

С.В. ХАРЧЕНКО\*\*\*, А.В. КОТЕНКОВ\*\*\*, Е.В. ЛЕБЕДЕВА\*\*

\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, хар4enkoff@yandex.ru, avkotenkov@yandex.ru

\*\*Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Россия,  
хар4enkoff@yandex.ru, avkotenkov@yandex.ru, ekaterina.lebedeva@gmail.com

### ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ ТЕРРИТОРИИ С ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ ПРОЯВЛЕНИЯМИ К РАЗВИТИЮ ОПОЛЗНЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ РЕКИ ГЕЙЗЕРНОЙ, КАМЧАТКА)

Долина р. Гейзерной на Камчатке, известная своими уникальными гидротермальными проявлениями, в последние десятилетия столкнулась с проблемой активизации склоновых процессов, главными из которых являются оползневые. Три крупных обвала-оползня, произошедших в 1981, 2007 и 2014 гг., привели к значительному изменению морфологии долины и режима работы некоторых гейзеров. В статье представлена оценка predisposedности долины р. Гейзерной к развитию оползней, выполненная с использованием подхода landslide susceptibility modeling (LSM) на основе алгоритма RandomForest. В отличие от традиционных методов оценки оползневой опасности, LSM базируется на анализе пространственных закономерностей между фактическими проявлениями оползней в прошлом и комплексом природных факторов. В модели учитывались геологические, геоморфологические и гидро-геоморфологические характеристики, а также термальные аномалии земной поверхности, рассчитанные по данным Landsat-8 за 2017–2021 гг. за вычетом топографических эффектов (т. е. только как следствия земного теплового потока, альbedo и погодных различий). Согласно результатам моделирования выявлено, что наиболее опасные в оползневом отношении участки сконцентрированы вдоль левого борта долины р. Гейзерной в пределах зон разломов (в основном вдоль кольцевого разлома края кальдеры), повышенных термальных аномалий ( $\Delta T > 5^\circ\text{C}$ ) и контакта слаблитифицированных вулканогенно-озерных отложений (туфопесчаников, туфогравелитов и туфоалевролитов) с более прочными породами экстрезий (дацитами, липаритами). Также высокие вероятности схода оползней отмечаются на правом борту долины в приривочных частях плато Круглого и экстрезии Гейзерной. В то же время для участка долины р. Шумной, характеризующегося схожими геолого-геоморфологическими условиями, но без активных газогидротерм, получены существенно более низкие значения вероятности оползней. Здесь наиболее подвержены оползневым процессам приривочные части плато Широкого и Круглого в пределах рассматриваемого участка долины. Одним из важнейших предикторов оползневой восприимчивости для обеих долин являются литологические неоднородности.

**Ключевые слова:** вулканогенный и флювиальный рельеф, речные долины, склоновые процессы, оползни, предиктивное моделирование, геотермальные аномалии.

S.V. KHARCHENKO\*\*\*, A.V. KOTENKOV\*\*\*, E.V. LEBEDEVA\*\*

\*Lomonosov Moscow State University,  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia, хар4enkoff@yandex.ru, avkotenkov@yandex.ru

\*\*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, str. 4,  
Russia, хар4enkoff@yandex.ru, avkotenkov@yandex.ru, ekaterina.lebedeva@gmail.com

### LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY OF THE TERRITORY WITH GAS-HYDROTHERMAL MANIFESTATIONS (A CASE STUDY OF THE GEYSERNAYA RIVER VALLEY, КАМЧАТКА)

The Geysernaya River valley in Kamchatka, known for its unique hydrothermal manifestations, has experienced activation of slope processes, mainly landslide ones, in recent decades. Three large landslides that occurred in 1981, 2007 and 2014 led to significant changes in the morphology of the valley and the activity mode of some geysers. The article presents an assessment of the susceptibility of the Geysernaya River valley to landslide development, performed using the landslide susceptibility modeling (LSM) approach based on the RandomForest algorithm. Unlike traditional landslide hazard assessment methods, LSM analyzes spatial relationships between past landslide occurrences and a range of natural factors. The model incorporated geological, geomorphological and hydro-geomorphological characteristics, as well as surface thermal anomalies derived from Land-

sat-8 data for 2017–2021, minus topographic effects (i.e. only as a consequence of the earth's heat flow, albedo and weather differences). The modeling results indicate that the most landslide-hazardous areas are concentrated along the left side of the Geysernaya River valley within fault zones (mainly along the circular fault of the caldera edge), elevated thermal anomaly zones ( $\Delta T > 5^\circ\text{C}$ ) and at the contact between weakly lithified volcanogenic-lacustrine deposits (tuff sandstones, tuff gravelites and tuff siltstones) and more resistant extrusive rocks (dacites and liparites). Also, high landslide probabilities are noted on the right side of the valley in the near-edge parts of the Krugloe Plateau and the Geysernaya Extrusion. At the same time, the Shumnaya River valley segment, characterized by similar geological and geomorphological conditions, but lacking active gas-hydrothermal vents, exhibits significantly lower landslide susceptibility values. Here, the near-edge parts of the Shirokoe and Krugloe Plateaus within the considered valley area are most susceptible to landslide processes. Heterogeneous lithology is one of the most essential predictors of landslide susceptibility for both valleys.

**Keywords:** volcanogenic and fluvial terrain, river valleys, slope processes, landslides, predictive modeling, geothermal anomalies.

## ВВЕДЕНИЕ

Долина р. Гейзерной (рис. 1), в которой расположено одно из пяти крупнейших гейзерных полей мира, долгие годы привлекала внимание специалистов, изучавших гейзеры и иные газогидротермальные проявления. Но после 3 июня 2007 г., когда в результате схода масштабного обвала-оползня, трансформировавшегося в сель, часть наиболее примечательных гейзеров в долинах р. Гейзерной и ее притока руч. Водопадный была утрачена, на этой территории стали также проводиться комплексные геолого-геоморфологические исследования с целью определения причин и механизмов подобных явлений и прогноза их возможного повторения [1–6].

Факт обрушения борта долины р. Гейзерной не является уникальным. Еще на начальных этапах исследований (1960–1970-е гг.) в верховьях р. Гейзерной (устное сообщение В.М. Сугрובה) отмечались остатки оползней и следы обрушений обрывистых склонов. Относительно небольшой (около

