Том XIV | 2/2020
Vol. XIV

ГеоРиск

GeoRisk World

ISSN 1997-8669 (Print)
ISSN 2587-8220 (Online)

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

ИГИИС

Саморегулируемая организация

АИИС

Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» – Общероссийское отраслевое объединение работодателей

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

25.00.03 – Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки);

25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки);

25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (геолого-минералогические науки);

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (физико-математические науки);

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (технические науки);

25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки);

25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки);

25.00.28 – Океанология (геолого-минералогические науки);

25.00.28 – Океанология (физико-математические науки);

25.00.31 – Гляциология и криология Земли (географические науки);

25.00.35 – Геоинформатика (географические науки);

25.00.35 – Геоинформатика (геолого-минералогические науки);

25.00.35 – Геоинформатика (технические науки);

25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (географические науки);

25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (геолого-минералогические науки).

Фото на обложке: Приток трансграничной р. Панджи, селевые потоки в котловину ледниковых скоплений на кишлак Дихко (Афганистан). Вид со стороны Таджикистана. Фото С.С. Черноморца

https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-66-76 УДК 551.435

ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ТЕХНОГЕННОЙ АКТИВИЗАЦИИ СЕЛЕЙ В 2006–2019 гг. НА ВОДОСБОРЕ ПРИТОКА РУЧ. СУЛИМОВСКИЙ (РАЙОН ПОС. КРАСНАЯ ПОЛЯНА, ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ)


Фото С.В. Шварева

ШВАРЕВ С.В.*
Институт географии РАН, г. Москва, Россия, shvarev@igras.ru
Адрес: Старомонетный пер., д. 29, г. Москва, 119017, Россия
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия, shvarev@ifz.ru
Адрес: ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

ХАРЧЕНКО С.В.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, xar4enkkoff@yandex.ru
Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия
Институт географии РАН, г. Москва, Россия

ГОЛОСОВ В.Н.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, gollossov@gmail.com
Институт географии РАН, г. Москва, Россия

УСПЕНСКИЙ М.И.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, kizyalleski@gmail.com

Оригинальная статья
Поступила в редакцию 20.05.2020 / Принята к публикации 24.06.2020 / Дата публикации 30.06.2020

Аннотация: одной из основных задач представленного исследования является количественная оценка вклада современных климатических изменений и усиления антропогенного влияния в увеличение доли бассейновой составляющей в стоке наносов рек. В качестве тестового полигона был выбран участок на левом борту долины р. Мзымта в районе горного курорта «Роза Хутор». Эта территория обладает характерными чертами, позволяющими оценить основные факторы, влияющие на денудацию. С одной стороны, участок типичен по показателям современных климатических изменений. С другой — подвержен интенсивным тектоническим воздействиям, активизирующим крупномасштабные смещения склонового чехла. А с третьей стороны — участок является ареной интенсивного техногенного воздействия с четкими временными маркерами, один из которых — этап освоения территории в ходе подготовки зимних Олимпийских игр 2014 г. и последующего развития инфраструктуры и спортивно-туристических объектов. В пределах тестового полигона выбран типичный малый водосбор (правый приустьевой приток руч. Сулимовский), на примере которого осуществлена количественная оценка изменений рельефа и интенсивности денудационно-аккумулятивных процессов с применением дистанционного мониторинга и цифрового моделирования. По результатам съемки с помощью беспилотного летательного аппарата и дифференциальной системы GPS составлены ортофотопланы и цифровые модели местности ключевого участка. Для селевого водосбора дана оценка трансформации его площади, обусловленная сооружением дорог и инфраструктурных объектов. На основе сопоставления трехмерных цифровых моделей на момент времени перед началом строительства и на сентябрь 2019 г. определены объемы (с различной точностью в зависимости от детальности моделей) механического перемещения грунта и денудации за счет активизации склоновых и водно-эрозионных процессов. Данные дешифрирования верифицированы на местности, а затем на их основе определены главные причины активизации денудационных процессов, локализованы опасные участки и даны рекомендации по исправлению ситуации.

Ключевые слова: малый водосбор; техногенная активизация селей; беспилотный летательный аппарат (БПЛА); цифровая модель рельефа (ЦМР); цифровая модель местности (ЦММ); дистанционный мониторинг; р. Мзымта; Роза Хутор

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-17-00181 и по теме Госзадания № 0148-2019-0005 Института географии РАН.

Ссылка для цитирования: Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И., 2020. Причины и последствия техногенной активизации селей в 2006–2019 гг. на водосборе притока руч. Сулимовский (район пос. Красная Поляна, Западный Кавказ). ГеоРиск, Том XIV, № 2, с. 66–76, https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-66-76.

CAUSES AND CONSEQUENCES OF DEBRIS FLOW TECHNOGENIC ACTIVATION IN 2006–2019 IN THE CATCHMENT OF THE SULIMOVSKY STREAM TRIBUTARY (KRASNAYA POLYANA REGION, WESTERN CAUCASUS)

SERGEY V. SHVAREV*
Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia; shvarev@igras.ru
Address: Bld. 29, Staromonetny Ln., 119017, Moscow, Russia
Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia; shvarev@ifz.ru
Address: Bld. 10, Pde 1, Bolshaya Gruzinskaya St., 123242, Moscow, Russia

SERGEY V. KHARCHENKO
Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; xar4enkkoff@yandex.ru
Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia
Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

VALENTIN N. GOLOSOV
Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; gollossov@gmail.com
Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

MAXIM I. USPENSKY
Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; kizyalleski@gmail.com

Original paper
Received 20 May 2020 / Accepted 24 June 2020 / Published 30 June 2020

Abstract: one of the main tasks of the study is to quantify the contribution of modern climate changes and enlarged anthropogenic pressure to the increase in the share of the basin component of river sediment runoff. The area on the left side of the Mzymta river valley close to the Rosa Khutor resort was chosen as a test site for research. The area has characteristic features that allow us to assess the main factors affecting denudation. On the one hand, the site is typical in terms of modern climate change. On the other hand, it is subject to intense tectonic influences that activate large-scale displacements of the slope cover. On the third hand, the site is intensively affected by the technogenic factors with clear time markers, one of which is the stage of development of the territory during the preparation of the 2014 Olympics and the subsequent development of infrastructure and sports and tourist facilities. A typical small catchment area within the test polygon (the right tributary of the Sulimovsky Stream), was selected using the features of its structure. The quantitative assessment of changes in terrain and intensity of denudation-accumulative processes was performed using remote monitoring and digital modelling. Orthophotographs and digital elevation models of key sites were compiled using unmanned aerial vehicle and DGPS. Transformation of the debris flow catchment caused by the construction of roads and infrastructure facilities was estimated on the comparison of the digital elevation models at the time before construction and in September 2019. The volumes of mechanical movement of soil and denudation due to the activation of slope and water-erosion processes were determined (with varying accuracy depending on the detail of the digital elevation model). Data interpretation was verified on the ground. Based on them, the main reasons for the activation of denudation processes were identified, areas with a dangerous situation were localized, and recommendations were made to correct the situation.

Key words: small catchment area; technogenic activation of debris flows; unmanned aerial vehicle (UAV); digital elevation model (DEM); digital surface model (DSM); remote monitoring; Mzymta River; Rosa Khutor

Acknowledgments: the research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 19-17-00181 and performed as part of a government assignment No. 0148-2019-0005 of the Institute of Geography, Russian Academy of Sciences.

For citation: Shvarev S.V., Kharchenko S.V., Golosov V.N., Uspensky M.I., 2020. Causes and consequences of debris flow technogenic activation in 2006–2019 in the catchment of the Sulimovsky Stream tributary (Krasnaya Polyana region, Western Caucasus). GeoRisk World, Vol. XIV, No. 2, pp. 66–76, https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-66-76.

