

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH

УДК: 551.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-264-274

Е.В. Воскресенская¹, И.С. Воскресенский², С.А. Сократов³, А.А. Сучилин⁴,
А.Л. Шнышарков⁵, Л.А. Ушакова⁶

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЗАПАДНОМ КАВКАЗЕ И МЕТОДЫ ИХ МОНИТОРИНГА

АННОТАЦИЯ

Оползневые склоны широко распространены в горах Западного Кавказа. На склонах хр. Аибга и в долине р. Мзымта оползни определяют эколого-геоморфологические условия при строительстве и эксплуатации, прежде всего линейных сооружений (автомобильных и железных дорог). В работе рассматривается характеристика современных склонов, на которых протекают процессы оползания. По результатам исследований проводится эколого-геоморфологическое районирование (выделение эколого-геоморфологических участков). Основанием для выделения эколого-геоморфологических участков служат данные о расположении древних оползневых тел и современных проявлениях оползания различного типа, а также морфометрические показатели — относительное превышение между сопряжёнными формами рельефа и крутизна склона. Исследуются возможности применения современных методов для мониторинга и предупреждения процесса оползания. Рассматривается методика мониторинга для высокоточной фиксации «подвижек» на склонах, подверженных оползанию. Она включает несколько этапов последовательного применения современных аппаратных средств (наземного и воздушно-космического зондирования):

¹ Агентство ООО «ГЭФ», ул. Никулинская, д. 15, 119602, Москва, Россия; *e-mail*: lvoskresenskaya@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: isvoskresensky@rambler.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: sokratov@geogr.msu.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: asuhov308@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: malyn2006@yandex.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: la.ushakova@mail.ru

- предварительное выделение участков вдоль линейного объекта, представляющих потенциальную оползневую опасность;
- наземное зондирование, при котором на местности на объект мониторинга на опорных знаках плано-высотного обоснования размещаются различные приборы геодезического класса (лазерный тахеометр-автомат, лазерный сканер, цифровая стереофотограмметрическая камера и др.);
- анализ материалов космической съёмки с различных космических аппаратов (Landsat, Pléiades, ALOS, Sentinel и др.) и трансформирование их в принятую систему координат участка исследований;
- использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для локального крупномасштабного зондирования, позволяющего получить крупномасштабный ортофотоплан и высотную модель поверхности исследуемого участка.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оползни, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), лазерное сканирование

**Elena V. Voskresenskaya¹, Ivan S. Voskresensky², Sergey A. Sokratov³,
Alexander A. Suchilin⁴, Alexander L. Shnyparkov⁵, Ludmila A. Ushakova⁶**

GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS OF FORMATION OF LANDSLIDES HAZARDS IN THE WESTERN CAUCASUS AND METHODS OF THEIR MONITORING

ABSTRACT

Toppling, falling and sliding of slopes are widespread in the mountains of the Western Caucasus. The slope hazards on Aibga Ridge and in the Mzymta river basin determine the ecological and geomorphological conditions for construction and operation of first of all, the linear infrastructures (roads and railways). Investigation considered the characteristic of the recent gravity-induced processes and corresponding slopes, including topples, falls, slides and spreads. According to the research results, ecological-geomorphological zoning (allocation of ecological-geomorphological sub-zones) was carried out. The base for the sub-zones regionalization were the morphometric characteristics: the relative excess (m) between the conjugate landforms and slope angle. The possibilities of applying modern techniques for monitoring and preventing of dangerous slope processes were investigated. The monitoring technique for high-precision fixation of “movements” of dangerous slopes was considered, which included several stages of applying modern hardware tools (ground-based and aerospace remote sensing):

¹ Agency Global Education Facilitators (GEF), Nikulinskaya str., 15, 119602, Moscow, Russia;
e-mail: lvoskresenskaya@mail.ru

² Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail: isvoskresensky@rambler.ru*

³ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail: sokratov@geogr.msu.ru*

⁴ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail: asuhov308@gmail.com*

⁵ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail: malyn2006@yandex.ru*

⁶ Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail: la.ushakova@mail.ru*

- preliminary allocation of sections along a linear object that represent a potential hazard;
- ground-based sensing, in which various geodetic instruments (laser robotic total station, laser scanner, digital stereo-camera, etc.) are positioned on a reference marks of geodetic control network to monitor object of interest;
 - analysis of satellite imagery data from various satellites (Landsat, Pléiades, ALOS, Sentinel) and transforming them into the adopted coordinate system of the research site;
 - use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for local large-scale remote sensing, which allows to obtain large-scale ortho-photo-maps and digital elevation model of the surface of an investigated area.

