

С.В. ШВАРЁВ*, **С.В. ХАРЧЕНКО***, **В.Н. ГОЛОСОВ***, **М.И. УСПЕНСКИЙ*****

*Институт географии РАН, 119017, Москва, пер. Старомонетный, 29, стр. 4, Россия, shvarev@igras.ru, xar4enkoff@yandex.ru, gollossov@gmail.com

**Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия, shvarev@ifz.ru

***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, 1, Москва, Россия, xar4enkoff@yandex.ru, gollossov@gmail.com, kizyalleski@gmail.com

****Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия, gollossov@gmail.com

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ АКТИВИЗАЦИИ СЕЛЕЙ В 2006–2019 ГОДАХ НА СКЛОНЕ ХРЕБТА АИБГА (ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ)

Начиная с 2006 г. активное освоение склонов хр. Аибга (район пос. Красная Поляна) в связи с сооружением спортивных и туристических объектов привело к изменению типа землепользования, что способствовало активизации экзогенных процессов, прежде всего селей, угрожающих инженерным объектам и безопасности людей. На основе использования дистанционной информации — космических снимков высокого разрешения, ортоаэрофотоснимков, а также построенных на их основе цифровых моделей рельефа — проведена инвентаризация основных типов антропогенных нарушений и проявлений экзогенных процессов за 2006 и 2019 гг. для иерархически соподчиненного ряда тестовых территорий: полигона площадью 25 км², бассейна руч. Сулимовского (6,9 км²) и ключевого участка на водосборе руч. Черного (правого притока руч. Сулимовского) (0,8 км²), верховья которого выходят к инженерным сооружениям курорта «Роза Хутор». В результате сравнения оценена динамика сопряженного пространственного развития антропогенных форм и природных процессов. Установлено, что на территории исследований за период 2006–2019 гг. антропогенно трансформированные площади возросли в среднем более чем в пять раз, достигнув 25–30 %, а по отдельным водосборам 50 %. В свою очередь, качественно (по типам процессов) и количественно (в среднем более чем в семь раз) увеличилась площадь участков активизации экзогенных процессов, доля которых для всего полигона достигла 0,8 %, а по отдельным водосборам — 4 % от их площади. Антропогенные изменения землепользования способствовали росту поверхностного стока воды в два раза, что привело к резкому усилению эрозионных, оползневых и сопряженных с ними процессов склонового сноса и в результате к увеличению повторяемости селевых паводков.

Ключевые слова: антропогенная трансформация ландшафта, активизация экзогенных процессов, изменение стока, данные дистанционного зондирования, ЦМР, р. Мзымта, «Роза Хутор».

S.V. SHVAREV*, **S.V. KHARCHENKO***, **V.N. GOLOSOV***, **M.I. USPENSKY*****

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 119017, Moscow, per. Staromonetnyi, 29, str. 4, Russia, shvarev@igras.ru, xar4enkoff@yandex.ru, gollossov@gmail.com

**Schmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 123242, Moscow, ul. Bol'shaya Gruzinskaya, 10, str. 1, Russia, shvarev@ifz.ru

***Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskie gory, Russia, xar4enkoff@yandex.ru, gollossov@gmail.com, kizyalleski@gmail.com

****Kazan (Volga Region) Federal University, 420008, Kazan, ul. Kremlevskaya, 18, Russia, gollossov@gmail.com

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF INTENSIFICATION FACTORS FOR DEBRIS FLOWS DURING 2006–2019 ON THE SLOPE OF THE AIBGA RIDGE (WESTERN CAUCASUS)

Starting in 2006, active development of the slopes of the Aibga Ridge (area of the settlement of Krasnaya Polyana) in connection with the construction of sports and tourist facilities has led to changes in land use patterns, which promoted an intensification of exogenous processes, primarily debris flows, presenting a threat to engineering facilities and human safety. On the basis of using remote sensing data: high resolution satellite images, ortho-images from aerial photographs as well as digital eleva-

tion models constructed on their basis, the main types of anthropogenic disturbances and manifestations of exogenous processes were monitored for 2006 and 2019 for the hierarchical subordination of a series of test areas: the polygon (the area $S = 25 \text{ km}^2$), the basin of the Sulimovskii brook ($S = 6,9 \text{ km}^2$) and the key area on the catchment of the Chernyi brook (the right tributary of the Sulimovskii brook) ($S = 0,8 \text{ km}^2$), the upper reaches of which approach the engineering facilities of the Rosa Khutor health resort. As a result of the comparison, the dynamics of the associated spatial development of anthropogenic forms and natural processes is estimated. It was found that in the study area during 2006–2019 the anthropogenically transformed areas increased, on the average, more than by a factor of 5 reaching 25–30 %, and 50 % for the individual basins. The areas of exogenous processes increased qualitatively (according to the types of processes) and quantitatively (more than by a factor of 7, on the average), the contribution from which for the entire polygon reached 0,8 and 4 % of their area for separate watersheds. Anthropogenic changes in land use patterns promoted an increase in the overland runoff of water by a factor of 2, which led to a dramatic enhancement in erosion, landslide and related processes of slope runoff, resulting in an increase in recurrence of landslide-caused floods.

Keywords: anthropogenic transformation of the landscape, intensification of exogenous processes, changes in runoff, remote sensing data, DEM, Mzymta, Rosa Khutor.