Введение

Долина р. Мзымта (Западный Кавказ) обладает высоким потенциалом развития опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП), обусловленным высококонтрастным рельефом, слабоустойчивым состоянием скальных грунтов, большим объемом рыхлого чехла, значительным количеством осадков, высокими скоростями вертикальных тектонических движений и сильной сейсмичностью. Крупные селевые и оползневые катастрофы являются серьезным рельефообразующим фактором, который в природных условиях исследуемого района проявляется относительно редко, и связаны с исключительными гидрометеорологическими или сейсмотектоническими событиями. До определенной степени устойчивое состояние здесь поддерживалось естественным растительным покровом, регулирующим распределение поверхностного и подземного стока воды. Однако активное строительство на склонах хребта Аибга привело к масштабным преобразованиям естественных ландшафтов на исследуемом водосборе и кардинально изменило режим формирования стока на водосборах ручьев-притоков разной водности, дренирующих левобережную часть р. Мзымта в районе с. Эсто-Садок и выше по течению вплоть до впадения р. Пслух. Перестройка малых водосборов, произошедшая в связи с сооружением ряда объектов инфраструктуры, многократное увеличение и искусственная локализация поверхностного стока привели к резкой активизации геоморфологических процессов, в частности, селевых.

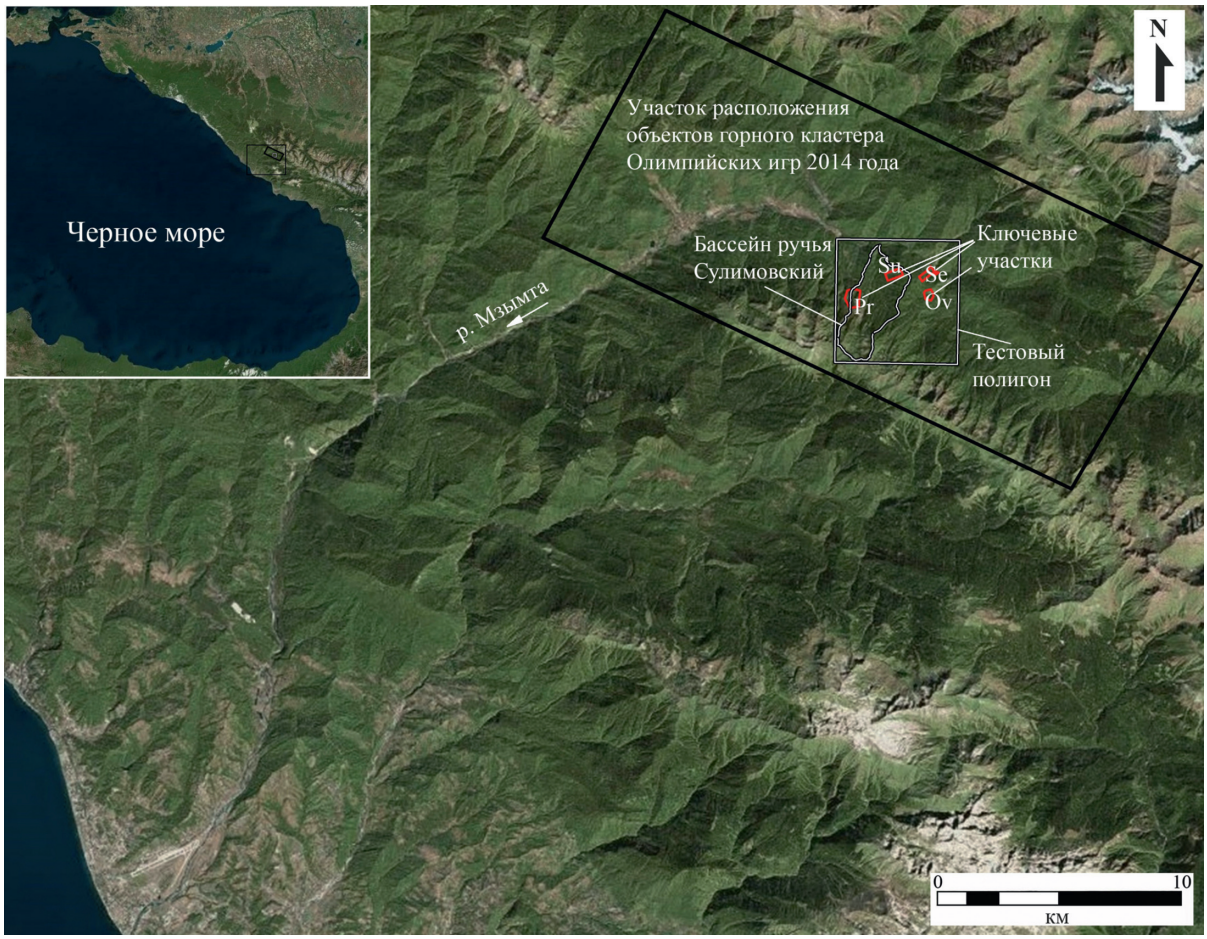

Рис. 1. Схема расположения тестового полигона и ключевых участков. *Обозначения*: Su — участок «Сулимовский», Se — участок «Селевой», Ov — участок «Овражный», Pr — участок «Притрассовый»

Fig. 1. Scheme of the test polygon (white rectangle) and key sites (red outlines). *Designations*: Su — "Sulimovsky" site, Se — "Selevoy" site, Ov — "Ovrazhny" site, Pr — "Pritrassovy" site, white outline — Sulimovsky Stream catchment

Следы их деятельности (несортированные наносы по днищам небольших долин и лотков, поваленный лес, глубокие врезы, сопровождаемые оползнями) регистрируются по всей периферии отрога хребта Аибга, на северном склоне которого обустроена горная Олимпийская деревня (абсолютные отметки — 1100–1250 м).

Основной целью представленного исследования является количественная оценка антропогенных изменений растительного покрова и рельефа на исследуемой территории с акцентом на результаты детальных исследований на водосборе притока руч. Сулимовский за период его активного освоения (2006–2019 гг.) в сопоставлении с выявленной активизацией экзогенных процессов, ведущую роль среди которых играют селевые.

Объекты исследования

Район исследований расположен на левом борту долины р. Мзымта и включает тестовый полигон площадью $S = 25{,}20$ км^2 с несколькими объектами мониторинга: бассейн руч. Сулимовский ($S = 6{,}90$ км^2), бассейн его правого притока в районе горного курорта «Роза Хутор» ($S = 0{,}80$ км^2) и четыре ключевых участка для детальных исследований — «Сулимовский» (далее Su, $S = 0{,}20$ км^2), «Селевой» (далее Se, $S = 0{,}16$ км^2), «Овражный» (далее Ov, $S = 0{,}13$ км^2) и «Притрассовый» (далее Pr, $S = 0{,}38$ км^2). Участки выбраны с учетом естественной иерархии и «ярусного» моделирования на четырех уровнях в следующих масштабах: 1:25 000–1:10 000; 1:10 000–1:5000; 1:5000–1:2500; 1:2500–1:1000 (рис. 1).

Развитие селевых процессов на территории исследований определяется благоприятным сочетанием ландшафтных, геоморфологических, климатических и геологических факторов [1, 6]. В естественных условиях в постоянном (с ежегодной активизацией) и короткопериодичном (до первых десятков лет) режиме здесь развиваются обвально-осыпные, лавинные, солифлюкционные процессы в верхних ярусах рельефа и оползневые, селевые и эрозионные — в средних и нижних. При этом площадь регулярно поражаемых территорий не превышает первых процентов от общей площади.

Морфологически выраженные оползневые и селевые формы занимают значительную часть площади долины р. Мзымта и водосборов ее притоков, прилегающих к тестовому полигону [9] (рис. 2). Очевидно, что крупнейшие из таких систем оказывали в голоцене значительное влияние на аккумулятивно-денудационный режим, создавая плотины в днищах с подпрудными водоемами, аккумулирующими водные и кластические массы. Мощнейшие из таких парагенетически взаимосвязанных и «синдинамичных» (по [8]) систем перекрывают днища долин рр. Мзымта и Пслух [9] и связаны с сильными землетрясениями [10]. К сейсмогенерирующим структурам в районе исследований относятся Мзым-