KEYWORDS: landslides, remote sensing data, global navigation satellite systems (GNSS), unmanned aerial vehicles (UAVs), laser scanning

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изменение горного рельефа Западного Кавказа происходит в значительной степени в результате действия процессов обваливания, осыпания и оползания [Кружалин, 2001; Хмельёва и др., 2000]. На склонах с углами наклона, близкими к 15–25°, оползни перемещают значительные массы горных пород [Воскресенский, 1971; Капчеля, Осюк, 1989; Осипов и др., 1999].

Привлечший значительное внимание Бурейский обвал/оползень северной части горного массива объёмом около 24 млн м³ напротив правого притока р. Ср. Сандар, перегородивший Бурейское водохранилище, не только ещё раз указал на необходимость мониторинга потенциально-опасных склонов, в т.ч. и не угрожающих напрямую инфраструктуре и населению, но и выявил наличие технических возможностей для этого. К примеру, проведённый анализ материалов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) на участок этого «схода» за предшествующий десятилетний период [Бондур и др., 2019], как утверждают авторы, позволил получить динамику разноинтервального смещения оползневой блока в сторону русла, с возрастанием смещения от 1,6 до 10,7 см/мес., что, по всей видимости, и привело к катастрофе 11 декабря 2018 г.

Постановка проблемы. Оползание относится к быстросейсмическим и труднопрогнозируемым экзогенным геологическим процессам. Нередко оползни приобретают характер природной катастрофы [Трофимов и др., 2008; Эколого-геологические условия России, 2016]. Оползни даже небольших объёмов представляют угрозу для эксплуатации и целостности транспортных сооружений, входящих в комплекс Олимпийских объектов (железная и автомобильные дороги), построенных в долине р. Мзымта и на склонах хр. Аибга. Оценка изменений, происходящих на оползневых склонах, имеет значение для мониторинга рельефа горной территории и основанием для прогноза развития современных склоновых процессов [Кузьмин, 2009]. Оползни протекают при определённых естественных геоморфологических условиях. Вместе с тем активизация древних стабилизированных оползней или проявление процесса оползания вновь отмечается на горных территориях в связи с техногенными изменениям [Шукин, 1964; Хмельёва и др., 2000; Воскресенский, Сучилин, 2016]. В последнее время в горах Центральной Азии (Тибет и Каракорум) выявлены и исследованы крупные (объёмом в десятки млн м³) оползни-обвалы [Han, 2003; Petley, 2011], в результате которых созданы условия для проявления селей. Ранее А.М. Капчелей и В.А. Осюком [1989, с. 187–189] для участка Молдавских Кодр были выявлены комплексы (парагенезы) проявления современных процессов оползания, «крипа» и эрозии в зависимости от естественных геоморфологических условий. На территориях антропогенного воздействия мониторинг экзогенных рельефообразующих процессов

организуется с учётом изменений относительных превышений и углов наклона поверхности [Ковальчук, 1997, с. 61] позволяет уточнить систему наблюдений за современными экзогенными рельефообразующими процессами.

Цель исследования — разработка приёмов дистанционного наблюдения (мониторинга) за оползневыми процессами для прогноза их развития.

Задачи:

- определение пространственного распространения проявлений современных склоновых («крип, оползание») и эрозионных процессов относительно древних стабилизированных оползневых, обвально-осыпных и ледниковых форм рельефа;
- эколого-геоморфологическое районирование по рельефообразующей роли современных оползневых и эрозионных процессов с учётом антропогенного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проявления экзогенных гравитационных рельефообразующих процессов: обваливание, осыпание, оползание, «крип» на склонах хр. Аибга и в долине р. Мзымта были ранее выявлены при геологических исследованиях территории. Они отражены на геологических, структурно-тектонических и инженерно-геологических картах и схемах м-ба 1: 25 000 – 1: 100 000, использованных в исследовании. В работе использовались также топографические карты м-ба 1: 25 000 и материалы ДЗЗ. Материалы были предоставлены «Экоцентром» Автономной некоммерческой организации Межрегиональной Топливо-Энергетической ассоциации (АНО МТЭА г. Москва).