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн верхнего течения р. Мзымты, расположенный в осевой зоне Западного Кавказа, обладает высоким потенциалом для развития опасных экзогенных процессов, что обусловлено высококонтрастным рельефом, слабоустойчивым коренным субстратом и большим объемом рыхлого чехла, значительным слоем осадков и высокой сейсмичностью. Крупные селевые и оползневые катастрофы, наблюдавшиеся здесь в геологическом масштабе времени, являются серьезным ландшафтообразующим фактором, который проявляется относительно редко и связан с исключительными гидрометеорологическими или сейсмотектоническими событиями. Сели небольших объемов обычны для большинства долин в бассейне р. Мзымты. До определенной степени устойчивое состояние поддерживается естественным растительным покровом, обеспечивающим распределение поверхностного, внутрипочвенного и подземного стока.

Активное строительство на склонах хр. Аибга, начавшееся в 2006 г., привело к масштабным преобразованиям естественных ландшафтов и кардинально изменило режим формирования стока на ручьях разной водности, дренирующих левобережную часть водосбора р. Мзымты в районе пос. Эсто-

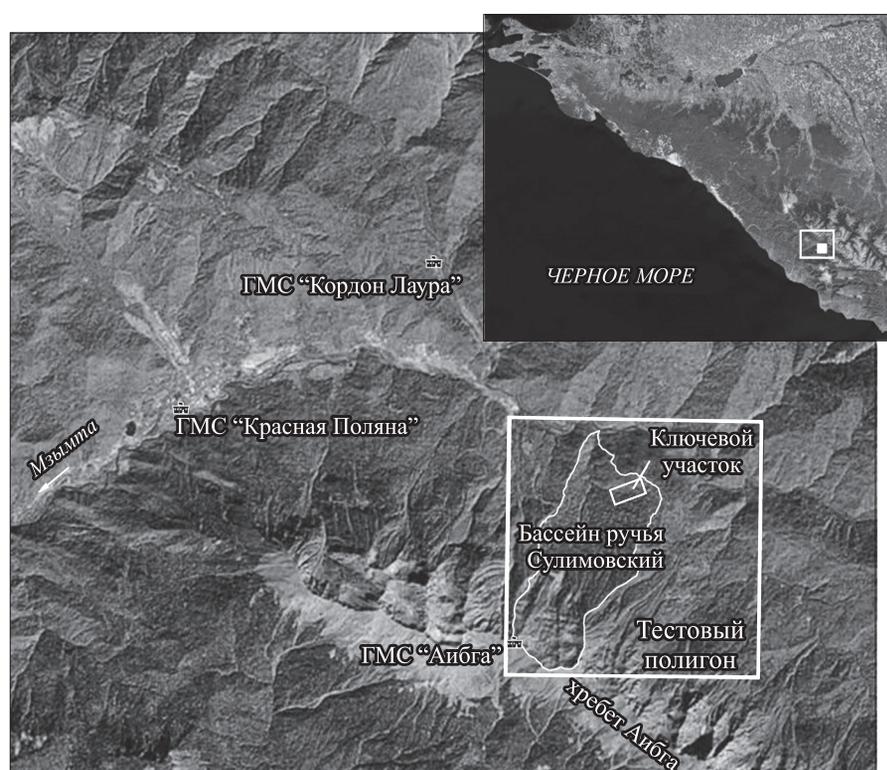


Рис. 1. Схема расположения района исследований.

Садок и выше по течению, вплоть до впадения в нее р. Пслух. Перестройка площадей малых водосборов, произошедшая в связи с сооружением объектов инфраструктуры, многократное увеличение и искусственная локализация поверхностного стока привели к резкой активизации рельефообразующих процессов, в частности селевых. Следы их проявления (несортированные наносы по днищам небольших долин и лотков, поваленный лес, глубокие врезы, сопровождаемые оползнями) регистрируются по всей периферии отрога хр. Аибга, на северной оконечности которого стоит Горная олимпийская деревня.

Цель исследования — количественная оценка усиления темпов денудации в результате антропогенного воздействия. В рамках данной работы выполнен анализ антропогенных изменений ландшафта за период 2006–2019 гг. и дана оценка усиления связанных с ними рельефообразующих процессов в пределах выбранного для детальных исследований полигона, а также входящих в него бассейна руч. Сулимовского и ключевого участка на водосборе его правобережного притока — руч. Черного (рис. 1).

ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ СЕЛЕЙ В РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Развитие селевых процессов на территории исследований определяется сочетанием четырех групп факторов, каждый из которых играет свою роль в селеформировании: 1) рельеф и литология поверхностных отложений; 2) тектоническая структура и сейсмичность; 3) режимы выпадения осадков и температуры воздуха; 4) степень нарушенности почвенно-растительного покрова. Факторы, входящие в первую группу, обеспечивают накопление селеформирующего рыхлообломочного материала и условия сноса и транзита; факторы второй группы ответственны за редкую (в интервалах столетий — тысячелетий) мобилизацию крупных и грандиозных объемов рыхлых отложений и коренного субстрата; факторы третьей группы определяют относительно частую (в интервалах лет — десятилетий) активизацию склонового чехла; четвертой — соотношение поверхностного, внутрипочвенного и подземного стоков.