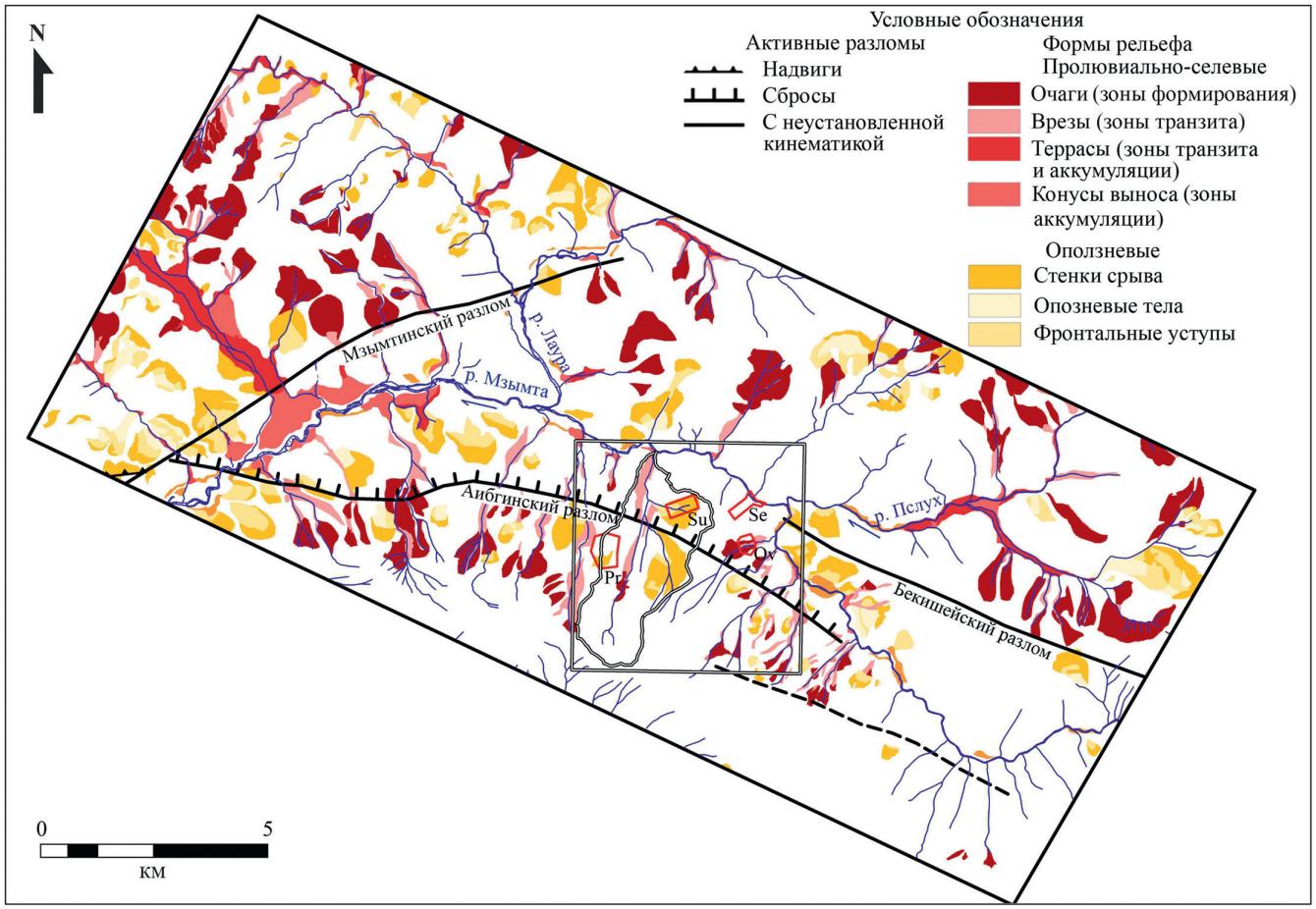

Рис. 2. Схема соотношения активных тектонических структур и проявлений ЭГП (с изменениями) [4, 9]. *Обозначения*: серый прямоугольник — тестовый полигон; серый контур — бассейн руч. Сулимовский; Su, Se, Ov, Pr — см. рис. 1

Fig. 2. Relationship of active tectonic structures and exogenic processes manifestations (with alterations) [4, 9]. *Designations*: grey rectangle — test site; grey outline — Sulimovsky Stream catchment; Su, Se, Ov, Pr — see fig. 1

тинский, Бекишейский и Аибгинский активные разломы [4, 5], два из которых непосредственно пересекают тестовый полигон. Для Аибгинского разлома установлена величина вертикальных смещений в голоцене около 80 м [3]. В оценке режима крупнейших оползневых и селевых катастроф можно опираться на данные, свидетельствующие о нескольких генерациях оползней [7], смещение которых происходило четыре раза за последние 4 тыс. лет [4], что соответствует тектонической активизации с периодом 1 тыс. лет.

Не является исключением и водосбор руч. Сулимовский, правобережные притоки которого начинаются в крупных оползневых цирках, а основное русло обладает типичными для воздействия селей чертами рельефа: транзитный селевой лоток в верхней части, терраса и конус выноса в устье. Морфологически выраженные черты крупнейших форм экзогенной геодинамики практически не проявляются в почвенно-растительном покрове, что свидетельствует об их редко-периодическом проявлении, при котором происходит полное восстановление леса.

Кроме единичных и редко-периодических крупнейших селевых и оползневых проявлений, практически все долины притоков р. Мзымта характеризуются как селеопасные в естественном состоянии [1]. В зависимости от объема перемещенной массы сели формируются с частотой от нескольких раз в год до одного раза в несколько десятилетий, демонстрируя преобладающую зависимость от гидрометеорологических условий [1]. В последнее время частота схода селей возросла, что связывается с антропогенным воздействием, в частности, неконтролируемым складированием строительных материалов и отвалов грунта при строительстве [1, 2]. Очевидно, что значительное пространственное развитие и увеличенная частота проявлений в последнее время как селей, так и других типов экзогенных процессов одной этой причиной не ограничиваются, а связаны с комплексной антропогенной трансформацией территории.

Материалы и методы

Оценка воздействия антропогенной деятельности на активизацию ЭГП, мониторинг и расчет изменений в режиме денудации выполнены на основе сравнения иерархически соподчиненных бассейнов. Масштабный диапазон исследований (от 1:1000 до 1:25 000) лимитируется, с одной стороны, пространственным разрешением (~ 0,5 м) для оценки взаимодействия элементов структуры естественных и искусственных объектов, а с другой стороны — потребностями анализа селевых водосборов как единых систем. Временной диапазон ограничивается началом активного освоения (2006 г.) и актуальным состоянием (сентябрь 2019 г.). Для сравнения использованы материалы аэрофотосъемки и лазерного сканирования 2006 г. (выполнены ООО «Инжгео», г. Краснодар), космических съемок 2019 г. (находятся