Анализ проявления пространственной изменчивости эколого-геоморфологических условий современных склоновых процессов производился на основании эколого-геоморфологического районирования с выделением эколого-геоморфологических районов с учётом изменений при строительстве совмещённой авто- и железной дороги. Основанием для их обособления служат морфометрические показатели — относительные превышения (м) между сопряжёнными формами рельефа и крутизна склона. Морфография склона характеризуется формой продольного профиля — выпуклой, вогнутой или прямой [Воскресенский, Сучилин, 2016]. Эколого-геоморфологическое районирование производилось по результатам сопряжённого анализа топографических карт и материалов дистанционного зондирования Земли (космических снимков) м-ба 1: 25 000 – 1: 100 000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В пределах склона хр. Аибга и долины р. Мзымта сочетаются генетически разнородные формы рельефа — ледниковые, флювиальные и склоновые — с различными морфологическими характеристиками.

Днище долины р. Мзымта — пойма и низкие (до 20 м отн. высоты) аллювиальные террасы располагаются на абс. высотах около 500 м. «Придолинный ярус» [Щукин, 1964] рельефа образован крутыми (до 30°) склонами с прямым или выпуклым поперечным профилем. Они поднимаются над поймой и террасами долины р. Мзымта. Поверхность склонов волнистая, осложнённая небольшими по площади (до первых десятков м) буграми и террасовидными площадками. Нередко они ограничены трещинами глубиной до 0,5 м и редко более. Морфология склона свидетельствует о протекающих на склонах современных процессах «крипа» — массового смещения склонового чехла отложений. Морфология поверхности позволяет говорить как о наличии временно стабилизированных оползневых тел, так и активных крупных (до 0,5–1 км) оползнях блокового и блоково-пластичного течения (по определению ОАО «Росстройизыскания и «Кавказгидрогеология»), в т.ч. оползания небольших блоков на склонах долины р. Мзымта.

На склоне хр. Аибга сформированы «наклонные (до 15–20°) террасовидные поверхности», вытянутые вдоль долины р. Мзымта на 2–4 км. Их ширина достигает 1–5 км по падению склона. Как правило, они приурочены к междуречьям левых притоков р. Мзымта. «Наклонные террасовидные поверхности» образуют два яруса: «нижний» на абс. высотах 600–900 м (100–400 м отн. высоты) и «верхний» — 1000–1600 м (500–1100 м отн. высоты). Предполагается, что «наклонные террасовидные поверхности» образованы древними стабилизированными оползневыми телами. Однако к настоящему времени они в значительной степени преобразованы эрозией. Крутосклонные ущелья долин притоков р. Мзымта углублены в них на 100–200 м и более.

Крутые (30° и более) склоны, покрытые щебнистыми покровами обвалов и осыпей, образуют ярус ледниковых форм рельефа. Они приурочены к наиболее высокой части хр. Аибга, достигающей абс. высот 2200–2500 м. Современный рельеф склонов хр. Аибга и долины р. Мзымта формируется в результате осыпания, обваливания оползания и массового смещения склонового чехла — «крипа». Ранее проведённые инженерно-геологические исследования в бассейне р. Мзымта показали, что обвальные, осыпные и оползневые процессы составляют до 40 % всех выявленных проявлений опасных геологических процессов.

Осыпные и обвальные склоны активно преобразуются в вершинном ярусе хр. Аибга при обваливании и осыпании скальных и рыхлых горных пород, объём которых достигает десятков тыс. м³, вне зависимости от их петрографического состава. В частности, обваливание и осыпание пород в результате боковой эрозии приводит к переформированию склонов поймы и террас долины р. Мзымта.

Оползание по механизму смещения оползневых масс (заключение ОАО «Росстройизыскания» и «Кавказгидрогеология» по материалам АНО МТЭА «Экоцентр») проявляется в виде:

- «сдвига» крупных блоков коренных пород мощностью до 100 м объёмом до десятков тыс. м³;
- «пластического течения» грунтовых потоков пород мощностью до 5 м и длиной в десятки–сотни метров;
- «сложных», т.е. комбинированных по механизму смещения.

Механизмы оползневого смещения аналогичны оползням, выделенным А.М. Капчелей и В.А. Осиюком для Кодр Молдавии [1989, с. 99–121]. Оползневые тела подразделяются на «временно стабилизированные» и «активные». Для первых характерны признаки смещения, в частности, выраженные в образовании на поверхности «открытых трещин» и «ступеней»; для вторых — бугристо-волнистая поверхность; для «сложных» — комбинирование этих признаков. По размерам оползневых масс выделяются оползни «крупные» и «небольшие». Для первых длина и ширина «оползневой массы» превышает 100 м, а для вторых составляет, как правило, менее 100 м.