Наиболее значимы для селеобразования факторы, входящие в первые две группы. Они обеспечивают: гравитационный потенциал, опирающийся на размах высот от 2200–2300 м над ур. моря (хр. Аибга) до 550–560 м над ур. моря (русло р. Мзымты); высокую крутизну склонов и русел эрозионных форм (от 10 до 50°); обилие аккумулятивных ледниковых и гравитационных накоплений в нивальной зоне в верхних звеньях бассейнов; преобладание в коренном субстрате глинистых толщ, податливых к внешним воздействиям и обеспечивающих динамичную селевую суспензию; развитие мощных зон выветривания глубиной до 30 м, а по зонам тектонических нарушений — до 60 м [1, 2]; интенсивное неотектоническое воздымание территории; активные разломы, определяющие тектонический каркас всей территории и обладающие высоким сейсмогенным потенциалом ($M = 7,0-7,3$) [3–7].

В оценке природно-антропогенных взаимодействий большое значение приобретают гидрометеорологические и ландшафтные характеристики (почвенно-растительный покров, микрорельеф, поверхностные отложения), поскольку они обладают сопоставимыми с антропогенной деятельностью пространственно-временными параметрами — периодом воздействия, скоростями развития, энергетическим и вещественным потенциалом, обеспечивающими возможность прямого или косвенного регулирования.

Основным гидрометеорологическим параметром для селевых и парагенетически связанных с ними склоновых смещений является количество и интенсивность выпадения осадков (рис. 2).

Для тестового полигона в целом и бассейна руч. Сулимовского, расположенных в пределах высот 555–2278 м над ур. моря, можно принять среднегодовое количество осадков в интервале 1300–2000 мм, исходя из данных наблюдений по трем гидрометеостанциям (ГМС) — Красная Поляна ($H_{abc} = 567$ м), Кордон Лаура ($H_{abc} = 576$ м) и Аибга ($H_{abc} = 2226$ м) (см. рис. 1, 2, а). Интерполяция данных для ключевого участка, находящегося в высотном диапазоне 900–1200 м, определяет показатели количества осадков от 1600 до 1800 мм/год.

Наибольшее ежемесячное количество осадков характерно для зимних месяцев. Осадки этого периода носят характер «отложенного стока», определяемого суммарными величинами осадков за ноябрь–февраль от 460 до 840–860 мм и реализуемого весной. Накопление снежной толщи на склоне хребта распределяется по высоте неравномерно, достигая максимума (3–5 м) на высоте 1950–2050 м, снижаясь до 0,5–2 м на высоте 1400–1600 м и стабилизируясь в диапазоне 0,8–1,5 м в интервале высот 1400–950 м [9]. Такое распределение обеспечивает максимальное накопление осадков к началу снеготаяния в верхних частях селевых бассейнов.