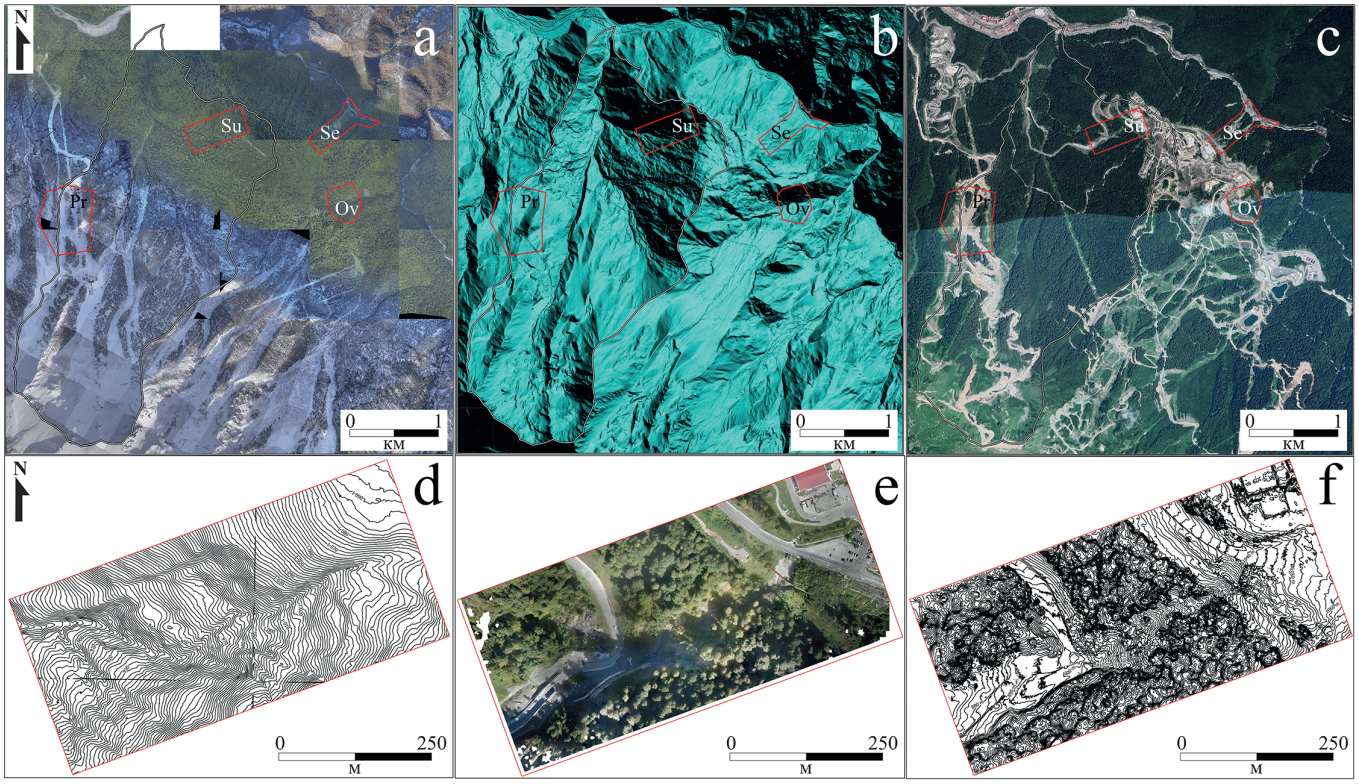

Рис. 3. Исходные материалы для анализа тестового полигона (a, b, c) и участка «Сулимовский» (d, e, f): a — ортофотомозаика, созданная по материалам аэрофотосъемки 2006 г.; b — ЦМР, созданная по результатам лазерного сканирования (выполнено в 2006 г. ООО «Инжгео», г. Краснодар); c — мозаика космоснимков сверхвысокого разрешения (сервис Google Earth, съемка 2019 г.); d — топографическая схема с сечением горизонталей 2 м, созданная по материалам лазерного сканирования (2006 г.); e — ортофотомозаика, созданная по материалам съемки БПЛА (сентябрь 2019 г.); f — топографическая схема с сечением горизонталей 2 м, созданная по материалам съемки БПЛА (сентябрь 2019 г.). *Обозначения*: Su, Se, Ov, Pr — см. рис. 1

Fig. 3. Initial data for analysis of the test polygon (a, b, c) and "Sulimovsky" site (d, e, f): a — orthophotomosaic based on the 2006 aerial survey; b — DEM based on the results of the LIDAR survey (performed by Injgeo LLC, Krasnodar, 2006); c — mosaic of high-resolution satellite images (Google Earth service, 2019 survey); d — topographic scheme with 2 m contour lines based on the results of 2006 LIDAR survey; e — orthophotomosaic based on UAV survey (September 2019); f — topographic scheme with 2 m contour lines based on the results of UAV survey (September 2019). *Designations*: Su, Se, Ov, Pr — see fig. 1

в открытом доступе на сервисе Google Earth) и авторских съемок с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Mavic Pro.

На основе аэрофото- и космических снимков (космоснимков) построены ортофотопланы на 2006 и 2019 гг., а на базе материалов лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА — цифровые модели рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ), соответственно (рис. 3). В целях создания ЦММ установлены реперы по данным съемки дифференциальной системой GPS (DGPS). Для верификации данных дешифрирования выполнены рекогносцировочные маршруты и обследования ключевых участков. Оценка антропогенной трансформации и экзогенной динамики, изменение пространственной структуры бассейнов и отдельных водотоков, расчет изменений площадей и объемов перемещенного материала проведены на основе сопоставления и точного совмещения ортофотопланов с использованием геоинформационных (ГИС) технологий на всех иерархических уровнях, а с использованием ЦМР и ЦММ — на ключевых участках.

Результаты исследований

Тестовый полигон и бассейн руч. Сулимовский

По состоянию на 2006 г. антропогенное воздействие (рис. 4, *a*) затронуло около 5% площади тестового полигона и было распределено неравномерно с максимумом в его западной части, где на тот момент существовали объекты горнолыжной инфраструктуры. Следы активных экзогенных процессов (рис. 4, *b*) занимали около 0,1%. К 2019 г. антропогенная трансформация продвинулась в верхние (южные) участки полигона и на восток (рис. 4, *c*). Площадь измененных ландшафтов выросла в 5,5 раз (с 1,27 до 6,89 км^2) и достигла 27%, а по отдельным бассейнам увеличилась в 40–45 раз. При этом произошло резкое количественное увеличение по отдельным показателям (открытый грунт), достигающее 30 раз. В результате к перечню проявлений ЭГП добавились оползни, осыпи и овраги, а также резко увеличились (до 7 раз) пораженные ими площади, достигнув в сумме 0,8% площади тестового полигона, а по бассейнам руч. Сулимовский и его правого притока — до 1,3 и 4% соответственно. В целом можно констатировать, что комплексная антропогенная трансформация, достигающая 10% территории при данных типах и параметрах воздействия, и природных условиях, вызывает активизацию ЭГП на 0,1% площади; трансформированность 25–30% — около 1,0–1,5% пораженности и около 50% трансформированности — до 4% пораженности.

Бассейн правого притока руч. Сулимовский и ключевой участок «Сулимовский»