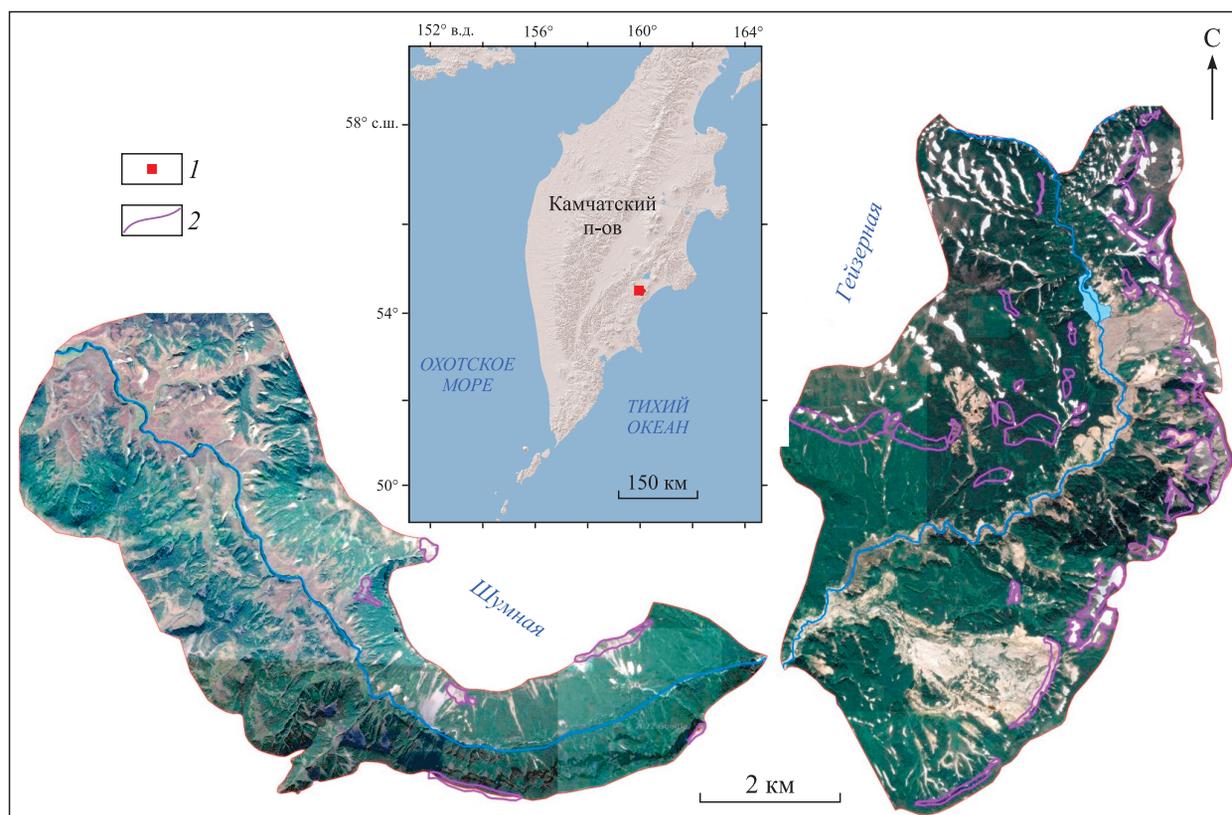


Рис. 1. Инвентаризация очагов зарождения оползней в долинах р. Гейзерной и в верхнем течении р. Шумной (на карте-врезке показано положение территории в пределах п-ова Камчатка).

1 — местоположение района работ; 2 — очаги зарождения оползней.

80–100 тыс. м<sup>3</sup>) оползень в верховьях долины произошел в 1981 г. после тайфуна «Эльза» [7, 8]. Кроме того, по ее бортам имеются многочисленные хорошо выраженные в рельефе амфитеатры обрушения, у подножия которых дешифрируются разновысотные ступени и крупные блоки явно обвального оползневоего происхождения [1, 8].

В работе В.Н. Двигало и И.В. Мелекесцева [5] был сделан прогноз развития опасных склоновых процессов в долине р. Гейзерной, который подтвердился в январе 2014 г.: произошел третий (после событий 1981 и 2007 гг.) масштабный обвал-оползень, приведший к сходу мощного селя и формированию еще одного и поныне существующего в долине подпрудного озера [8, 9].

Таким образом, за последние 40 лет на левом борту долины произошло три крупных обвала-оползня: 04.10.1981, 03.06.2007 и 03–04.01.2014, во время схода которых в ее днище было перемещено в общей сложности около 24 млн м<sup>3</sup> породы [10]. Проведенный анализ современных склоновых процессов на бортах долины (включая небольшие смещения, сплывы, осыпи и др.) на основе дешифрирования снимков высокого и сверхвысокого разрешения за последние шесть десятилетий также показал их приуроченность преимущественно (75 % от общей площади участков активизации) к левому борту долины [11–13].

Однако полевые геоморфологические исследования, проводившиеся нами в 2020–2023 гг., и анализ морфологии рельефа на наличие амфитеатров обрушения и вероятных оползневых тел свидетельствуют о том, что более древние масштабные оползни сходили и на правом борту долины. Об этом упоминали в своих работах и другие специалисты [2, 5].

Столь высокую обвальную-оползневую активность в пределах долины р. Гейзерной исследователи [4, 5] объясняют комплексом причин, среди которых основными являются следующие: тектоническая раздробленность склонов долины, их значительная крутизна и перепад высот до 400 м и более, а также слабая устойчивость прорезанных рекой вулканогенно-осадочных пород; высокая сейсмичность региона, наличие многочисленных газогидротермальных проявлений — как активных, так и отмерших термальных площадок преимущественно на левом борту долины. Под воздействием кислых растворов, образующихся при конденсации пара и растворении газов парагазовых струй, на территории круглый год идет активный процесс изменения горных пород, которые постепенно превращаются в относительно мягкие, пластичные и хорошо увлажненные глины. В результате происходит резкое уменьшение внутреннего сцепления пород [14, 15] и, как следствие, активизируются склоновые процессы. Значительная роль гравитационных склоновых процессов в формировании долины р. Гейзерной обусловила даже появление гипотезы о том, что обвальная-оползневая процессы способствуют возникновению термальных источников, работающих в режиме гейзеров [16].

При этом необходимо отметить, что в расположенных рядом долинах схожей морфологии, но без активных газогидротермальных проявлений (например, в долине р. Шумной, в которую впадает р. Гейзерная), подобной активности склоновых процессов не наблюдается [13]. Поэтому в данной работе нам хотелось с помощью широко распространенной и успешно применяемой за рубежом методики моделирования подверженности оползням (landslide susceptibility modelling (LSM)) оценить предрасположенность к оползневым процессам, во-первых, долины р. Гейзерной с ее активными газогидротермами, а во-вторых, участка долины р. Шумной, которую можно рассматривать как аналог долины р. Гейзерной по морфологии, геологическому строению и другим параметрам, но без газогидротермальных проявлений [13]. Все это в совокупности позволит нам не только оценить возможность применения данной методики в условиях глубоко расчлененного вулканического рельефа Камчатки, но и на участках активных газогидротермальных процессов, и, как следствие, понять степень влияния термального фактора на оползневой процесс.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемые долины расположены в восточной части Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии в пределах Восточного вулканического пояса п-ова Камчатка на территории Кроноцкого государственного биосферного заповедника. Протяженность р. Гейзерной (левый приток р. Шумной) составляет ~11 км. Глубина вреза долины от верхнего к нижнему участку увеличивается с 200 почти до 500 м. В пределах большей части днища долины в среднем и нижнем течении реки, а также на левом борту долины отмечаются многочисленные тепловые аномалии Гейзерного и Верхнегейзерного термальных полей, проявляющиеся в виде высокотемпературных (>115 °С) парагазовых струй (по измерениям И.Е. Большакова), а также грязевых котлов, гейзеров и термальных источников [17, 18]. В долине отмечается мозаичный характер ландшафтной структуры, резкая смена типов почв и растительных сообществ в зависимости от температур [19].

Река Шумная (бассейн Тихого океана) вытекает из оз. Центрального, расположенного в кальдере Узон, ее общая протяженность составляет ~40 км. Рассматриваемый в работе участок имеет длину 9,6 км и площадь 11,6 км<sup>2</sup> [13]. Здесь нет газогидротермальных проявлений. Склоны, как правило, густо задернованы и залесены. В долине представлена зональная преимущественно кустарниковая и кустарничковая растительность, а также вулканические типы почв [19].