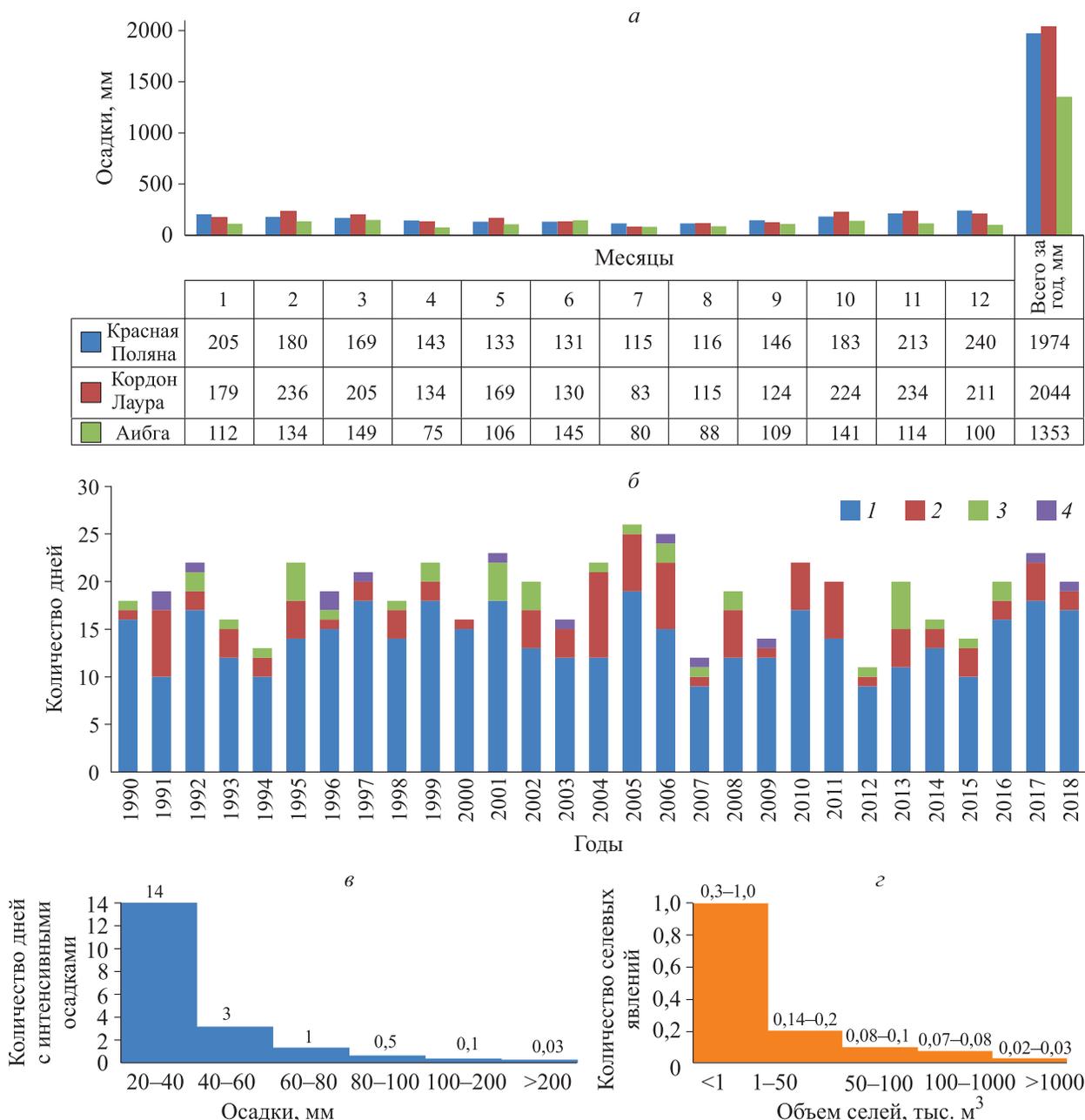


Рис. 2. Среднемесячное и среднегодовое количество осадков по трем станциям в окрестностях тестового полигона [1, 8] (*a*), количество дней (теплого времени года) с экстремальными осадками (*б*), повторяемость дней с жидкими осадками разной степени интенсивности (дней/год) с 1990 по 2018 г. (*в*), повторяемость селей разного объема (сель/год) по бассейну р. Мзымты с 1978 по 2010 г. (с использованием данных [1]) (*г*).

Количество дней с осадками, мм: 1 – 20–40, 2 – 40–60, 3 – 60–80, 4 – более 80 мм.

Интенсивность осадков теплого времени года постепенно снижается к середине лета (см. рис. 2, *a*). Этот период характеризуется неравномерностью осадков, связанной с затяжными или интенсивными дождями, повторяемость которых значительно варьирует по годам при отсутствии какого-либо выраженного тренда (см. рис. 2, *б*). Более 100 мм выпадало за весь период только трижды, что определило периодичность около 10 лет. Максимальная интенсивность зафиксирована в 1977 г. и составила 188 мм/сут [1]. За весь период наблюдений непрерывные затяжные (продолжительностью не более трех дней) дожди со слоем менее 50 мм были отмечены два раза; 50–99 мм – 16; 100–149 мм – 11;

150–199 мм — 5; более 200 мм — один раз. Согласно эмпирическим оценкам [1], селеобразующими являются суммы осадков от 30 мм/сут.

Обилие осадков при достаточно высоком температурном фоне в теплое время года способствует интенсивному росту растительности, отчасти сдерживающей развитие рельефообразующих процессов. До высоты 1900–2000 м над ур. моря в ненарушенных условиях залесенность достигает 95 %. Тестовый полигон на большей части площади (около 60 %) находится в лесном поясе с развитием буковых, грабовых, в верхней части — пихтовых лесов. Участки на высоте менее 2000 м расположены в альпийском луговом и нивальном поясах. До начала активного освоения территории сомкнутая лесная растительность покрывала примерно 60 % тестового полигона, а около 40 % были представлены травянисто-кустарниковым покровом на склонах в нивальном поясе и в днищах долин.

ПРОЯВЛЕНИЯ СЕЛЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕСТОВОМ ПОЛИГОНЕ

Для бортов долины р. Мзымты в районе пос. Красная Поляна характерно повсеместное развитие современных селей в бассейнах постоянных и временных водотоков [1]. Еще более значительным оказывается эффект селевой деятельности при учете древних, без следов современного обновления, аккумулятивных и денудационных селевых форм рельефа, парагенетически сопряженных с оползнями [10]. Наиболее заметными являются следы синдинамичных [11] каменно-грунтовых потоков, спровоцированных сильными землетрясениями. Крупнейшие из таких систем занимают днища крупных долин, таких как р. Бешенка (правый приток р. Мзымты, в районе пос. Красная Поляна), руч. Пслушонок и часть долины р. Пслух, и протягиваются на 4–6 км [12]. Очевидно, что эти системы оказывали в голоцене значительное влияние на аккумулятивно-денудационный режим территории, создавая плотины в днищах с подпрудными водоемами, аккумулирующими водные и кластические массы.

Не является исключением и тестовый полигон с бассейном руч. Сулимовского, правые притоки которого развиваются в крупных оползневых цирках, а основное русло обладает типичными для периодического воздействия селей чертами рельефа: транзитный селевой лоток в верхней части, терраса и конус выноса в устье, переработанные эрозией р. Мзымты. В средней части бассейн пересекается активным и обладающим высоким сейсмическим потенциалом Аибгинским разломом, смещение по которому за голоцен достигает 80 м [4]. Этот разлом проявлял активность четыре раза за последние 4 тыс. лет [7] и, по-видимому, является причиной нескольких поколений массовых гравитационных смещений [13]. Такие крупные редкие катастрофы, несомненно, следует учитывать при планировании жизнедеятельности, однако возможность активного противодействия или предупреждения таких событий на современном уровне развития отсутствует. Этого нельзя сказать о нормальном режиме экзогенных процессов, оценка условий развития которых является целью исследования.