Эта часть исследуемой территории особенно интересна в свете ее макси-

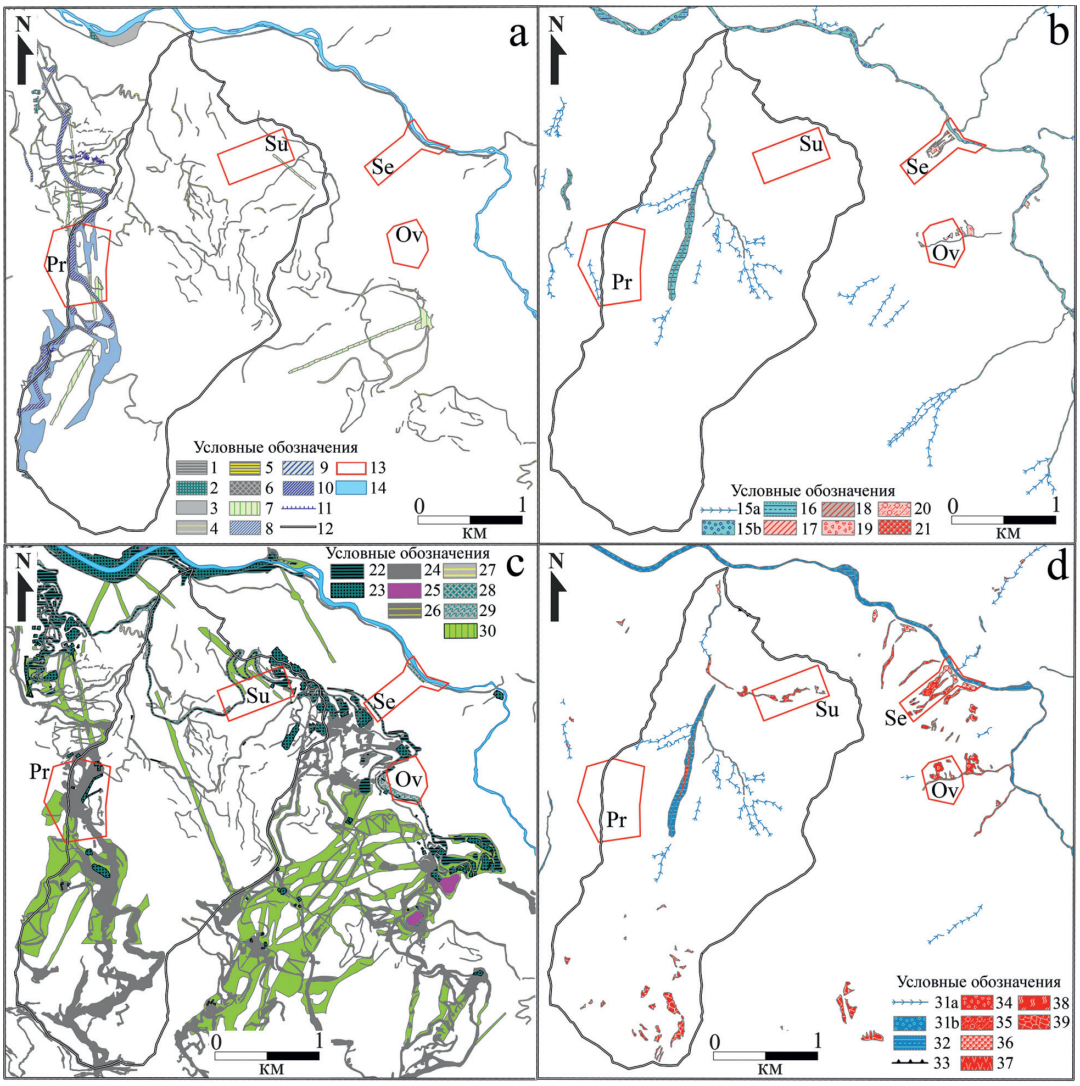

Рис. 4. Аналитические схемы тестового полигона по результатам интерпретации дистанционной информации. Ситуация на 2006 г.: a — антропогенная нарушенность; b — активные проявления ЭГП. Ситуация на 2019 г.: c — антропогенная нарушенность; d — активные проявления ЭГП. *Обозначения*: 1, 22 — участки с твердым искусственным покрытием (преимущественно автодороги); 2, 23 — участки со смешанным покрытием (дороги, капитальные строения, инженерные сооружения); 3, 24 — участки со снятым почвенно-растительным покровом (грунтовые дороги, строительные площадки и пр.); 4, 26 — вырубки под линейные сооружения; 5, 27 — дорожные полки; 6 — дорожные насыпи; 7, 30 — вырубки площадные; 8 — вырубки под горнолыжные трассы; 9 — откосы горнолыжных трасс; 10 — спланированные (выровненные) площадки горнолыжных трасс; 11 — защитные террасы на склонах; 12 — граница бассейна руч. Сулимовский; 13 — границы ключевых участков; 14 — русло р. Мзымта; 15, 31 — участки активной русловой эрозии (15a, 31a — мелких ручьев; 15b, 31b — крупных рек); 16, 32 — участки пойменной аккумуляции и периодического селевого транзита; 17, 33 — активные оползневые и эрозионные уступы; 18 — неактивные оползневые и эрозионные уступы; 19, 34 — участки комплексной склоновой денудации (оползневые, осыпные, эрозионные); 20, 35 — селевые русла; 21, 36 — селевые конусы выноса; 25 — пруды; 28 — защитные галереи; 29 — насыпи; 37 — овраги; 38 — оползни; 39 — скальные осыпи

Fig. 4. Analytical schemes based on the results of remote information interpretation. Situation for 2006: a — anthropogenic transformation; b — active manifestations of exogenic processes. Situation for 2019: c — anthropogenic transformation; d — active manifestations of exogenic processes. *Designations*: 1, 22 — areas with hard artificial surface (mainly roads); 2, 23 — areas with a mixed surface (roads, capital buildings, and engineering structures); 3, 24 — areas with removed soil and vegetation cover (dirt roads, construction sites, etc.); 4, 26 — clearcuttings for linear facilities; 5, 27 — road shelves; 6 — road embankments; 7, 30 — area clearcuttings; 8 — clearcuttings for ski pistes; 9 — side slopes of ski pistes; 10 — levelled ski pistes; 11 — protective terraces on the slopes; 12 - borders of the Sulimovsky Stream catchment; 13 — borders of key sites; 14 — riverbed of the Mzymta River; 15, 31 — areas of an active channel erosion (15a, 31a — small streams; 15b, 31b — large rivers); 16, 32 — areas of floodplain accumulation and occasional debris flow transit; 17, 33 — active landslide and erosion ledges; 18 — inactive landslide and erosion ledges; 19, 34 — areas of complex slope denudation (landslides, tallus, and erosion); 20, 35 — debris flow channels; 21, 36 — debris flow fans; 25 — ponds; 28 — road galleries; 29 — road embankments; 37 — gullies; 38 — landslides; 39 — taluses; Su, Se, Ov, Pr — see fig. 1

мальной трансформированности (более 50%) и пораженности (4,1%) (рис. 5).

Анализ дистанционной информации — ортофотоплана (см. рис. 3, *e*) и ЦМР (см. рис. 3, *b*) — выявил пространственно взаимосвязанный комплекс эрозионно-селевых процессов, активизация которых обусловлена нерациональной антропогенной деятельностью. Исследуемый участок можно подразделить на три сегмента: 1) верхний, в пределах которого сток с площа-

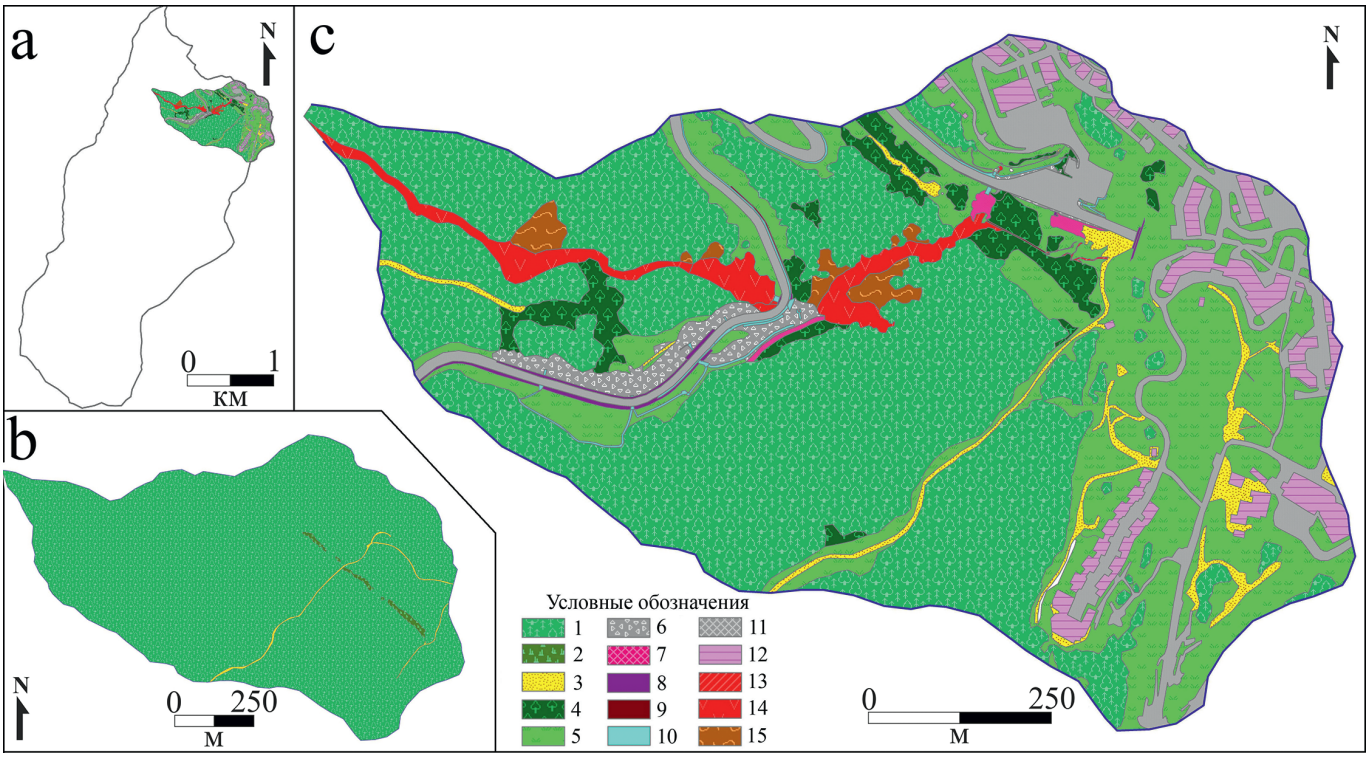

Рис. 5. Ситуационные схемы по результатам дешифрирования дистанционной информации: a — расположение бассейна правого притока руч. Сулимовский; b — 2006 г.; c — 2019 г. *Обозначения*: 1 — древесная растительность; 2 — вырубки с нарушенным почвенно-растительным покровом; 3 — участки со снятым почвенно-растительным покровом (грунтовые дороги, строительные площадки и пр.); 4 — кустарниковая растительность и мелколесье; 5 — луговая растительность и искусственные посадки (газоны); 6 — отсыпки щебня, отвалы; 7 — участки с укрепленным грунтом (габионы, анкеры и пр.); 8 — капитальные защитные сооружения; 9 — капитальные заборы и ограждения; 10 — капитальные водоотводные и водопропускные сооружения; 11 — участки с твердым покрытием (асфальт, бетон); 12 — капитальные здания и сооружения; 13 — активные эрозионные врезы (овраги, промоины); 14 — селевое русло; 15 — эрозионно-оползневые склоны