Рассматриваемая территория склона хр. Аибга и долины р. Мзымта принадлежит Пшеха-Лабинскому геоморфологическому району [Ананьев и др., 1980]. Морфологические и генетические характеристики рельефа позволяют выделить в его пределах два эколого-геоморфологических подрайона: северный и южный. Они различаются по геоморфологическим условиям протекания современных склоновых процессов. В Северном эколого-геоморфологическом подрайоне обвальные и осыпные процессы моделируют рельеф ледниковых цирков вершин хр. Аибга, на которых отсутствует лесная растительность. Современные оползневые процессы и «крип» преобразуют древние оползневые тела, а также ледниковый рельеф в средней части склона хребта с лесной растительностью. Южный эколого-геоморфологический подрайон занимает «эрозионную зону» гор [Щукин, 1964], которая на исследованной территории приурочена к нижней части макросклона хребта и фрагменту долины р. Мзымта. На

склонах долин р. Мзымта и её притоков протекает процесс оползания различного «механизма смещения», что привело к образованию крупных оползневых блоков сейсмотектонического происхождения. Эколого-геоморфологические подрайоны подразделены на «эколого-геоморфологические участки», которые отличаются друг от друга комплексами (парагенезами) современных гравитационных склоновых процессов и геоботаническими условиями («безлесные» и с «древесным покровом») их протекания [Воскресенский, Сучилин, 2016].

Рельеф территории исследований претерпел трансформацию в результате строительства объектов инфраструктуры (транспортная сеть, спортивные объекты и т.п.) Игр Зимней Олимпиады 2014 г. Изменения, произведённые в рельефе при строительстве, вызвали изменения геоморфологических условий протекания обвалов, осыпания, оползания и «крипа» на склоне хр. Аибга. Наиболее существенными они оказались в долине р. Мзымта при строительстве насыпей, выемок, мостов и тоннелей совмещённой автомобильной и железной дорог. Формирование крутых техногенных склонов произошло в результате «подрезки» левого борта долины р. Мзымта. Изменение рельефа связано также со строительством порталов тоннелей. Так, в пределах эколого-геоморфологических участков 2, 2а, 3 (рис. 1) были созданы техногенные «формы рельефа»: склоны насыпей, выемок и порталов тоннелей. В долине р. Мзымта произошла активизация оползневых процессов «пластического» механизма смещения, осыпания и оползания. Особый интерес представляют изменения морфологии оползневых склонов «блокового типа» смещения. Это вызвано тем, что тоннели «совмещённой дороги» проходят сквозь «активные» или «временно стабилизированные» оползневые тела, в т.ч. имеющие сейсмо-гравитационное происхождение. Важно учитывать, что олимпийские объекты располагаются в зоне сейсмичности 8 бал. с вероятностью землетрясений 10 %, с превышением расчётной интенсивности 1 раз в 50 лет по шкале MSK-64 карты ОСР-97-А, тогда как одной из причин активизации оползания в горах Западного Кавказа являются землетрясения [Хмельва, Виноградова, 2000]. Строительство спортивных сооружений и автомобильных дорог к олимпийским объектам в северо-восточной части территории исследования (9-ый эколого-геоморфологический участок, рис. 1) сопровождалось образованием склонов дорожных выемок и насыпей в пределах стабилизированных оползневых склонов. Изменения морфологии склонов может привести к активизации оползания и др. гравитационных процессов, что делает актуальным проведение мониторинга рельефа, прежде всего в долине р. Мзымта на территории строительства дорог и объектов.

На территории транспортных и спортивных сооружений был предусмотрен экологический мониторинг [Белый, 2004], включающий наблюдения за проявлениями опасных экзогенных геологических процессов литотехнических систем [Королёв, 2007]. Периодичность и виды наблюдений (маршрутные полевые обследования и инструментальные наблюдения [там же]) были намечены на этапе строительства дорог и объектов с учётом стационарных исследований условий протекания гравитационных склоновых процессов [Хмельва, Виноградова, 2000] на сопредельной территории Западного Кавказа в бассейне р. Бзыбь. Современное состояние естественных склонов хр. Аибга и долины р. Мзымта требует, с нашей точки зрения, организации дополнительных наблюдений за изменениями морфологии естественных и антропогенных склонов, на которых активизировались обвальные, осыпные, оползневые процессы и «крип». Также мониторинг гравитационных процессов целесообразно организовать на территориях, где вновь сформировались геоморфологические условия для проявления опасных гравитационных склоновых процессов. При проведении мониторинга целесообразно предусмотреть использование современных методов дистанционного зондирования с применением беспилотных аппаратов (БПЛА) и организацию локальных

геодезических сетей [Воскресенский и др., 2018], что позволит оперативно получать информацию об изменениях морфологии оползневых склонов для принятия необходимых решений. Фиксация даже незначительных изменений в морфологии склонов позволяет выработать меры инженерной защиты или своевременно сделать предупреждающие сообщения о возникновении опасной ситуации.