Долина р. Гейзерной и верхний участок р. Шумной заложены по кольцевому разлому, ограничивающему Узон-Гейзерную кальдеру [20]. Также в долинах представлены разломы северо-восточного простирания (как правило, более молодые) и северо-западного (более древние) [21, 22]. В долине р. Гейзерной выделены два разлома аналогичных направлений, по которым реализуется газогидротермальная активность [18]. В геологическом строении обеих долин участвуют три комплекса пород: докальдерный (140–40 тыс. л. н), синхронный кальдерообразованию (40–39 тыс. л. н.) и посткальдерный (моложе 40 тыс. л. н). Последний представлен в основном экструзивными породами (липариты, дациты), чередующимися со слаболитифицированными вулканогенно-озерными отложениями: туфами, туфопесчаниками, туфогравелитами с линзами брекчий [6, 19, 23], которые в долине р. Гейзерной значительно изменены газогидротермальными процессами [14, 15].

**Подход LSM.** Хорошо описанный в геолого-геоморфологической литературе подход *landslide susceptibility modeling* [24–26] представляет собой оценку предрасположенности к оползням по фактическим их проявлениям в прошлом. Данные о том, проявляются (проявлялись) в каждой конкретной точке оползневые процессы или нет, базируются на различного рода инвентаризациях, картах, дешифровочных схемах и т. д.

LSM в строгом смысле — это не прогнозирование оползневой опасности, а классификация территории по двум классам: скорее оползневые или скорее безопасные. При этом результат оценки предрасположенности к оползням можно трактовать и как прогноз — либо бессрочный, либо, допуская, что предрасположенность к оползням не меняется значительно во времени, с горизонтом прогноза равным периоду, за который проявились оползни, включенные в используемую инвентаризацию. Иными словами, дальность «взгляда в прошлое» в этом случае примерно равна дальности «взгляда в будущее».

LSM — индуктивный подход, отталкивающийся от фактических данных и реальных проявлений оползневого процесса на исследуемой территории, по сути своей является противоположностью всем дедуктивным подходам, основанным на априорных допущениях о механизме процесса (к примеру, на информации о том, что процессам массовых блоковых движений подвержены склоны с крутизной более 15°). Слабость дедуктивных подходов в том, что они не учитывают локальную специфику и взаимовлияние разных факторов оползнеобразования на конкретной территории. Отдельные исследования [27] показывают, что LSM с прогнозированием оползневой опасности справляется существенно лучше, чем некоторые геомеханические подходы.

Созданная нами модель базируется на методе классификации RandomForest [28], входящем в группу методов деревьев решений. Для решения задач геоморфологии применение подобных методов описано в [29]. При использовании RandomForest создаются десятки или сотни отдельных деревьев классификации на частных подвыборках из объектов (в нашем случае точек на территории) и переменных, используемых для LSM, что обеспечивает более высокую точность и устойчивость к выбросам в данных.

Для LSM создана инвентаризация поверхностей скольжения крупных оползней в долинах рек Гейзерной и Шумной (44 объекта площадью 106,6 га/7,1 % от рассмотренного участка долины и 7 объектов площадью 15,4 га/1,3 % соответственно). Причем, важно использование контуров стенок срыва, отражающих границы областей зарождения оползней, а не положения их тел, которое во многом случайно. На территориях каждой из долин случайным образом было размещено по 10 000 точек, часть из которых оказалась в границах стенок срыва ранее произошедших оползней, остальные — за их пределами. Это позволило получить зависимую переменную для классификации — является ли участок фактически оползневым (класс 1) или же неоползневым (класс 2).

Впервые карта оползней в долине р. Гейзерной была составлена В.М. Двигало и И.В. Мелекесцевым [5]. Типизация гравитационных процессов на бортах долины нижнего течения р. Гейзерной на основе космического снимка 2009 г. была проведена О.В. Зеркалем, им же была составлена инвентаризационная карта оползней с классификацией по их предполагаемому возрасту [30, 31]. Однако все указанные исследования не вполне соответствовали нашим задачам, так как в них не очень четко были прописаны принципы выделения оползней. Изучение архивных материалов, анализ снимков высокого и сверхвысокого разрешения за шесть десятилетий [11, 12], полевые работы 2021–2023 гг.,

включавшие бурение и шурфование ряда террасовидных поверхностей на бортах долин, позволили нам выделить мощные оползневые тела, обычно состоявшие из серий отдельных блоков (ступеней), нередко имеющих обратный уклон, в некоторых случаях — соответствующие им детрузивные валы (где они сохранились) и, что наиболее важно для проводимого исследования, амфитеатры обрушения — очаги зарождения данных оползней (см. рис. 1). На используемой в работе карте показаны очаги зарождения 44 как современных (1981, 2007 и 2014 гг.), так и голоценовых (судя по данным AMS-датирования [16]) оползней в долине р. Гейзерной. В долине р. Шумной в результате дешифрирования снимков, полевых работ и аэровизуальных наблюдений было выделено семь очагов.

**Построение карт-предикторов.** Для всей площади были построены растровые изображения, характеризующие пространственные различия потенциальных предикторов оползней (рис. 2–5): геологических (стратиграфия, частично коррелирующая и с литологией (см. рис. 2, а); расстояний до разломов (см. рис. 2, б); тепловых аномалий, связанных с геотермальным теплом (см. рис. 3), — очаги газогидротермальной активности на поверхности и прогретые участки пород); геоморфологических (абсолютная высота; крутизна; ортогональные составляющие (косинус и синус) экспозиции; превышение над ближайшим створом сети тальвегов; индекс топографической позиции и ряд других морфометрических индексов) (см. рис. 4); гидрогеоморфологических (площадь водосбора, топографический индекс влажности) (см. рис. 5).