Fig. 5. Situational schemes based on the remote data interpretation: a — location of the catchment of the Sulimovsky Stream right tributary; b — 2006; c — 2019. *Designations*: 1 — woody vegetation; 2 — clearcuttings with disturbed soil and vegetation cover; 3 — areas with removed soil and vegetation cover (dirty roads, construction sites, etc.); 4 — shrub vegetation and small-forestry; 5 — grassland vegetation and artificial plantings (lawns); 6 — fine gravel deposits, dumps; 7 — areas with strengthened soil (gabions, anchors, etc.); 8 — capital protective structures; 9 — capital fences; 10 — capital drainage and culverts; 11 — areas with a hard surface (asphalt, concrete); 12 — capital buildings and structures; 13 — active erosion (gullies, ravines); 14 — debris flow channel; 15 — erosion and landslide slopes

ди, занимаемой горным курортом «Роза Хутор», концентрируется инженерными сооружениями и отводится в естественные русловые формы; 2) средний, в пределах которого сток осуществляется естественным способом в русле притока руч. Сулимовский и 3) нижний, где сток искусственно перераспределяется с локализацией под мостовым переходом и отводом вдоль склона долины.

В пределах верхнего сегмента сток в вершину притока руч. Сулимовский осуществляется двумя путями: а) в западной части сток локализован водопропускным сооружением под дорогой; б) в восточной части определяется случайным переливом с полотна автодороги. Несоответствие водопропускных сооружений объемам стока в первом случае приводит к размыву водобойного колодца над водопропуском и габионного крепления склона под водопропуском. Во втором случае случайный сброс вод вдоль полотна автодороги приводит к размыву укрепления откоса и русловым врезам, которые, сливаясь ниже откоса, концентрируются вдоль подпорной стенки с ее частичным разрушением.

В пределах среднего сегмента русла суммируемый сток провоцирует интенсивную глубинную эрозию, сопровождаемую боковыми размывами, блоковыми оползнями и сплывами. Значительный объем размываемого материала аккумулируется в нижней части сегмента участка перед мостом. Мостовой переход в верхней (по течению) части нарушается ударным воздействием селевых потоков и сопровождающими врезание русла оползнями. Боковой водоотвод, предназначенный для перераспределения стока, находится в подвешенном состоянии и не осуществляет запроектированных функций.

В пределах нижнего сегмента локализация стока под мостовым переходом провоцирует развитие глубинной эрозии, оползней и селей ниже по течению от моста. Основное русло подрезает основание моста, а боковые отвершки приближаются к полотну автодороги.

Сравнение ЦМР, полученной по результатам лазерного сканирования 2006 г., и ЦММ по результатам съемки с БПЛА 2019 г. позволило выявить изменения планового положения основного русла и притоков (рис. 6, *b*, I–III), а также его продольного профиля (рис. 6, *c*), свидетельствующие об углублении русла до 10–15 м на отрезке протяженностью около 400 м ниже организованного водосброса. Изменения рельефа, обусловленные преимущественно механическим изъятием грунта, достигают величин 25 м и более (рис. 6, *b*, IV). Среднее изменение высот на площади 68 тыс. м^2 составляет 9,7 м. Для расчета объема денудации была

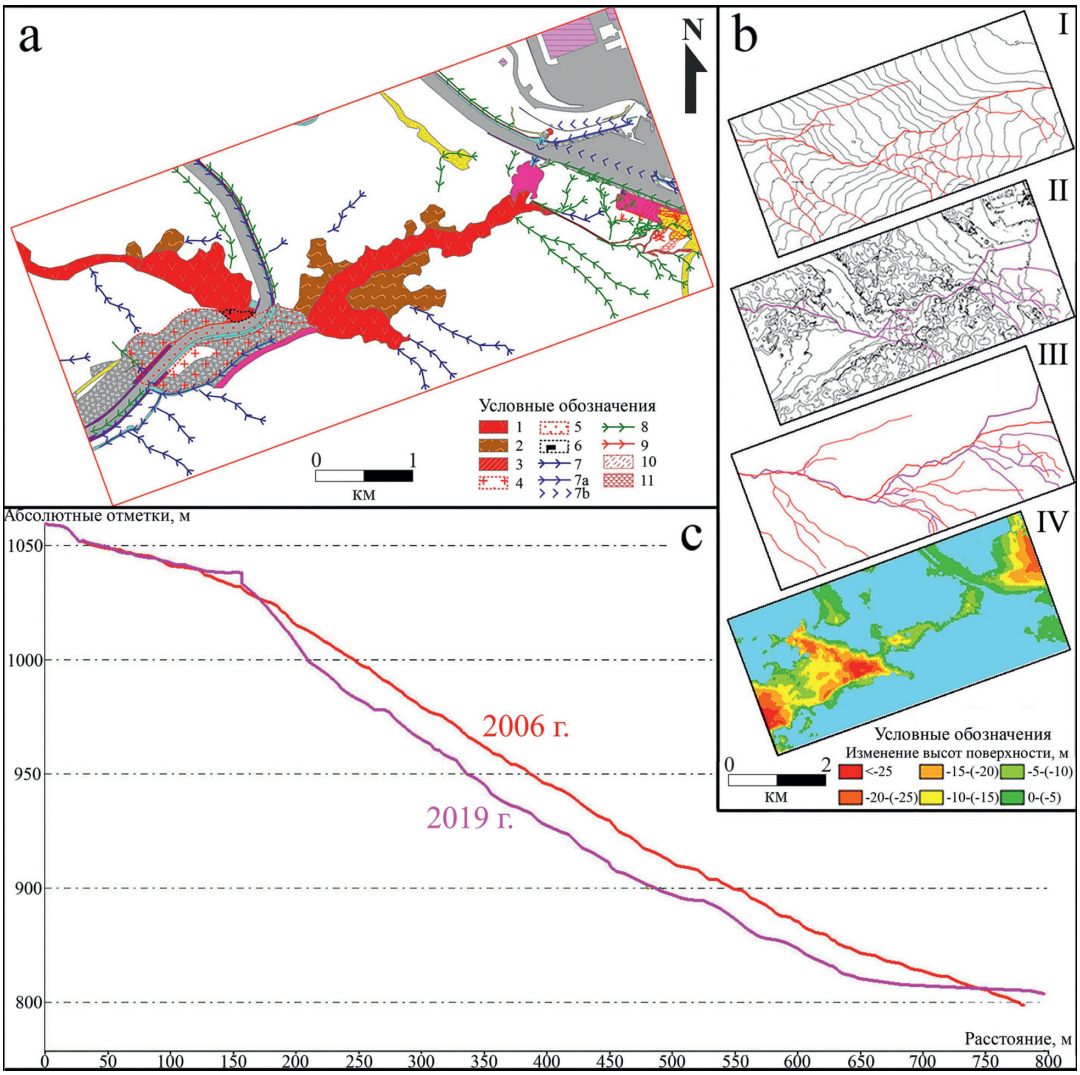

Рис. 6. Развитие эрозионно-селевых процессов в бассейне правого притока руч. Сулимовский: a — схема дешифрирования взаимоотношений ЭГП и антропогенных объектов на сентябрь 2019 г.; b — развитие эрозионной сети; c — изменение продольного профиля основного русла правого притока руч. Сулимовский на ключевом участке «Сулимовский» за 2006–2019 гг. *Обозначения*: 1 — селевое русло; 2 — эрозионно-оползневые склоны; 3 — активные овраги; 4 — фрагменты естественной поверхности селевого конуса выноса; 5 — участки расчищенного конуса выноса; 6 — эродированный участок конуса выноса; 7 — фрагменты сохранившейся естественной системы стока (7a — поверхностного, 7b — подземного); 8 — участки техногенно локализованного (проектного) стока; 9 — участки техногенно спровоцированного (нерегулируемого) стока; 10 — активные эрозионные врезы, борозды; 11 — участки площадного смыва; I — по состоянию на 2006 г. (сечение горизонталей 2 м); II — по состоянию на 2019 г. (сечение горизонталей 2 м); III — сравнительная схема русел водотоков в 2006 и 2019 гг.; IV — схема изменения высоты поверхности по результатам сравнения ЦМР 2006 г. и ЦММ 2019 г.

