных метров.

На восточном борту подпрудного озера 2014 г. на высотных отметках около 700 м над у. м. дешифрируются следы крупного оползня 1981 г., имеющего ширину до 120 м и протяженность до 300 м (рис. 2). 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 м^3. 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 склоновых процессов 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 2014 г., – 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 2021 г.

По расчетам сотрудников ИВиС, объем перемещенных здесь в 2007 г. пород достиг 21 млн м^3 (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 км^2), но затем начались постепенная стабилизация процессов и зарастание обвала-оползня, и к 2017 г. площадь лишенной растительности поверхности сократилась до 30%. Растительность восстановилась примерно на площади 0.21 км^2, чему вероятно способствовало наличие уцелевших холмов-останцов и блоков, смещенных в 2007 г. прямо с растительностью (общая их площадь около 0.063 км^2).

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 долины преобладают комплексные, реже блоковые оползни. По долинам притоков р. Гейзерной отмечены следы неоднократного схода селей.

Формированию всех масштабных смещений на склонах долины предшествовало образование трещин отседания (рис. 2 (б)). 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 2014 г. – стенка срыва высотой до 200 м 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 Горного 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 (Кугаенко и др., 2007, 2010; Пинегина и др., 2008; 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, в том числе, 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 разноуровенные 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 выполаживания 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 г.). 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 начались 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, 2009–2017 и 1964–2017 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 обусловливает 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 широкого спектра эндогенных процессов и явлений: газогидротермальной деятельности, воздымания прибортовой части долины, наличия активных зон разломов и повышенной трещиноватости пород.

БЛАГОДАРНОСТИ

Методики исследований разрабатывались в рамках тем государственных заданий Института географии РАН № АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005) и № АААА-А19-119022190168-8, а также географического факультета МГУ имени 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 участникам полевых работ 2020 и 2021 г. в долине р. Гейзерной Д.В. Михалеву, А.Л. Гуринову, А.Л. Захарову, а также сотрудникам Кроноцкого заповедника за всестороннюю помощь при проведении работ и предоставленные архивные материалы.

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 Междунар. 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 Междунар. 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 междунар. 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. Вып. 15. № 1. С. 90–99.

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Синицын В.И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. Вып. 10. № 2. С. 171–172.

Лебедева Е.В. Виды воздействия вулканической и поствулканической деятельности на флювиальный рельеф // Геоморфология. 2019. № 4. С. 49–66. https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66

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. Цепочки катастрофических геоморфологических процессов в речных долинах вулканических регионов // Геоморфология. 2018. № 4. С. 36–52. https://doi.org/10.7868/S0435428118040041

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. https://doi.org/10.31857/S0435428122010096

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. https://doi.org/10.31857/S0435428120020066

Леонов В.Л. Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. Вып. 23. № 1. С. 7 –20.

Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов 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., Дрознин В.А., Карпов 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., 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. науч. конф. с междунар. участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 186.

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.

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 междунар. 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. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.05.008

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 Landslide // Applied Geochemistry. 2012. Vol. 27. P. 1753–1766. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.011

Lebedeva E.V. and 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. https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012028

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

USE OF MULTI-TEMPORAL HIGH RESOLUTION SPACE IMAGES TO ANALYZE THE SLOPE PROCESSES IN THE GEYSERNAYA RIVER VALLEY (KAMCHATKA)

E. V. Lebedeva[a,#], E. A. Baldina[b, ##], and A. A. Medvedev[a,###]

[a] *Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

[b] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com*

[##] *E-mail: baldina@geogr.msu.ru*

[###] *E-mail: a.a.medvedeff@gmail.com*

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

The methodology for mapping the dynamics of slope processes based on the interpretation of multi-temporal images over a time interval of more than 50 years was tested in two key areas characterized by diverse and dif-

ferent-scale manifestations of exogenous processes. Calculations made on the basis of the interpretation results made it possible to determine that the last two large landslides in 2007 and 2014 sharply reduced the area covered by vegetation: from 70% to 7% and from 60% to 4%, respectively. It was found that in the Northern key site, the proportion of the area with traces of slope processes activation for 53 years increased from 20.9 to 30.2%, in the Southern site it increased from 12 to 30%. Analysis of spatial and temporal distribution of areas of slope processes activation showed that in addition to commonly known triggers, such as heavy rainfall and earthquakes, the influence of the spectrum of endogenous processes on the displacement of material on the slopes is obvious in this area.