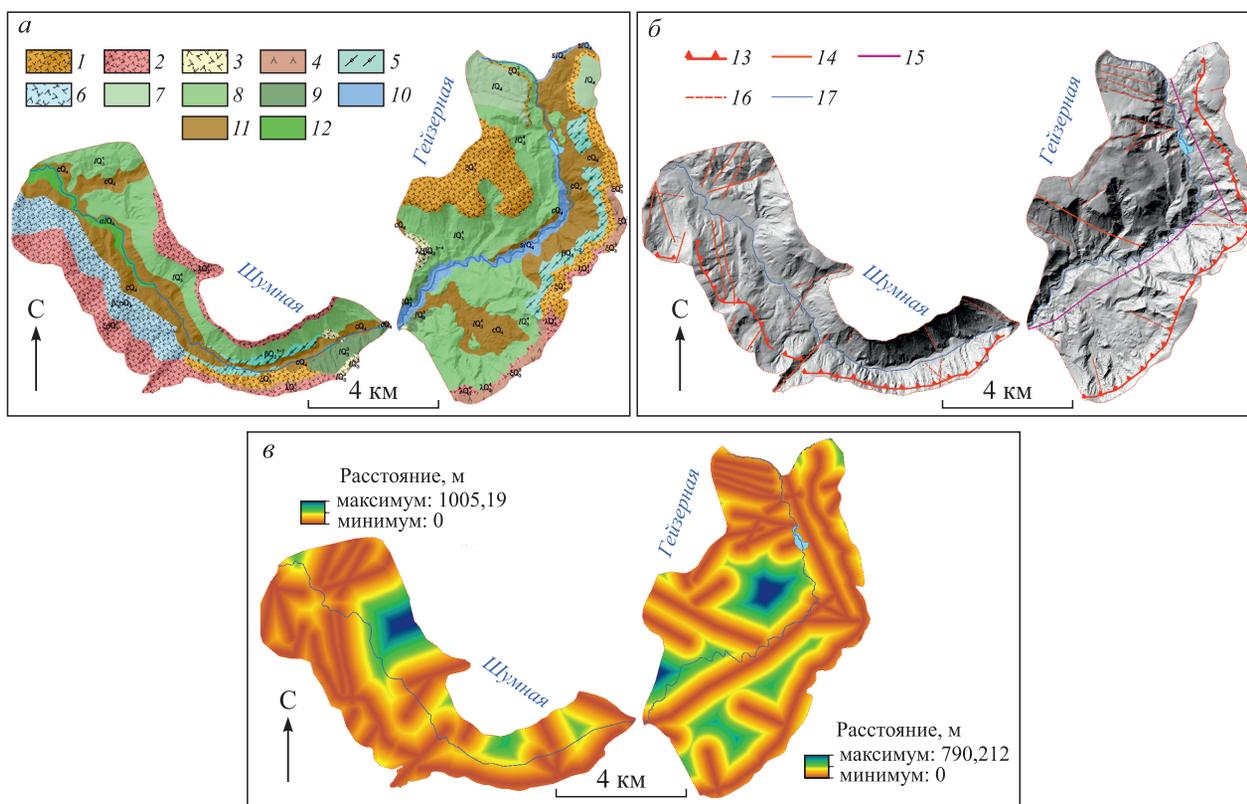


Рис. 2. Эндогенные предикторы для прогноза предрасположенности территорий долин р. Гейзерной и верхнего течения р. Шумной к оползням: литология (а), разломы (б), расстояния до разломов (в).

Литология (а) (по [2, 6, 19, 20, 23, 32] с дополнениями): Вулканический комплекс: 1 — экструзии: дациты, липариты ( $\xi Q_3^3$ ); 2 — кислые лавы ( $\lambda Q_4^4$ ); 3 — дайки основного состава, прорывающие докальдерный комплекс ( $\lambda \xi \beta Q_3^{3-4}$ ); 4 — взрывные отложения на бортах депрессии ( $\xi \sigma Q_3^3$ ); 5 — лавы и дайки основного состава ( $\beta Q_3^{1-2}$ ); 6 — докальдерный нерасчлененный комплекс лав и даек основного и среднего состава ( $\beta \xi \sigma Q_2$ ). Вулканогенно-озерные отложения: 7 — раннеголоценовый комплекс: туфы, туфогравелиты, туфобрекчии ( $1Q_4$ ); 8 — позднплейстоценовый посткальдерный комплекс: пемзы, туфы, туфопесчаники, туфогравелиты; аргиллиты ( $1Q_3^4$ ); 9 — позднплейстоценовый докальдерный комплекс: туфы, лавобрекчии, туфогравелиты ( $1Q_3^3$ ). Современные отложения: 10 — селевые: галечно-валунный материал с гравийно-песчаным заполнителем ( $sQ_4$ ); 11 — склоновые: щебнисто-дресвяный материал с песчано-суглинистым заполнителем ( $cQ_4$ ); 12 — аллювиальные: галька, валуны, гравий, песок ( $aQ_4$ ). Разломы (б): 13 — кальдерообразующий; 14 — установленные геолого-геофизическими методами [20–22, 32]; 15 — по которым реализуется газогидротермальная активность [18]; 16 — предполагаемые; 17 — водотоки.

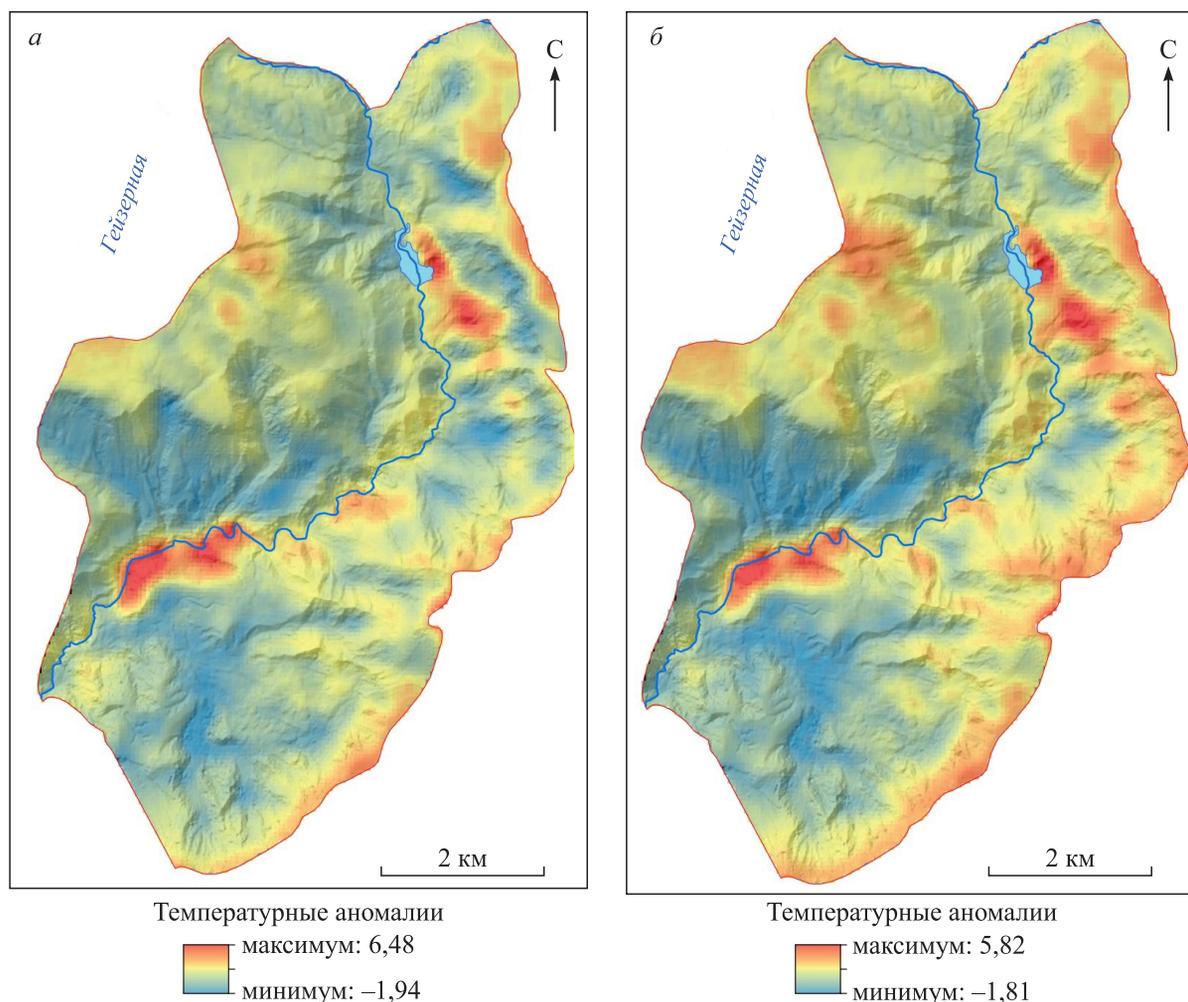


Рис. 3. Температурные аномалии земной поверхности долины р. Гейзерной за 2017–2021 гг. за вычетом топографических эффектов: крутизны, экспозиции, потенциала поступления солнечной радиации (а); крутизны, экспозиции, потенциала поступления солнечной радиации абсолютной высоты местности (б).