Fig. 6. Development of erosion-debris flow processes in the catchment of the Sulimovsky Stream right tributary: a — scheme of the relationship of exogenic processes and anthropogenic objects for September 2019; b — state and dynamics of the erosion network; c — changing the main channel profile on the "Sulimovsky" site, 2006–2019. *Designations*: 1 — debris flow channel; 2 — erosion-landslide slopes; 3 — active gullies; 4 — fragments of the natural surface of the debris flow fan; 5 — sections of the cleared debris flow fan; 6 — eroded section of the debris flow fan; 7 — fragments of the preserved natural runoff system (7a — surface, 7b — underground); 8 — sections of technogenically localized (project) runoff; 9 — areas of technogenically provoked (unregulated) runoff; 10 — active erosion gullies, furrows; 11 — areas of washout; I — as of 2006 (2 m contour lines); II — as of 2019 (2 m contour lines); III — comparative scheme of channel configuration in 2006 and 2019; IV — change of surface altitudes obtained by the comparison of 2006 DEM and 2019 DSM

взята погрешность в 2 м. Итоговый объем изъятого материала (природными и антропогенными процессами) за 13 лет составляет 660 тыс. м^3 с погрешностью в ±150 м^3. При общей площади бассейна около 0,8 км^2 средний показатель денудационного среза составляет ~ 0,8 м^3/1 м^2 или удаленный слой мощностью ~ 80 см (~ 6 см/год).

По-видимому, активизации эрозионно-селевой деятельности способствовало не только увеличение объема поверхностного стока и его концентрация в верхней части русла, но и углубление местного базиса эрозии на уровне полки дорожного полотна, где отмечаются остатки селевого конуса выноса частично расчищенного, а частично прорезанного более поздней эрозией.

В ходе рекогносцировочных маршрутных исследований (рис. 7) были выявлены участки активного развития селевых, оползневых, обвальных процессов и подтверждены причинно-следственные связи между их активизацией и антропогенной деятельностью. Опре-

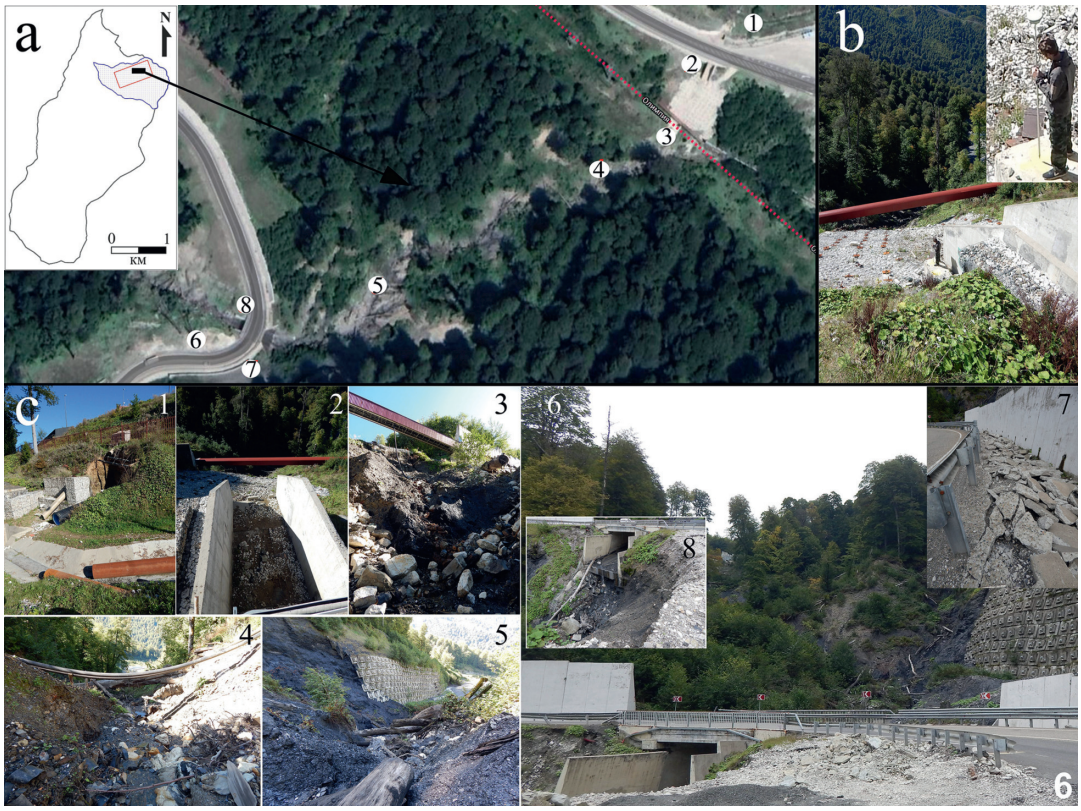

Рис. 7. Наземные исследования на ключевой площади участка «Сулимовский» с активизацией селевых процессов вследствие антропогенного воздействия (сентябрь 2019 г.): a — расположение ключевой площади в иерархической структуре бассейнов (бассейн руч. Сулимовский — бассейн его правого притока — ключевой участок «Сулимовский» — ключевая площадь), номера точек соответствуют фотографиям на рис. 7, c; b — организация дистанционной съемки с БПЛА (установка репера и расчет координат для геодезической привязки дистанционной съемки); c — участки наземного обследования. *Обозначения*: 1 — искусственный водосбор, активный размыв под трубой на склоне; 2 — бетонный водосбросовый лоток под полотном дороги; 3 — верхняя часть селевого вреза под водосбросовым лотком, разрушение анкерного крепления под лотком, боковой размыв под трубой по левому борту; 4 — селевой врез в верхней части, размыв основания водопроводной трубы; 5 — селевой врез в средней части выше дорожного полотна; 6 — участок пересечения притока руч. Сулимовский и дороги, селевой врез на контакте с анкерным противооползневым креплением; 7 — коробление бетонных плит над водопропускным лотком из-за оползневого смещения полотна дороги; 8 — активный размыв основания водопропускного сооружения под полотном автомобильной дороги

Fig. 7. Ground survey on the key area of the "Sulimovsky" site with the activation of debris flow processes under the anthropogenic influence (September 2019): a — location of the key area in the hierarchical structure of the basins (Sulimovsky Stream catchment — its right tributary catchment — key site "Sulimovsky" — key area), point numbers correspond to the photos on the fig. 7, c; b — organization of remote UAV survey (setting a reference point and calculating coordinates for geodetic reference of remote survey); c — points of the ground survey. *Designations*: 1 — artificial catchment, active erosion under the pipe on the slope; 2 — concrete spillway tray under the roadbed; 3 — upper part of the debris flow erosion under spillway tray, the destruction of anchoring under the tray, and lateral erosion under the pipe on the left side; 4 — debris flow erosion in the upper part, destruction of the base of a water pipe; 5 — debris flow erosion in the middle part above the roadway; 6 — area of intersection of Sulimovsky Stream tributary and road, debris flow erosion into contact with the anti-landslide anchoring; 7 — warping concrete slabs over culverts tray due to landslide displacement of the roadbed; 8 — active erosion of the base of the culverts under the roadbed

делены основные факторы антропогенного воздействия на активизацию процессов: 1) целенаправленная концентрация стока водосборными сооружениями; 2) случайная концентрация стока дорожной сетью и другими инженерными сооружениями; 3) увеличение поверхностного стока из-за твердого искусственного покрытия; 4) увеличение поверхностного стока из-за снятия естественного почвенно-растительного покрова; 5) подрезка склонов дорожными полками и выемками, а также горнолыжными трассами; 6) перераспределение стока с водонасыщением оползнеопасных склонов. Выявлены участки нерационального строительства, как играющие активную провоцирующую роль, так и не работающие по назначению полностью или частично.