Менее крупные сели показывают вполне определенную связь (частота проявлений/объем) с гидрометеорологической обстановкой (см. рис. 2, в, з). В бассейне руч. Сулимовского, входящего в тестовый полигон, за последние 25 лет зафиксировано два достаточно крупных селя — в 1995 и 2007 гг. В обоих случаях селевые массы перегородили русло р. Мзымты, а рассчитанный объем в 2007 г. составил 30–40 тыс. м³ [1]. Сель 2007 г. совпал с началом антропогенного освоения территории. В 2010 г. возник сель в долине руч. Черного (правого притока руч. Сулимовского) и сформировались сели на мзымтинском склоне плато около курорта «Роза Хутор» с объемами до 5 тыс. м³, повторившиеся в 2011 и 2012 гг. Непосредственной причиной этих селей послужило складирование строительных материалов в верховьях ручьев, обеспечившее селеформирующие объемы грунта [1]. Несколько селей с объемом от 100 до 4000 м³ сформировались на водосборе руч. Сулимовского и 24 июня 2019 г. после выпадения дождя со слоем 62 мм.

ДИНАМИКА АНТРОПОГЕННОГО ОСВОЕНИЯ И АКТИВИЗАЦИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В 2006–2019 ГГ.

Для определения степени воздействия антропогенных нарушений на активизацию рельефообразующих процессов проведен их сравнительный анализ на основе сопоставления материалов дистанционного зондирования: ортоаэрофотоснимков и ЦМР на основе лазерного сканирования (рис. 3, а), выполненных в 2006 г.¹; материалов космических съемок высокого разрешения 2019 г. (см. рис. 3, з)

¹ Используются данные съемки ООО «ИнжГео» (Краснодар).

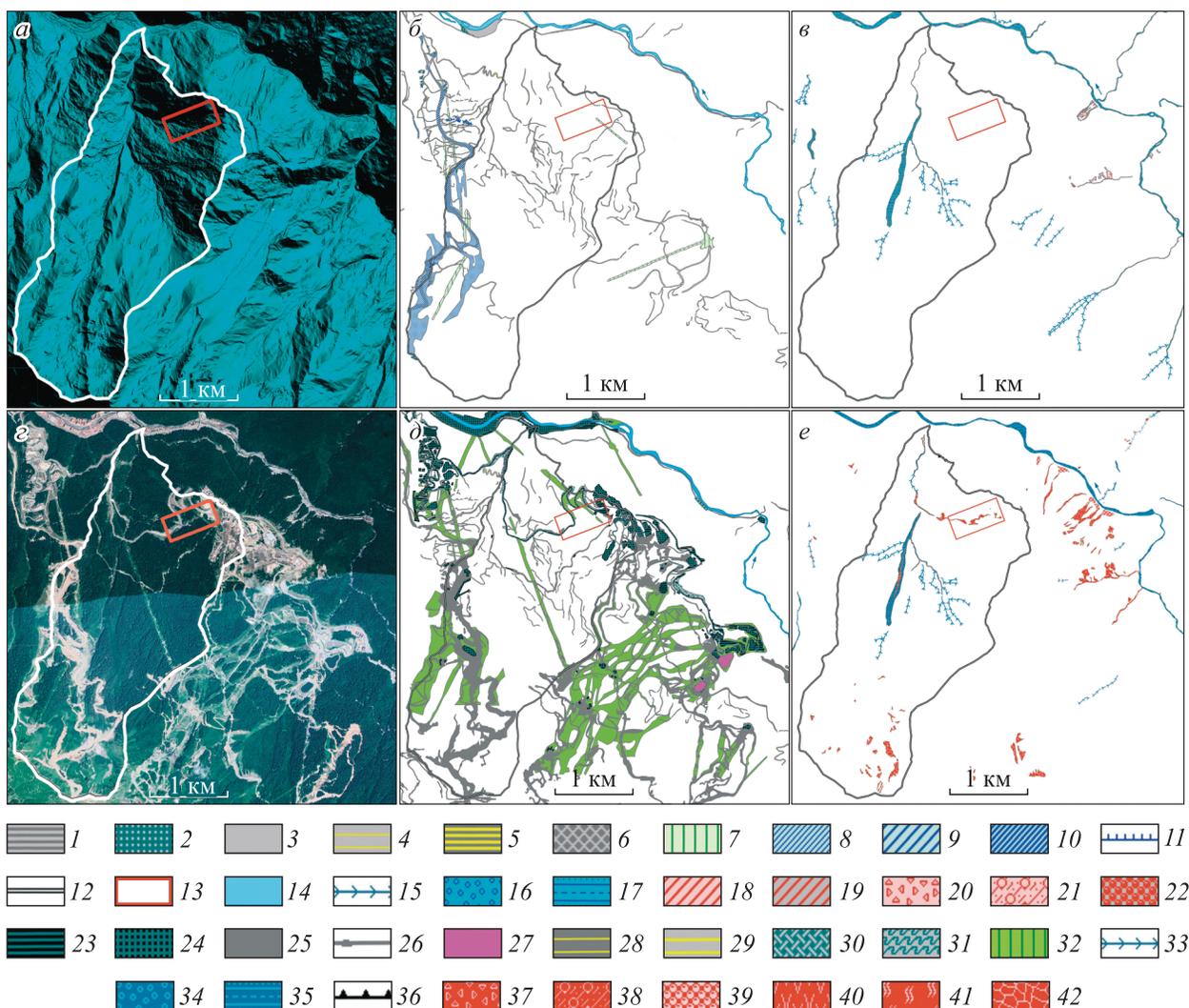


Рис. 3. Дистанционные данные и аналитические схемы по состоянию на 2006 г. (а–в) и 2019 г. (г–е).