Традиционно учитываемая в подобных работах антропогенная активность нами не анализировалась в силу того, что в Кроноцком заповеднике она крайне мала. Не учитывался и тип растительности. В то же время, вероятно впервые в исследованиях, посвященных LSM, использованы данные о прогреве земной поверхности, причем не об общем, а лишь об аномалиях, не объясняемых топографической дифференциацией склонов.

В качестве исходных данных использовались карты геологического строения района исследований [19, 20, 32] и разломов [21, 22, 33].

По опубликованным данным, полевым материалам, а также по анализу космических снимков и теневой отмывке по ЦМР ArcticDEM v. 4.1 с пространственным разрешением 2 м (по ярко выраженным линеаментам, подчеркнутым эрозионной сетью) была составлена карта разрывных нарушений на верховья р. Шумной и бассейн р. Гейзерной. Наибольший интерес с точки зрения влияния на оползневую активность представляют кольцевой разлом, ограничивающий кальдеру, а также разломы линейные, подтвержденные геолого-геофизическими исследованиями. По их карте были сгенерированы растры расстояний до ближайшего разлома: геометрическое влияние разломов на оползневую опасность территории.

Первые два геоморфологических предиктора — абсолютная высота и крутизна — не нуждаются в пояснениях. Косинус и синус экспозиции (соответственно, «северность» и «восточность») (см. рис. 4, г, в) характеризуют направление падения склона, как и сама экспозиция, но не являются величинами с круговым распределением, а, следовательно, могут использоваться в линейных моделях

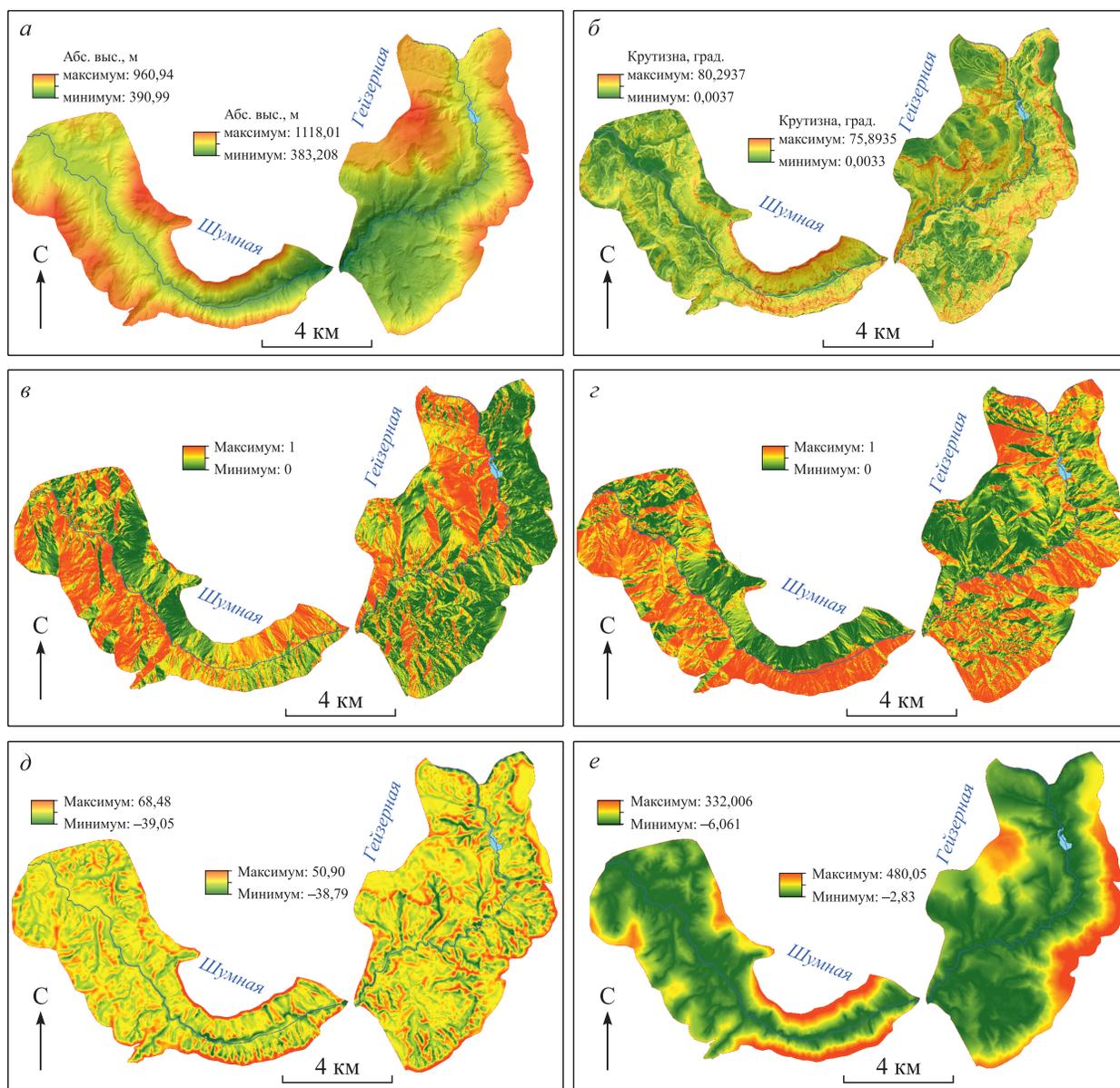


Рис. 4. Геоморфологические предикторы для прогноза предрасположенности территорий долин р. Гейзерной и верхнего течения р. Шумной к оползням: абсолютная высота территории (а), крутизна склонов (б), «восточность» (Е) (в), «северность» (N) (г), индекс топографической позиции (TPI) (д), превышение над ближайшим створом сети тальвегов (ΔH) (е).

[34]. Обе эти величины распределены от  $-1$  до  $1$ , где максимальное значение «северности» соответствует склонам северной экспозиции, минимальное — южной. Аналогично для «восточности». Строго говоря, их использование вместо экспозиции — лишь техническая необходимость. Индекс топографической позиции произвольной точки (см. рис. 4, д) в простейшем варианте отображает величину отклонения высоты этой точки от средней высоты некоторой ее окрестности — может быть выражен в метрах или единицах среднеквадратического отклонения [35]. Удельная площадь водосбора (specific catchment area, SCA) (см. рис. 5, б) — площадь, с которой аккумулируется сток в ячейке, при расчете ее на единицу длины горизонтали, проходящей через эту ячейку [36]. Отличается от общей водосборной площади способностью распределять водосборную площадь на всю ширину плоских днщ долинной сети. Топографический индекс увлажненности [37] — комплексная характеристика, являющаяся логарифмом отношения SCA точки и локального уклона в ней, максимальных значений приобретает на субгоризонтальных низких площадках пойм, минимальных — на очень