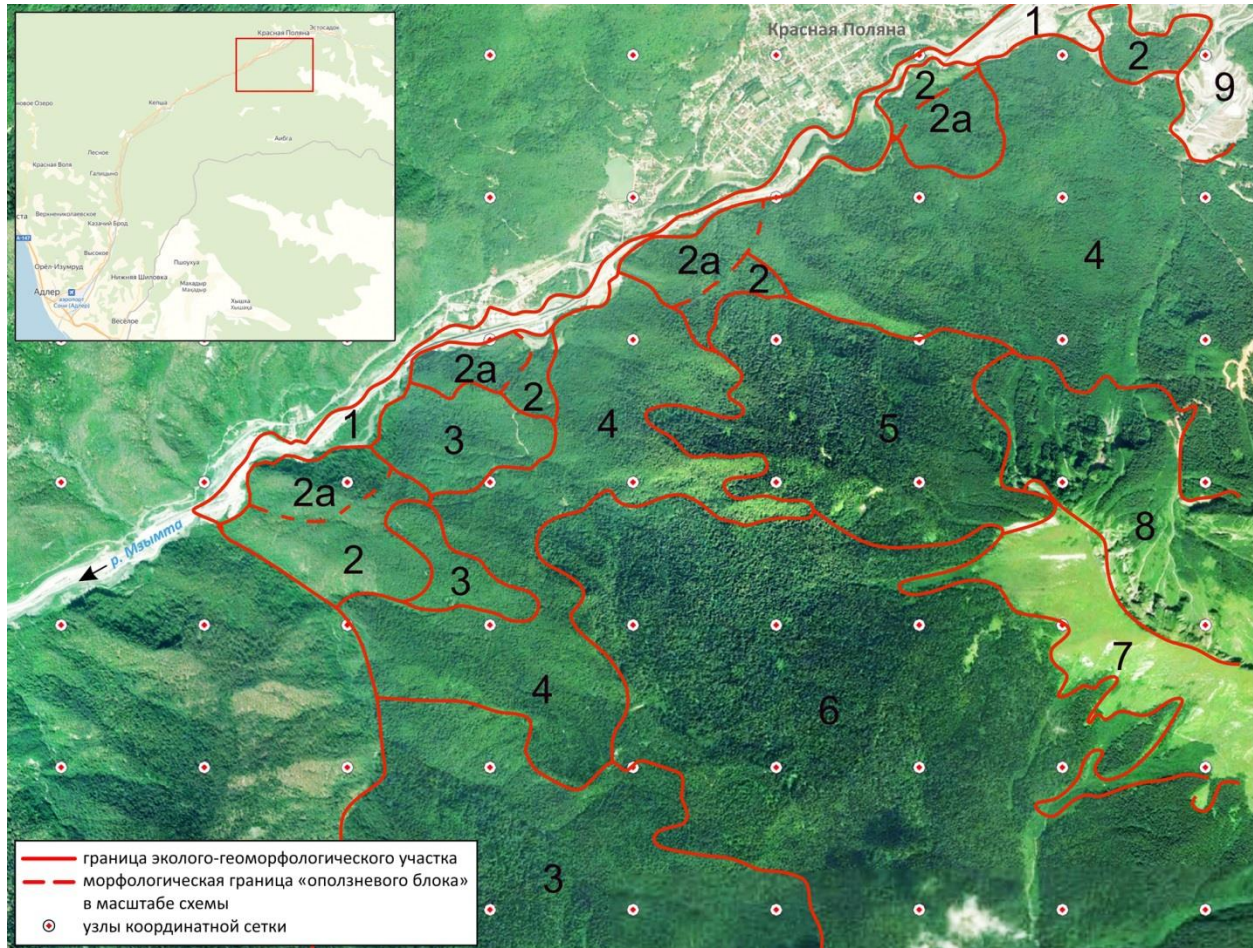


Рис 1. Схема эколого-геоморфологического районирования фрагмента хр. Аибга и долины р. Мзымта по рельефообразующей роли комплексов (парагенезов) современных склоновых и эрозионных процессов (пояснения в тексте)