a — ЦМР по данным лазерного сканирования. *б* — антропогенная нарушенность. Участки: 1 — с твердым искусственным покрытием (преимущественно автодороги), 2 — со смешанным покрытием (дороги, капитальные строения, инженерные сооружения), 3 — со снятым почвенно-растительным покровом (грунтовые дороги, строительные площадки и пр.). 4 — вырубки под линейные сооружения; 5 — дорожные полки; 6 — дорожные насыпи; 7 — 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. Сулимовского; 13 — граница ключевого участка; 14 — русло р. Мзымты. *в* — проявления рельефообразующих процессов. Участки активной русловой эрозии: 15 — мелких ручьев, 16 — крупных рек. 17 — участки пойменной аккумуляции и периодического селевого транзита; оползневые и эрозионные уступы: 18 — активные, 19 — неактивные. 20 — участки комплексной склоновой денудации (оползневые, осыпные, эрозионные); 21 — селевые русла, лотки; 22 — конусы выноса, шлейфы. *г* — космокарта по данным съемки высокого разрешения. *д* — антропогенная нарушенность. Участки: 23 — с твердым искусственным покрытием (преимущественно автодороги), 24 — со смешанным покрытием (дороги, капитальные строения, инженерные сооружения). Участки со снятым почвенно-растительным покровом: 25 — площадные (строительные площадки и пр.), 26 — линейные (грунтовые дороги). 27 — пруды; 28 — вырубки под линейные сооружения; 29 — дорожные полки; 30 — защитные галереи; 31 — насыпи; 32 — вырубки площадные. *е* — проявления рельефообразующих процессов. Русловая эрозия: 33 — временных водотоков, 34 — постоянных водотоков. 35 — пойменная аккумуляция и периодический селевой транзит; 36 — оползневые и эрозионные уступы; 37 — участки комплексной склоновой денудации; 38 — селевые русла; 39 — селевые конусы; 40 — овраги; 41 — оползни; 42 — скальные осыпи.

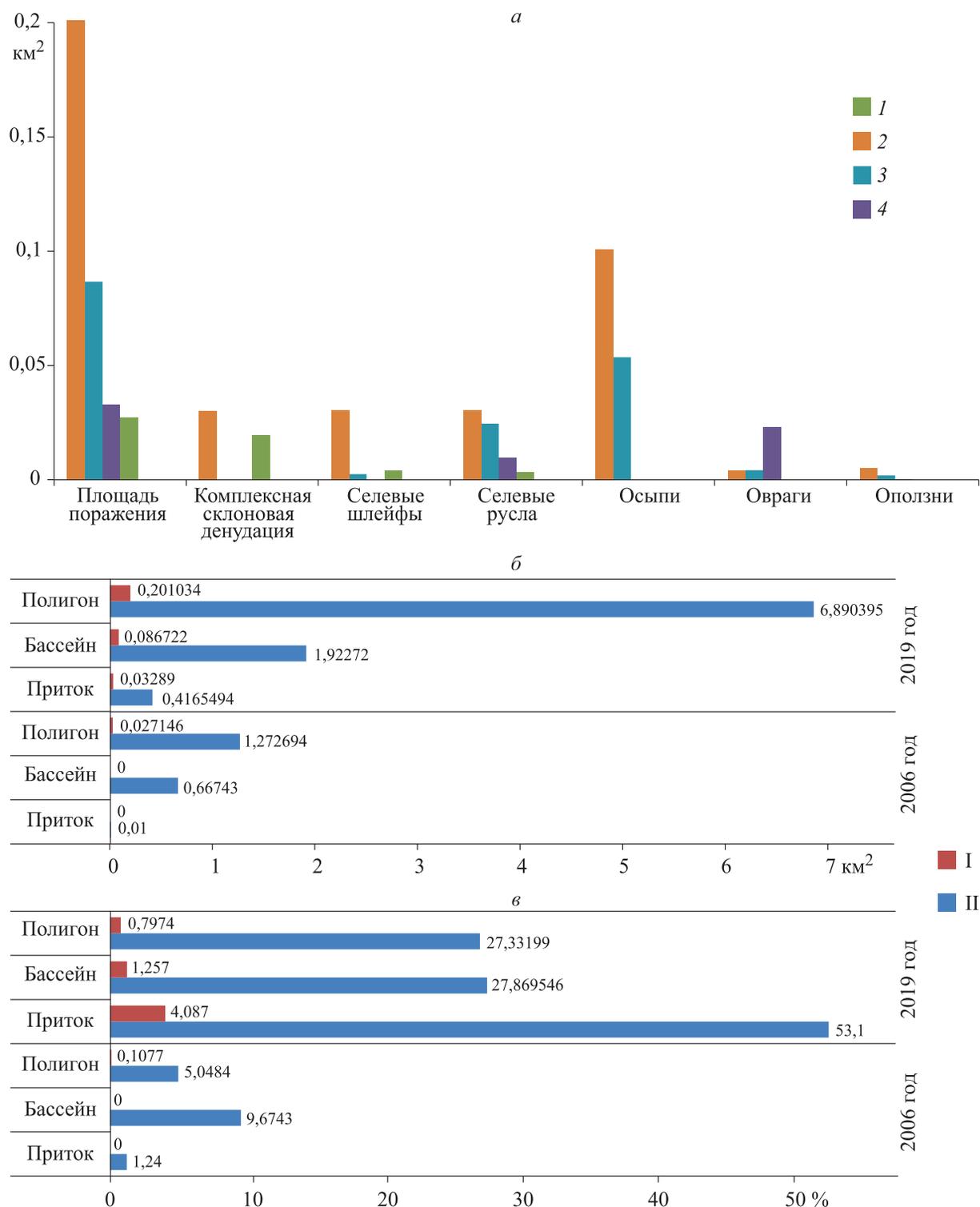


Рис. 4. Динамика пораженности территории полигона, бассейна руч. Сулимовского и водосбора его правого притока типами экзогенных процессов (а) и сравнительный анализ их суммарной антропогенной трансформированности и пораженности экзогенными геологическими процессами в абсолютных (км²) (б) и относительных (%) (в) показателях за 2006 и 2019 гг.