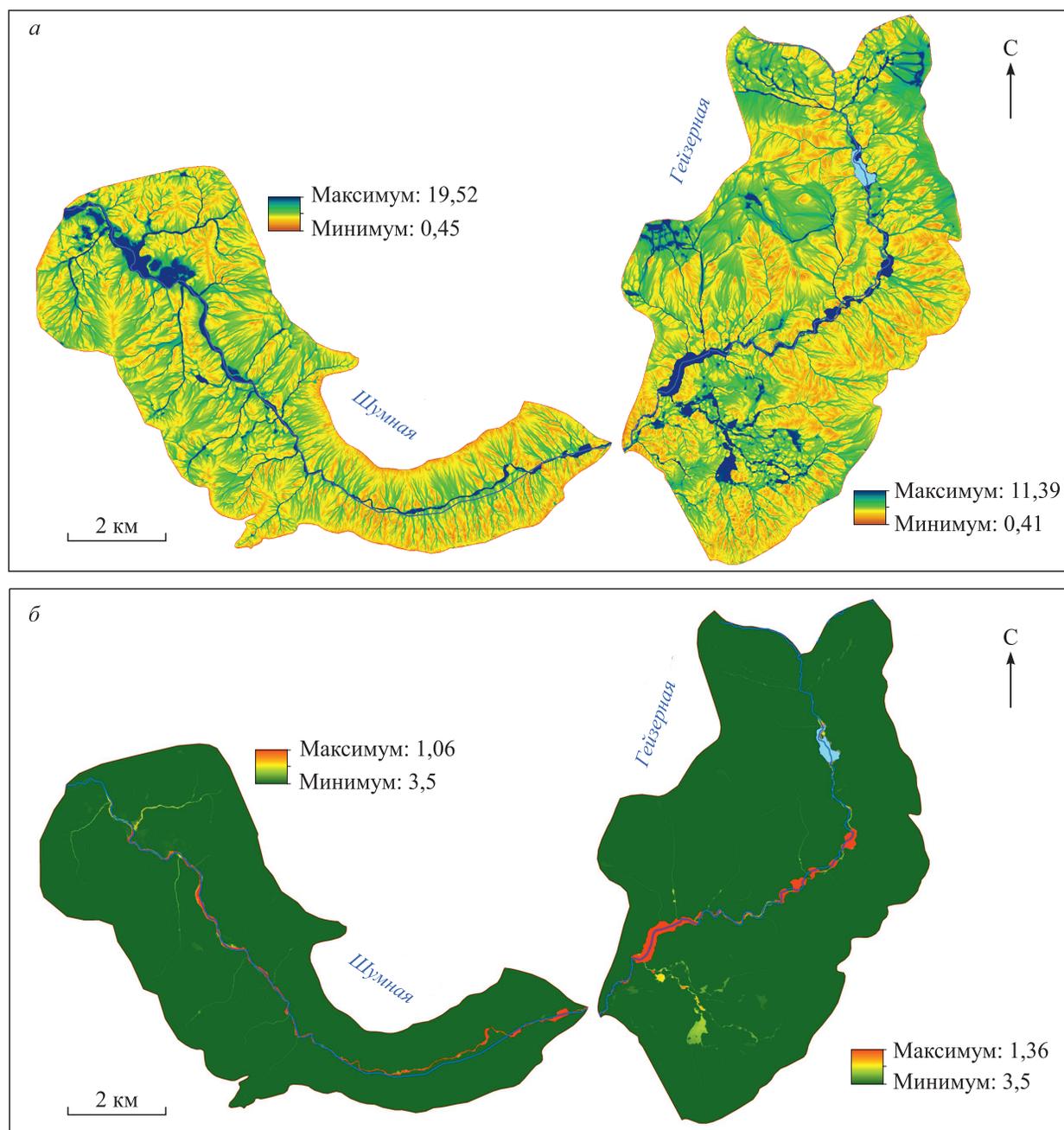


Рис. 5. Гидрогеоморфологические предикторы для прогноза предрасположенности территорий долин р. Гейзерной и верхнего течения р. Шумной к оползням: топографический индекс влажности (TWI) (а), удельная площадь водосбора (S) (б).

крутых склонах и/или на участках с малой водосборной площадью, в этих случаях морфометрические характеристики обеспечивают низкие показатели увлажнения грунтов за счет поверхностного стока.

Пространственная дифференциация всех предикторов показана на рис. 2–5.

**Температура земной поверхности.** Для получения данных о температуре земной поверхности использовались снимки Landsat-8 Level-2, хранящие уже извлеченную из инфракрасных каналов исходной съемки информацию о температуре земной поверхности (LST) за интервал с 2017 по 2021 гг. (всего 112 временных срезов). Как и в случае с растительностью, надежных оснований полагать, что очаги геотермального тепла на поверхности были неизменны во времени, нет. В то же время, думается, их положение не столь быстро меняется во времени. К сожалению, данные LST по определению

содержат фактическую температуру поверхности, наиболее прогретыми оказываются склоны южной экспозиции, наименее — северной, вне какой-либо связи с геотермальным теплом. Для получения температурных аномалий (см. рис. 3), не объясняемых рельефом и его соотношением с ходом Солнца по небосводу, уже описанным методом RandomForest была построена регрессионная модель для оценки тренда той части LST, которая объясняется различиями в рельефе. В качестве переменных для оценки ожидаемых (исходя исключительно из морфологии поверхности) температур земной поверхности использованы экспозиция, крутизна, суммарное годовое поступление прямой и рассеянной радиации при ясном небе, абсолютная высота.

Итоговая доля вариации температур, объясняемая морфологией рельефа, составила 84 %, на остальные факторы суммарно приходится 16 %, они включают различия погодных условий по участку исследования на даты съемки (усредненные за 4 года 112 снимков, т. е. их влияние минимизировано), различия альbedo поверхности и геотермальное тепло.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Река Гейзерная.** В долине р. Гейзерной идентифицировано 44 очага зарождения преимущественно крупных оползней глубокого (5–20 м) и очень глубокого заложения (>20 м) (оползни 2007 и 2014 гг.) (см. рис. 1). Большая часть морфологически выраженных стенок срыва отмечается на левом борту долины р. Гейзерной в ее прибровочной части. На правом борту оползневые участки прослеживаются в основном в местах термопроявлений в нижних частях склонов. Стенки срыва и оползневые цирки в пределах верхних уровней долины (выше 100 м над урезом реки) практически не выражены морфологически и, по-видимому, имеют более древний возраст. Лишь отдельные фрагменты поверхностей, лишенных растительности, дешифрируются на снимке. Исключение — нижнее течение Гейзерной, где стенки срыва хорошо маркируются в рельефе на правом борту и, вероятно, связаны с расседанием экстрезии плато Круглого.

Согласно полученной карте тепловых аномалий в долине реки Гейзерной установлено, что наиболее прогретые участки ( $\Delta T > 5^\circ\text{C}$ ) отмечаются в районе Гейзерного термального поля (участки I–IV [по 6, 19, 38], в особенности в пределах бывшего подпрудного озера 2007 г. Схожие значения отмечены на левом борту близ существующего подпрудного озера 2014 г. Привлекают внимание положительные аномалии ( $>3^\circ\text{C}$ ) в верхней (прибровочной) части левого борта долины. Они фиксируются также и инструментальными наблюдениями (температура выходов термальных источников при подъеме на гору Бортовую составляют  $>95^\circ\text{C}$ ). Также отмечены значительные аномалии ( $>5^\circ\text{C}$ ) на высотах 150–200 м относительно уреза в районе транзитной зоны обвала-оползня 2014 г. Действительно, в этом месте сконцентрировано большое количество небольших выходов термальных вод с температурами выше  $90^\circ\text{C}$ . На правом борту долины отмечаются в основном либо слабые положительные аномалии ( $<1^\circ\text{C}$ ), либо отрицательные ( $\sim -1^\circ\text{C}$ ). Здесь термопроявлений выше отметок 10–15 м относительно уреза реки не выявлено. Также очень холодная поверхность отмечается в верхней и средней частях уже частично задернованного тела обвала-оползня 2007 г. (хотя, по данным [4], на момент схода оползня здесь отмечались участки прогрева и парения грунта). Остальные положительные аномалии уже в пределах междуречий вероятнее всего с термопроявлениями не связаны и зависят от характера подстилающей поверхности (она в основном либо покрыта кустарничковой растительностью, либо лишена ее).