Эколого-геоморфологические участки Южного эколого-геоморфологического района:
 1 — склоны естественные поймы и террас и склоны техногенных насыпей и выемок совмещённой автомобильной и железной дорог Зимней Олимпиады 2014 г. в долине р. Мзымта (вне масштаба схемы); 2 — склоны проявления современного оползания различного типа смещения (вне масштаба схемы); 2а — склоны проявления современного оползания в пределах стабилизированных блоковых оползней (в масштабе схемы); 9 — склоны насыпей и выемок автодорог и инженерных сооружений; **Эколого-геоморфологические участки Северного эколого-геоморфологического района:** 3 — склоны массового смещения чехла («крип») с проявлениями эрозии; 4 — склоны «крипа» и единичных (вне масштаба схемы) проявлений оползания и эрозии; 5 — склоны «крипа» в пределах стабилизированных обвалов и осыпей (выше нижней границы древнего оледенения под покровом леса); 6 — склоны «крипа» и единичных (вне масштаба схемы) проявлений оползания и эрозии; 7 — склоны обвалов, осыпей и единичных (вне масштаба схемы) проявлений эрозии выше границы леса; 8 — склоны обвально-осыпные ледниковых цирков выше границы леса

Fig. 1. Scheme of ecological-geomorphological zoning of gravity-induced processes and corresponding slopes of a part of the Aibga Ridge and the Mzymta river basin (explanations in text)

Ecological-geomorphological areas of the South ecological-geomorphological sub-zone: 1 — slopes of natural floodplain and terraces and slopes of technogenic embankments and ditches of the joint auto and rail roads of the 2014 Winter Olympiad in the Mzymta river basin (unscaled); 2 — slopes of slides of different types (unscaled); 2 — slopes of slides as blocks, active and stabilized (in scale); 9 — slopes of embankments and ditches of the auto roads and engineering infrastructure; **Ecological-geomorphological areas of the North ecological-geomorphological sub-zone:** 3 — slopes of massive spreads and small brooks erosion; 4 — slopes of spreads and solitary (unscaled) cases of sliding and erosion; 5 — slopes of spreads and stabilized falls above the bottom border of paleo glaciation below forest line; 6 — slopes of spreads, topples, falls and solitary (unscaled) cases of sliding and; 7 — slopes of topples, falls, and solitary (unscaled) cases of erosion above forest line; 8 — slopes of topple-fall glaciers cirques with active topples and falls above forest line

В процессе исследования разрабатывались содержание и методика эколого-геоморфологического районирования, на основании которого организуется мониторинг морфологии гравитационных склонов, подверженных современным гравитационным процессам. Под «мониторингом» понимается комплекс операций по регистрации явлений в ходе инструментальных наблюдений, сбору, передаче, накоплению и анализу информации о качественных и количественных характеристиках объекта исследований. Данные мониторинга позволяют оценить зафиксированные явления, в частности с точки зрения их «опасности», и сформировать прогноз их эволюции для формирования рекомендаций для принятия управляющих решений [Агишев, 2018].

«Дистанционный» мониторинг рельефа оползневых склонов базируется на применении современных аппаратных средств наземного или воздушно-космического зондирования. Их применение позволяет фиксировать изменения морфологии оползневых склонов с высокой точностью и детальностью [Воскресенский и др., 2018]. Мониторинг включает следующие этапы. Предварительно, на основании натуральных или аналитических исследований в среде геоинформационных систем (ГИС), выделяются участки вдоль линейного объекта, представляющие потенциальную опасность. В непосредственной близости от проявления склонового гравитационного процесса, т.е. соответствующей по генезису формы рельефа, определяются знаки государственной геодезической сети (ГГС). При их отсутствии размещаются опорные знаки для формирования локальной сети плано-высотного обоснования (ПВО) и проводятся измерения их координат высокоточными приборами глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Следующий этап заключается в наземном зондировании рельефа. На местности, в прямой видимости объекта мониторинга, на опорных знаках ПВО размещаются приборы геодезического класса с различной методикой измерений (например, лазерный тахеометр-автомат, лазерный сканер, цифровая стереофотограмметрическая камера). На площади формы рельефа или ареала склоновых процессов осыпания, обваливания и т.п. явлений, размещаются автономные приёмники ГНСС, которые транслируют по каналам связи текущие координаты на данный момент времени.

При воздушно-космическом зондировании используются материалы съёмки с различных космических аппаратов (Landsat, Pléiades, ALOS, Sentinel и др.), которые трансформируются в принятую систему координат участка исследований, после чего проводится их анализ и фиксируются пространственные и прочие изменения на весьма большой по охвату площади. Для локального крупномасштабного зондирования могут быть использованы беспилотные летательные аппараты (БПЛА), позволяющие получать

после фотограмметрической постобработки крупномасштабный ортофотоплан и высотную модель поверхности исследуемого участка.