Keywords: image interpretation, digital image processing, landslides, rockslides, gas-hydrothermal manifestations

ACKNOWLEDGMENTS

Research methods were developed within the framework of the topic of State assignments of the Institute of Geography RAS No. AAAA-A19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005) and No. AAAA-A19-119022190168-8 and Moscow State University No. 121051400061-9. Interpretation of images and field work in the Geysernaya River valley were carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 21-17-00216, https://rscf.ru/project/21-17-00216. The authors are grateful to the participants of the field work in 2020 and 2021 in the Geysernaya River valley: D.V. Mikhalev, A.L. Gurinov, A.L. Zakharov, as well as to the staff of the Kronotsky Reserve for comprehensive assistance in carrying out the work and provided archival materials.

REFERENCES

Droznin V.A., Dvigalo V.N., and Muravyov Yu.D. Landslide June 3, 2007 in the Valley of Geysers in Kamchatka. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita"* (Proceedings of the International Conference "Mudflows: Disasters, Risk, Forecast, Protection"). Pyatigorsk. 2008. P. 41–44. (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). *Journal of Volcanology and Seismology* (Vulkanologiya i Seismologiya). 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. *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Mat-ly III Mezhdunar. 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.)

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., 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., Zerkal' O.V., and Gvozdeva I.P. The influence of hydrothermal transformations on the physico-mechanical properties of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers and their role in the formation of landslides. *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy: tezisy dokladov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (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.)

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. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.05.008

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 Landslide. *Applied Geochemistry*. 2012. Vol. 27. P. 1753–1766. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.011

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. Is. 15. No. 1. 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. Is. 10. No. 2. P. 171–172. (in Russ.)

Lebedeva E.V. Influence of gas-hydrothermal activity on the formation of the relief of river valleys of geothermal zones. *Puti evolyutsionnoi 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. Kinds of impacts of volcanic and post volcanic activity on fluvial relief. *Geomorfologiya*. 2019. No. 4. P. 49–66. (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66

Lebedeva E.V. Sequences of catastrophic geomorphic processes in the river valleys of volcanic regions. *Geomorfologiya*. 2018. No. 4. P. 36–52. (in Russ.). https://doi.org/10.7868/S0435428118040041

Lebedeva E.V. and Zharkov R.V. Accumulative landforms in valleys with gas-hydrothermal manifestations (the Kuril-Kamchatka region as an example). *Geomorfologiya*. 2022. Vol. 53. No. 1. P. 81–100. (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S0435428122010096

Lebedeva E.V. and 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. https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012028

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.) https://doi.org/10.31857/S0435428120020066

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. Is. 23. No. 1. 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. Deistvuyushchie vulkany Kamchatki* (Active volcanoes of Kamchatka). M.: Nauka (Publ.), 1991. Vol. II. C. 94–141. (in Russ.)

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

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.)

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 mezhdunar. uchastiem "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.)

Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., and Leonov V.L. *Zhemchuzhina Kamchatki – Dolina Geizerov. Nauchno-populyarnyi ocherk, putevoditel'* (The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular science essay, guide). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress (Publ.), 2009. 108 p. (in Russ.)

Ustinova T.I. *Kamchatskie geizery* (Kamchatka geysers). M.: Geografgiz (Publ.), 1955. 120 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.)

Zavadskaya A.V. (Ed.). *Atlas doliny reki Geizernoi v Kronotskom zapovednike* (Atlas of the valley of the River Geysernaya in Kronotsky Reserve). M.: KRASAND (Publ.), 2015. 88 p. (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 Geysernaya. *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy: tezisy dokladov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (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 (Publ.), 2019. P. 138. (in Russ.)

Zhukovsky M.O. Use of CORONA satellite data in archaeological research. *Kratkie soobshcheniya Instituta Arkheologii* (Brief communications of the Institute of Archeology). 2012. Vol. 226. P. 45–54. (in Russ.)