Выводы

Результаты совместного анализа дистанционных и наземных данных показывают, что за период 2006–2019 гг. произошло качественное и количественное (в среднем более чем в 5 раз) увеличение антропогенной трансформированности до 25–30% территории, а по отдельным бассейнам, таким как правый приток руч. Сулимовский в районе урочища Роза Хутор, этот показатель достиг максимальных величин ~ 60%. В свою очередь произошло качественное и количественное (в среднем более чем в 7 раз) увеличение пораженности ЭГП, достигшей в среднем 0,8% территории, а по бассейну притока руч. Сулимовский — 4%. Объем эродированного и вынесенного за 13 лет материала из активизированного селевого русла составляет 660 тыс. м^3, что в расчете на площадь бассейна дает денудированный слой ~ 0,8 м или ~ 6 см/год.

Установлено, что активизация селевых процессов связана с нерациональной техногенной деятельностью, включающей: 1) некорректные расчеты стока для сети водопропускных и водоотводных сооружений; 2) неправильную планировку территории, допускающую неконтролируемый поверхностный сток, сопровождаемый его значительным увеличением; 3) недоучет парагенетически взаимосвязанных процессов, интенсификация части которых приводит к саморазвитию уже целого комплекса процессов.

Интенсификация эрозионно-селевых процессов, а также значительные скорости их развития при непосредственной близости к инженерным сооружениям и транспортным коммуникациям представляют угрозу для хозяйственной деятельности и жизни людей. Решение данной проблемы возможно при принятии экстренных мер по переоценке стоковых характеристик для всей антропогенно-трансформированной территории на основе корректной численной модели, основанной на фактических данных. С ее учетом необходимо осуществить перепроектирование защитных сооружений для эффективной компенсации повышенных (в связи с естественными, природными причинами) характеристик стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В., Казакова Е.Н., Морозов Г.Л., 2013. Селевые процессы в бассейне р. Мзымта (Красная Поляна) и их влияние на территорию строительства объектов Олимпийского комплекса. Геоэкология, № 6, с. 516–529.
2. Маций С.И., Сухляева Л.А., Лесной В.А., 2018. Рекомендации по организации мониторинга селевых процессов на автомобильных дорогах (на примере участка дороги от Сулимовского ручья до с. Эсто-Садок). Геориск, Том XII, № 4, с. 58–64.
3. Несмеянов С.А., 1999. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). Научный мир, Москва.
4. Овсюченко А.Н., Меньшиков М.Ю., Рогожин Е.А., Корженков А.М., 2016. Циклы сейсмической активности во второй половине голоцена на Западном Кавказе и их связь с этапами цивилизационного развития (на примере верховьев р. Мзымта). Геофизические процессы и биосфера, Том 15, № 2, с. 5–38.
5. Овсюченко А.Н., Хилько А.В., Шварев С.В., Костенко К.А., Мараханов А.В., Рогожин Е.А., Новиков С.С., Ларьков А.С., 2013. Комплексные геолого-геофизические исследования активных разломов в Сочи-Краснополянском районе. Физика Земли, № 6, с. 116–138, https://doi.org/10.7868/S0002333713060112.
6. Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Вадачкория О.А., Ястребов А.А., 2011. Формирование и оценка инженерно-геологических условий территории строительства олимпийских объектов горного кластера в Адлерском районе г. Сочи. Геоэкология, № 1, с. 3–13.
7. Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А., 2013. Оценка и ранжирование по степени оползневой опасности участков строительства олимпийских объектов в г. Сочи. Геоэкология, № 6, с. 530–537.
8. Федоренко В.С., 1988. Горные оползни и обвалы, их прогноз. Изд-во МГУ, Москва.
9. Шварев С.В., 2009. Детальное геоморфологическое картографирование в верховьях р. Мзымты. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт, Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», Том 2, Пермь (Россия) — Гент (Бельгия), 2009, с. 462–464.
10. Шварев С.В., 2015. Анализ параметров древнего катастрофического оползня в долине реки Пслух (Западный Кавказ) с использованием данных лазерного сканирования. Геоморфология, с. 90–98, https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-4-90-98.

REFERENCES

1. Kazakov N.A., Gensiorovskii Yu.V., Kazakova E.N., Morozov G.L., 2013. Mudflow processes in the Mzymta River basin (Krasnaya Polyana) and their impact on the territory of Olympic construction. Geoecology, No. 6, pp. 516–529. (in Russian)
2. Matsiy S.I., Sukhlyaeva L.A., Lesnoy V.A., 2018. Recommendations on organization of debris flow monitoring on highways (a case study of the road section from the Sulimovsky stream to the Esto-Sadok village). Georisk, Vol. XII, No. 4, pp. 58–64. (in Russian)
3. Nesmeyanov S.A., 1999. Geomorphological aspects of Paleolithic paleoecology of the Western Caucasus. Nauchniy mir, Moscow. (in Russian)
4. Ovsyuchenko A.N., Menshikov M.Yu., Rogozhin E.A., Korzhenkov A.M., 2016. Cycles of seismic activity in the second half of Holocene in the Western Caucasus and their correlation with stages of civilization development (a case study of upper part of the Mzymta River). Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, Vol. 15, No. 2, pp. 5–38. (in Russian)
5. Ovsyuchenko A.N., Khilko A.V., Shvarev S.V., Kostenko K.A., Marakhanov A.V., Rogozhin E.A., Novikov S.S., Larkov A.S., 2013. Complex geological-geophysical study of active faults in the Sochi-Krasnaya Polyana region. Izvestiya. Physics of the Solid Earth, No. 6, pp. 116–138, https://doi.org/10.7868/S0002333713060112.
6. Osipov V.I., Mamaev Yu.A., Vadachkoriya O.A., Yastrebov A.A., 2011. Development and assessment of engineering geological conditions in the mountain site of Olympic construction area, Adler Region, Sochi. Environmental Geoscience, No. 1, pp. 3–13. (in Russian)
7. Osipov V.I., Mamaev Yu.A., Yastrebov A.A., 2011. Assessment and ranking by landslide hazard degree of the Olympic construction sites in Sochi. Geoecology, No. 6, pp. 530–537. (in Russian)

8. Fedorenko V.S., 1988. Mountain landslides and rockfalls, their forecast. Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
9. Shvarev S.V., 2009. Detailed geomorphological mapping in the upper reaches of the Mzymta River. Sustainable development of territories: GIS theory and practice, Proceedings of the International Conference “InterCarto. InterGIS”, Vol. 2, Perm (Russia) — Ghent (Belgium), 2009, pp. 462–464. (in Russian)
10. Shvarev S.V., 2015. Analysis of the parameters of the ancient catastrophic landslide in the valley of the river Psluh (Western Caucasus) using laser scanning data. Geomorfologiya, No. 4, pp. 90–98, https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-4-90-98. (in Russian)

Информация об авторах

ШВАРЕВ СЕРГЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ
Заведующий лабораторией геоморфологии Института географии РАН, г. Москва, Россия; ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмической опасности отделения природных, природно-техногенных катастроф и сейсмичности Земли Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, к.т.н., г. Москва, Россия

ХАРЧЕНКО СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ
Старший научный сотрудник кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; старший научный сотрудник лаборатории геоморфологии Института географии РАН, к.г.н., г. Москва, Россия

ГОЛОСОВ ВАЛЕНТИН НИКОЛАЕВИЧ
Ведущий научный сотрудник лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; главный научный сотрудник лаборатории геоморфологии Института географии РАН, д.г.н., г. Москва, Россия

УСПЕНСКИЙ МАКСИМ ИГОРЕВИЧ
Бакалавр кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Information about the authors

SERGEY V. SHVAREV
PhD (Technics); Head of the Laboratory of Geomorphology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia; Leading Research Scientist in the Laboratory of Seismic Hazard, Department of Natural, Natural and Technological Disasters and Earth’s Seismicity, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

SERGEY V. KHARCHENKO
PhD (Geography); Senior Research Scientist of the Department of Geomorphology and Paleogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; Senior Research Scientist in the Laboratory of Geomorphology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

VALENTIN N. GOLOSOV
DSc (Geography); Leading Research Scientist in the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; Chief Research Scientist in the Laboratory of Geomorphology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

MAXIM I. USPENSKY
Bachelor Student of the Department of Geomorphology and Paleogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

Фото С.В. Шварева