По результатам моделирования подтверждено, что левый борт долины р. Гейзерной более активен в оползневом отношении, при этом с вероятностью  $>0,7$  оползни в перспективе сойдут в его прибровочной части — вдоль восточной границы кальдеры (рис. 6). Юго-восточный край участка на данный момент не характеризуется значительной оползневой активностью, но с вероятностью 0,1–0,3 оползни могут сойти и здесь, так как в нижних частях склонов отмечаются небольшие оползневые террасовидные поверхности. На левом борту зафиксирована повышенная динамика склоновых процессов в нижней части долины на высотах 30–50 м над урезом (выше 0,5), приуроченная к отдельным выходам гидротерм. В прибровочных частях правого борта она наблюдается на четкой границе долины и экстрезий гор Круглой и Гейзерной. В верхнем течении с вероятностью выше 0,5 отмечены оползневые участки по правому борту долины р. Гейзерной и ее притоков, дренирующих склоны экстрезии гор Гейзерной и Открытой. На остальных участках в нижних частях долины до высоты 50 м над урезом, в том числе в пределах основных термальных полей, а также в контурах оползневых тел 2007 и 2014 гг., не выявлено интенсивной склоновой динамики. Однако здесь местами отмечаются малые оползни неглубокого заложения ( $<5$  м), которые не оказывают существенного влияния на морфодинамику долины и в работе не рассмотрены.

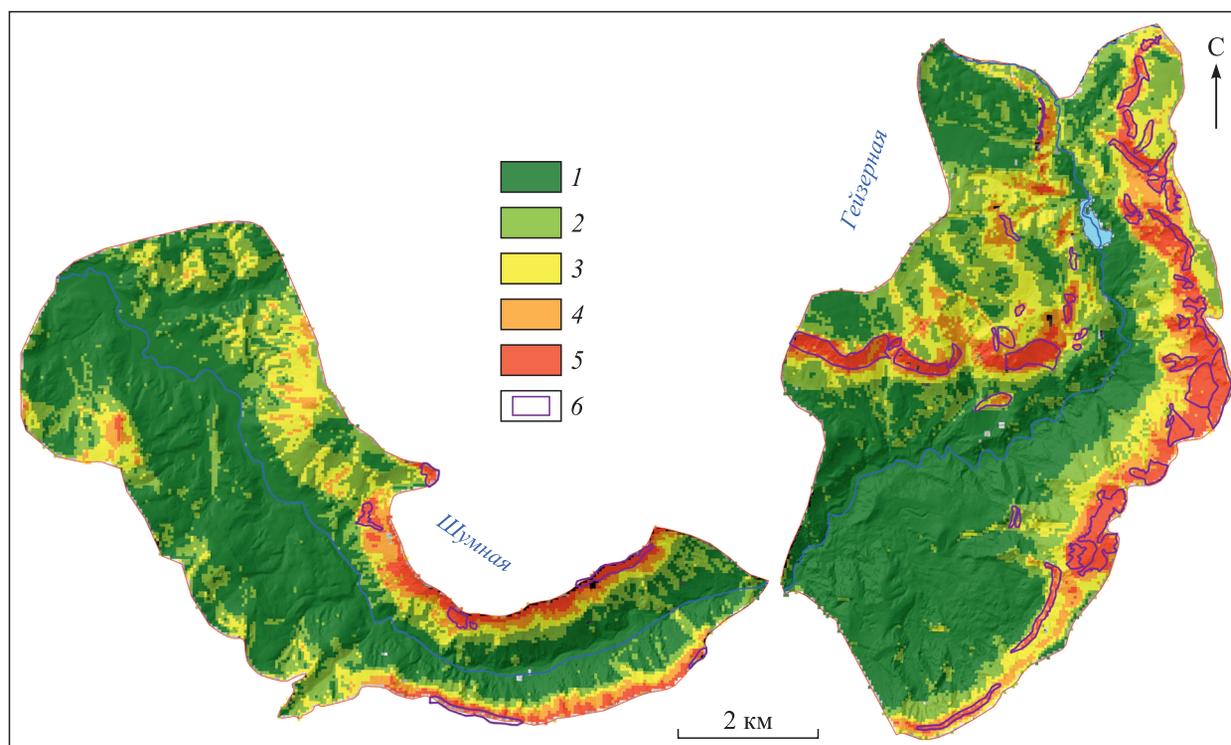


Рис. 6. Прогнозные схемы predisпоженности территорий долин р. Гейзерной и верхнего течения р. Шумной к оползням.

Вероятности predisпоженности участков к потенциальным поверхностям скольжения: 1 — 0–0,1; 2 — 0,1–0,3; 3 — 0,3–0,5; 4 — 0,5–0,7; 5 — >0,7. 6 — граница очагов зарождения оползней.

По результатам анализа эндогенных предикторов (см. рис. 2) оползневой опасности долины р. Гейзерной установлено, что наибольшую роль играют литолого-структурные неоднородности (денудационная устойчивость пород). Температурные аномалии оказываются на втором месте. Данный факт не противоречит рабочей гипотезе о том, что газогидротермальные процессы являются главным фактором и триггером обвално-оползневых процессов в долине, поскольку термопроявления идут в основном через узкие линейные зоны трещин, расположенных вдоль основного разлома края кальдеры. Они с трудом распознаются приборами при проведении тепловой съемки, а также по снимкам в ближнем инфракрасном диапазоне Landsat-8. Однако по последним данным, зафиксирована положительная температурная аномалия вдоль верхней части всего левого борта долины (+2–3 °С), в том числе на месте стенок срыва обвалов-оползней 2007 и 2014 гг. Также не учтено, что температура влияет на склоновые процессы не напрямую, а через газогидротермальную проработку пород (выветривание до глин) и их увлажнение, что способствует скольжению крупных блоков под действием гравитации. Работы Ю.В. Фроловой с коллегами показали исключительную важность этих процессов для оценки оползневой опасности [14, 15, 30].

Установлено, что температуры в рамках оползнеопасных участков в целом на 0,5 °С выше, чем на оползнебезопасных. Подобное различие не столь существенно по величине, но эффект статистически значимый ( $p < 0,05$ ).

Также значителен вклад расстояний от очагов зарождения оползней до зон разломов. Поверхности с активной склоновой динамикой в 1,5 раза ближе расположены к разломам и трещинам, чем безопасные участки. Разломы воздействуют на оползневую активность в основном через нарушение сплошности пород, особенно слаболитифицированных, а также путем реализации термогидроколлонн (потоков термальных вод) в их пределах.

Среди наиболее важных морфометрических параметров, влияющих на зарождение крупных оползней, можно выделить углы наклона склонов, относительную и абсолютную высоты, а также вертикальное расстояние до водотоков. Чем ближе поверхность расположена к водотоку, тем с большей частотой при подъеме уровня воды будет происходить подмыв склона и деляпсивное нарушение его устойчивости.