Данные измерений поступают в центр мониторинга, где проводится их анализ и принимаются необходимые решения предупреждающего характера.

ВЫВОДЫ

Выявлены два комплекса (парагенеза) склоновых рельефообразующих процессов:

- обваливание и осыпание на крутых склонах ледниковых цирков в «нивальной зоне» хр. Аибга;
- оползание блокового, блоково-пластичного, пластичного типа и «крип» в «эрозионной зоне» горного рельефа территории.

Территория Северного эколого-геоморфологического подрайона занимает «нивальную зону» ледниковых цирков, в которой господствуют обвалы и осыпи, а Южного — «эрозионную зону», где формируются оползни разного типа и размеров.

Трассы железной и автомобильной дорог и спортивные олимпийские объекты располагаются в Южном эколого-геоморфологическом районе, который характеризуется изменениями морфологии гравитационных склонов в результате строительства. Мониторинг морфологии склонов с целью выявления оползневых и др. гравитационных процессов с применением дистанционных методов наблюдения целесообразно сосредоточить на естественных и антропогенных склонах в долине р. Мзымта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны НПФ «Экоцентр МТЭА» (г. Москва) и лично Л.В. Бычковой за предоставленные материалы и возможность проведения исследований. Исследование проводилось при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Совершенствование управления рисками оползневых и селевых потоков в горных районах» (BRICS2019-104, УИ RFMEFI61319X0097).

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors are grateful to Environmental Center IFPA (Moscow) and personally L.V. Bychkovskaya for the materials provided and the opportunity to conduct research. The study was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Improving Risk Management of Landslide and Mudflows in Mountain Areas” (BRICS2019-104, UI RFMEFI61319X0097).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агишев Р.Р.* Лазерное зондирование окружающей среды: методы и средства. М.: Физматлит, 2018. 259 с.
2. *Ананьев Г.С., Андреева Т.С., Варущенко С.И., Воскресенский С.С., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Спаская И.И., Спиридонов А.И., Ульянова Н.С.* Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей. М.: Высшая школа, 1980. 343 с.
3. *Белый А.В.* Экологический мониторинг. Вологда: ВоГТУ, 2004. 196 с.
4. *Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров 1-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурья. Исследование Земли из космоса, 2019. № 5. С. 3–14. DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14.

5. *Воскресенский И.С., Сучилин А.А.* Опыт применения ГИС для регионального геоморфологического районирования при оценке воздействия на окружающую среду. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Протвино (Московская обл.), 2016. Т. 22. Ч. 1. С. 173–183. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-173-183.
6. *Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М., Энтин А.Л.* Применение БПЛА для мониторинга оползневых и эрозионных процессов (на примере центра Русской Равнины). Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Иркутск: Издательство Института географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 42–47.
7. *Воскресенский С.С.* Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: Издательство Московского университета, 1971. 230 с.
8. *Капчеля А.М., Осюк В.А.* Рельеф и экзогенные процессы Кодр Молдавии. Кишинёв: Штиинца, 1989. 228 с.
9. *Ковальчук І.П.* Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. Львів: Видавництво Інституту Українознавства, 1997. 440 с.
10. *Королёв В.А.* Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем. М.: КДУ, 2007. 415 с.
11. *Кружалин В.И.* Экологическая геоморфология суши. М.: Научный мир, 2001. 176 с.
12. *Кузьмин С.Б.* Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2009. 195 с.
13. *Осипов В.И., Кутепов В.М., Зверев В.П., Авсюк Ю.Н., Алексеевский Н.И., Алешин А.С., Аникеев А.В., Варга А.А., Гридин В.И., Гулакян К.А., Каякин В.В., Круподеров В.С., Кюнтцель В.В., Макаров В.И., Махорин А.А., Мироненко В.А., Постоев Г.П., Родионов В.Н., Семёнов С.М., Сергеев А.И., Тимофеев Д.А., Чалов Р.С., Шеко А.И.* Опасные экзогенные процессы. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
14. *Трофимов В.Т., Харьковина М.А., Григорьева И.Ю.* Экологическая геодинамика. М.: КДУ, 2008. 473 с.
15. *Хмельёва Н.В., Виноградова Н.Н., Самойлова А.А., Шевченко Б.Ф.* Бассейн горной реки и экзогенные процессы в его пределах. М.: Издательство Московского университета, 2000. 186 с.
16. *Щукин И.С.* Общая геоморфология. Т. II. М.: Издательство Московского университета, 1964. 564 с.
17. Эколого-геологические условия России. Т. 1. М.: КДУ, 2016. 302 с.
18. *Han Z.S.* Large-scale landslide-debris avalanche in Tibet, China: (1) April–June 2000, Yigong Landslide, Tibet, China. *Landslide News*, 2003. V. 14. P. 22–23.
19. *Petley D.* Damming events at Attabad. *International Water Power and Dam Construction*, 2011. V. 63. No 2. P. 27–29.