2006 г.: 1 — полигон. 2019 г.: 2 — полигон, 3 — бассейн, 4 — приток. I — экзогенные процессы; II — антропогенная нарушенность.

(сервисы Google и Yandex) для трех пространственных уровней — тестового полигона (III) площадью 25,2 км², бассейна руч. Сулимовского (II) (6,9 км²) и ключевого участка на водосборе руч. Черного (правого притока руч. Сулимовского) (I) (0,8 км²), верховья которого выходят к инженерным сооружениям горнолыжного курорта «Роза Хутор».

Антропогенная нарушенность. По состоянию на 2006 г. на территории тестового полигона антропогенное воздействие (см. рис. 3, б) затронуло около 5 % площади (рис. 4, в) и было распределено неравномерно с максимальной нарушенностью в западной части полигона, где на тот момент уже функционировали объекты горнолыжной инфраструктуры комплекса «Альпика-Сервис». Наибольшая доля среди трансформированных площадей приходилась на вырубки, занимающие около их половины, а также старые дорожные полки, полностью закрытые древесной растительностью и не обладающие видимым потенциалом воздействия на активизацию экзогенных процессов. Остальные элементы измененного почвенно-растительного покрова и рельефа охватывали менее 1 % всей площади (табл. 1).

К 2019 г. антропогенная трансформация продвинулась в верхние (южные) участки полигона (в основном вследствие развития инфраструктуры комплекса «Альпика-Сервис») и на восток, где построены объекты курорта «Роза Хутор» (см. рис. 3, д). Площадь измененных ландшафтов выросла в 5,5 раза (с 1,27 до 6,89 км²) (см. рис. 4, б, см. табл. 1) и достигла 27 % от всей территории (см. рис. 4, в). А если оценить увеличение трансформированных участков по бассейну руч. Сулимовского и его правого притока, то площадь измененных ландшафтов выросла в 40–45 раз (см. рис. 4, в). При этом произошло резкое количественное увеличение (в 30 раз) по отдельным типам антропогенных нарушений (открытый грунт) (см. табл. 1).

Развитие экзогенных процессов. В 2006 г. из активных проявлений процессов на территории полигона были представлены только селевые русла, обновленные или новообразованные формы которых занимали 0,03 %, и комплексный склоновый снос (поверхностные оползни-сплывы, осыпи, мелкие эрозионные врезы) — 0,07 %, в сумме составляющие 0,1 % от его общей площади (табл. 2, см. рис. 4, в).

К 2019 г. произошла активизация экзогенных процессов, что привело к расширению (в семь раз) площадей с интенсивной денудацией (см. рис. 4, в), суммарно достигших 0,8 % от площади тестового полигона, а по бассейнам руч. Сулимовского и его правого притока — 1,3 и 4 % соответственно (см. табл. 2, см. рис. 4, з).

В целом можно констатировать, что комплексные антропогенные изменения, охватывающие 25–30 % территории (весь полигон и бассейн руч. Сулимовского), при данных типах и параметрах воздействия и природных условиях вызывают активизацию экзогенных геологических процессов на 0,8–1,3 % площади, а при нарушенности ≈50 % территории (водосбор руч. Черного) пораженность достигает 4 % площади.

Таблица 1

Динамика антропогенной нарушенности исследуемого полигона и ряда объектов внутри него за период 2006–2019 гг., га/%

Типы антропогенных нарушений	2006 г.			2019 г.		
	Участок (га)					
	I (80)	II (690)	III (2520)	I (80)	II (690)	III (2520)
Галереи дорожные	0	0	0	0	0	0,9/0,04
Бассейны (пруды)	0	0	0	0	0	3,8/0,2
Твердое покрытие	0	0	0,2/0,01	8,1/10,1	10,7/1,6	61,3/2,4
Комплексное покрытие	0	0,07/0,01	1,8/0,07	12,7/15,9	13/1,9	43,3/1,7
Насыпи дорожные	0	0	5,7/0,2	1,5/1,9	1,7/0,3	14,1/0,6
Открытый грунт	0	0	7,0/0,3	2,2/2,8	79/11,4	211,4/8,4
Просеки	0	3,4/0,5	14,0/0,6	0	3,7/0,5	6,8/0,3
Полки дорожные	0,54/0,7	14,1/2	31,5/1,3	0,5/0,6	14,1/2	31,5/1,3
Вырубки	0,46/0,6	49,2/7,1	67,2/2,7	23,6/29,5	74,0/10,7	315,9/12,5
Всего	1/1,3	66,7/9,7	127,3/5,1	48,5/60,6	196,2/28,4	689,0/27,3

Примечание. Здесь и в табл. 2: I — ключевой участок в бассейне правого приустьевых притока руч. Сулимовского, II — бассейн руч. Сулимовского, III — тестовый полигон в целом.