REFERENCES

1. *Agishev R.R.* Laser sensing of the environment: methods and tools. Moscow: Fizmatlit, 2018. 259 p. (in Russian).
2. *Ananyev G.S., Andreeva T.S., Varushchenko S.I., Voskresenskiy S.S., Leontiev O.K., Lukyanova S.A., Spasskaya I.I., Spiridonov A.I., Ulyanova N.S.* Geomorphological zoning of the USSR and adjacent seas. Moscow: Higher school, 1980. 343 p. (in Russian).
3. *Beliy A.V.* Environmental monitoring. Vologda: VoSTU (Vologda State Technical University), 2004. 196 p. (in Russian).
4. *Bondur V.G., Zapharova L.N., Chimirtodzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Monitoring of landslide processes by means of L-band radar interferometric observations: Bureya river bank

- caving case. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019. No 5. P. 3–14. DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14 (in Russian).
5. Ecological and geological conditions of Russia. V. 1. Moscow: KDU, 2016. 302 p. (in Russian).
 6. *Han Z.S.* Large-scale landslide-debris avalanche in Tibet, China: (1) April–June 2000, Yigong Landslide, Tibet, China. *Landslide News*, 2003. V. 14. P. 22–23.
 7. *Kapchelia A.M., Osiyuk V.A.* Relief and exogenic processes of Codrii of Moldova. Chisinau: Stiince, 1989. 226 p. (in Russian).
 8. *Khemeleva N.V., Vinogradova N.N., Samoylova A.A., Shevchenko B.F.* A basin of a mountain river and exogenic processes within it. Moscow: Moscow University Press, 2000. 186 p. (in Russian).
 9. *Korolev V.A.* Monitoring of geological, lithotechnical and ecological-geological systems. Moscow: KDU, 2007. 415 p. (in Russian).
 10. *Kovalchuk I.P.* Regional ecological and geomorphological analysis. Lviv: Publishing House of the Institute of Ukrainian Studies, 1997. 440 p. (in Ukrainian).
 11. *Kruzhalin V.I.* Ecological geomorphology of land. Moscow: Scientific World, 2001. 176 p. (in Russian).
 12. *Kuz'min S.B.* Hazardous geomorphological processes and risk of nature management. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2009. 195 p. (in Russian).
 13. *Osipov V.I., Kutepov V.M., Zverev V.P., Avsyuk Yu.N., Alekseevskiy N.I., Aleshin A.S., Anikeev A.V., Varga A.A., Gridin V.I., Gulakyan K.A., Kayakin V.V., Krupoderov V.S., Kyuntsel V.V., Makarov V.I., Makhorin A.A., Mironenko V.A., Postoev G.P., Rodionov V.N., Semenov S.M., Sergeev A.I., Timofeev D.A., Chalov R.S., Sheko A.I.* Hazardous exogenous processes. Moscow: GEOS, 1999. 290 p. (in Russian).
 14. *Petley D.* Damming events at Attabad. *International Water Power and Dam Construction*, 2011. V. 63. No 2. P. 27–29.
 15. *Schukin I.S.* General geomorphology. V. II. Moscow: Moscow University Press, 1964. 564 p. (in Russian).
 16. *Trofimov V.T., Harkina M.A., Grigorev I.J.* Ecological geodynamics. Moscow: KDU, 2008. 473 p. (in Russian).
 17. *Voskresensky I.S., Suchilin A.A.* GIS-based regional geomorphological zoning for assessment of environmental impact of major pipelines. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Protvino (Moscow region), 2016. V. 22. Part 1. P. 173–183. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-173-183 (in Russian, abs English).
 18. *Voskresensky I.S., Suchilin A.A., Ushakova L.A., Shaforostov V.M., Entin A.L.* The application of UAV for erosion and landslide processes monitoring (case study of the central part of the Russian Plane). The use of unmanned aerial vehicles in geographical research. Irkutsk: Publishing House of the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2018. P. 42–47 (in Russian).
 19. *Voskresensky S.S.* Dynamic geomorphology. The formation of the slopes. Moscow: Moscow University Press, 1971. 564 p. (in Russian).
-