Изменение характеристик поверхностного стока. Освоение территории значительно изменило характеристики поверхностного стока воды². Для территории полигона по состоянию на 2006 г. они составляли 0,2 для ≈60 % территории, занятой лесом, и ≈0,3 для остальной части (≈40 %), преимущественно с луговой растительностью, при незначительной (≈0,3 %) доле территории с коэффициентом 0,5 (открытый грунт) и ≈0,08 % — с коэффициентом 0,9 (дороги с твердым покрытием). К 2019 г. доля территорий с коэффициентом стока ≈0,9 (твердое покрытие) возросла до 2,4 % от общей площади, ≈0,8 (комплексная застройка) — до 2,2 %, ≈0,5 (открытый грунт) до 8 %, а ≈0,3 (луговая растительность) с учетом многочисленных вырубок и просек в лесном массиве — до 50–52 % территории. Доля территорий с минимальным коэффициентом стока (≈0,2), таким образом, сократилась до ≈35 %, а средний коэффициент поверхностного стока, рассчитанный для всей территории тестового полигона, увеличился в два раза — с 0,23 до 0,46. По сути это послужило основным триггером активизации экзогенных процессов и увеличения повторяемости формирования селей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории исследований за период 2006–2019 гг. произошло качественное и количественное (в среднем более чем в пять раз) увеличение антропогенной трансформированности, охватившей 25–30 % территории полигона, а по отдельным водосборам — более 50 % от общей площади. Появление селевых типов землепользования способствовало росту поверхностного стока воды в два раза. Это привело к качественному и количественному (в среднем более чем в семь раз) росту площадей участков активизации экзогенных процессов, доля которых для всего полигона возросла до 0,8 % от всей территории, а по отдельным водосборам — до 4 %, а также к изменению режима существующих селевых бассейнов и резкому росту повторяемости селевых паводков.

Усиление эрозионно-селевых процессов на исследованной территории, в первую очередь на участках, расположенных в непосредственной близости к инженерным сооружениям и транспортным коммуникациям, представляет угрозу для хозяйственной деятельности и жизни людей. Решение проблемы заключается в принятии экстренных мер по переоценке стоковых характеристик для всей антропогенно трансформированной территории на основе использования корректной численной модели, построенной на фактических данных о характере изменений землепользования и площадей отдельных малых водосборов. На ее основе необходимо перепроектирование защитных сооружений для эффективной компенсации повышенных (относительно устойчивого природного уровня) характеристик стока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (19–17–00181) (анализ пространственно-временных изменений интенсивности экзогенных процессов и селей) и в рамках темы государственного задания Института географии РАН (0148–2019–0005) (обзор факторов формирования селей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Казакова Е.Н., Морозов Г.Л. Селевые процессы в бассейне р. Мзымта (Красная Поляна) и их влияние на территорию строительства объектов Олимпийского комплекса // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2013. — № 6. — С. 516–529.
2. Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Оценка и ранжирование по степени оползневой опасности участков строительства олимпийских объектов в г. Сочи // Геоэкология. — 2013. — № 6. — С. 530–537.
3. Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. — М.: Недра, 1992. — 254 с.
4. Несмеянов С.А. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). — М.: Научный мир, 1999. — 392 с.
5. Шолоп В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. — М.: Наука, 1993. — 192 с.
6. Овсяченко А.Н., Хилько А.В., Шварев С.В., Костенко К.А., Мараханов А.В., Рогожин Е.А., Новиков С.С., Ларьков А.С. Комплексные геолого-геофизические исследования активных разломов в Сочи-Краснополянском районе // Физика Земли. — 2013. — С. 116–138.

² Коэффициенты стока для основных типов антропогенно трансформированных территорий использованы с учетом усредненных характеристик [14, 15].

7. **Овсюченко А.Н., Меньшиков М.Ю., Рогожин Е.А., Корженков А.М.** 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. — 2016. — Т. 15, № 2. — С. 5–38.
8. **Справочник** по климату СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 356 с.
9. **Вивчар А.Н.** Снежный покров и положение орографической снеговой линии в долине реки Мзымта (Западный Кавказ) в условиях современных климатических изменений // Криосфера Земли. — 2010. — Т. 14, № 4. — С. 80–88.
10. **Шварев С.В.** Детальное геоморфологическое картографирование в верховьях р. Мзымты // ИнтерКарто/ИнтерГИС-15 «Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт»: Материалы Междунар. конф. (Пермь, Гент, 29 июня – 5 июля 2009 г.). — Пермь, 2009. — Т. 2. — С. 462–464.
11. **Федоренко В.С.** Горные оползни и обвалы, их прогноз. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. — 211 с.
12. **Шварев С.В.** Анализ параметров древнего катастрофического оползня в долине реки Пслух (Западный Кавказ) с использованием данных лазерного сканирования // Геоморфология. — 2015. — № 4. — С. 90–98.
13. **Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Вадачкоря О.А., Ястребов А.А.** Формирование и оценка инженерно-геологических условий территории строительства олимпийских объектов горного кластера в Адлерском районе г. Сочи // Геоэкология. — 2011. — № 1. — С. 3–13.
14. **Ray L., Franzini J., Freyberg D.** Water Resources Engineering. — Columbus: McGraw-Hill, 1992. — 864 p.
15. **Critchley W., Siegert K.** Rainfall-runoff analysis: A manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production. — Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1991. — 850 p.

Поступила в редакцию 25.06.2020

После доработки 20.08.2020

Принята к публикации 25.12.2020