Таким образом, с вероятностью  $>0,7$  наиболее активная склоновая динамика наблюдается в пределах: краевых частей экструзивных массивов, состоящих из дацитов, андезито-дацитов и липаритов, при этом самыми потенциально генерирующими оползнями оказываются в значительной степени разнородные отложения позднеплейстоценового посткальдерного комплекса вулканогенно-озерных отложений, в состав которых входят слаболитифицированные туфопесчаники, туфогравелиты, пемзовые туфы с включением обломков лав; температурных аномалий выше  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (данный предиктор является значимым для левого борта кальдеры); расстояний до разломов от 0 до 200 м (в основном до кольцевых разломов края кальдеры по левому и линейных разломов по правому борту).

С учетом влияния морфометрических параметров наибольшей оползневой опасностью характеризуются следующие участки: с углом наклона склонов выше  $30^{\circ}$ , выше 50 м над урезом реки и выше 700 м над ур. моря.

**Река Шумная.** В верхнем течении р. Шумной на исследуемой территории — в основном в пределах каньонообразного отрезка долины между плато Широким и Круглым — выделены семь стенок срыва (см. рис. 6). Пять из них имеют в целом хорошую морфологическую выраженность. Стенки срыва в основном приурочены к верхним частям борта долины — к краям экструзивного массива плато Круглого и лавового плато Широкого.

По результатам моделирования только в верхних частях бортов с вероятностью  $>0,7$  можно ожидать новых сходов оползней в ближайшее время. На участке выше по течению вероятность оползней составляет менее 0,5 (см. рис. 6).

Главным из предикторов оползневой активности в данном случае оказывается вертикальное расстояние до водотоков, что может указывать на высокую роль экзогенных процессов и рельефа в склоновой морфодинамике данной части кальдеры — в виду отсутствия деятельности газогидротерм. Также незначительную роль играют абсолютные и относительные высоты.

Среди эндогенных предикторов основным оказывается литолого-структурные неоднородности пород, что свидетельствует о его высокой значимости для оползневых процессов в целом. В основном это краевые части лавового комплекса плато Круглого (липариты) и Широкого (дациты). «Оползневой» толщей и в данном случае являются вулканогенно-озерные отложения — пачка пемзовая, состоящая из туфов с незначительным количеством гравелитов, алевритов и линз брекчий (см. рис. 2, а).

Также небольшой вклад вносят разломы. В основном повышенная склоновая активность приурочена к кольцевому разлому края кальдеры на расстоянии от 0 до 200 м от него. Линейные разломы на данном участке на склоновые процессы практически не влияют. Это подтверждает тот факт, что последние активно осваиваются эрозионными и нивальными процессами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования можно сделать вывод, что наиболее активна оползневая морфодинамика в нижнем и среднем течении долины р. Гейзерной. В основном она сконцентрирована в пределах прибрежной части левого борта долины, где представлено благоприятное сочетание трех эндогенных факторов: литолого-структурных неоднородностей пород (контакт прочных пород экструзий со слаболитифицированными вулканогенно-озерными отложениями позднеплейстоценового посткальдерного комплекса), тектоники (зона кольцевого разлома вдоль края кальдеры) и геотермии (повышенные температурные аномалии  $>3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Здесь наиболее вероятен в дальнейшем сход оползней, в том числе крупных ( $p > 0,7$ ). Следовательно, требуется постоянно проводить мониторинг за изменением состояния поверхности, особенно в прибрежной части склонов. Подобные выводы подтверждаются результатами исследований [13]: современные экзогенные процессы в рамках данного участка наиболее активны, и отмечается усиление их темпов в последние годы. В пределах правого борта долины выделяется два участка с повышенной активностью склоновых процессов: «нижний» — в местах термальных проявлений (от  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$  сверх погрешности) и «верхний», выраженный фрагментарно, — в пределах краев экструзий плато Круглого и горы Гейзерной. Также отмечается их приуроченность к контакту пород лавового комплекса и вулканогенно-озерных отложений.

Для долины Шумной наблюдается слабая современная активность эндогенных процессов, поэтому здесь нет крупных оползневых тел и стенок срыва. Небольшие по размеру оползни в основном связаны с проявлением экзогенных процессов, что подтверждается высокой значимостью «неэндогенных предикторов» в итоговой оценке оползневой опасности долины р. Шумной по модели RandomForest. Несмотря на малое количество отдешифрированных стенок срыва, модель дала высо-

кую точность и показала географически правдоподобную картину, подтвержденную другими исследованиями [13].

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН (FMWS-2024-0005), полевые исследования проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда (21-17-00216). Разработка подхода к учету термальных аномалий при моделировании предрасположенности к оползням проведена за счет гранта Российского научного фонда (23-77-01027).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Делемень И.Ф., Еликан О.Д., Луканова Е.В. Уникально ли обрушение склона в Долине гейзеров 3 июня 2007 года? // Организация наблюдений и мониторинг опасных эндогенных процессов в Дальневосточном регионе ПК. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во Ин-та вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2007. — С. 12.
2. Леонов В.Л. Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине гейзеров, Камчатка // Материалы Первой регион. науч.-техн. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». — Петропавловск-Камчатский: Изд-во Геофизич. службы РАН, 2007. — С. 19–27.
3. Дрознин В.А., Двигало В.Н., Муравьев Я.Д. Оползень 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров на Камчатке // Тр. Междунар. конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Пятигорск, 22–29 сентября 2008 г. — Пятигорск: Изд-во Ин-та «Севкавгипроводхоз», 2008. — С. 41–44.
4. Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А., Калачева Е.Г., Чирков С.А., Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Леонов В.Л., Селиверстов Н.И. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестн. ДВО РАН. — 2008. — № 1. — С. 33–44.
5. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология. — 2009. — № 5. — С. 24–37.
6. Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дрознин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л. Жемчужина Камчатки — Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. — Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. — 108 с.
7. Сугрובה Н.Г., Сугробов В.М. Изменения режима термопроявлений Долины Гейзеров под влиянием циклона Эльза // Вопр. географии Камчатки. — 1985. — Вып. 9. — С. 88–94.
8. Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В., Жарков Р.В. Мониторинг и прогноз селевых процессов в камчатской Долине гейзеров на основе фотограмметрических исследований // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: материалы III Междунар. конф. Южно-Сахалинск, 22–26 сентября 2014 г. — Южно-Сахалинск: Изд-во Сахал. фил. Дальневост. геол. Ин-та ДВО РАН, 2014. — С. 105–108.
9. Леонов В.Л. Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия // Вестн. Камчат. регион. ассоциации Учеб.-науч. центр. Сер. Науки о Земле. — 2014. — № 1, вып. 23. — С. 7–20.
10. Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования // Геоморфология. — 2022. — № 2. — С. 60–73. — DOI: 10.31857/S0435428120020066
11. Лебедева Е.В., Балдина Е.А., Медведев А.А. Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения // Геоморфология. — 2022. — Т. 53, № 4. — С. 3–16. — DOI: 10.31857/S0435428122040095
12. Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Медведев А.А. Методика дешифрирования архивных и современных космических снимков для изучения динамики склоновых процессов в долине р. Гейзерной (Камчатка) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2022. — Т. 28, № 1. — С. 266–283. — DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283
13. Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Аникина Н.В. Активность геоморфологических процессов на склонах речных долин в условиях газогидротермальных проявлений (по разновременным снимкам и ЦМР) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2023. — Т. 29. — С. 272–287. — DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287
14. Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины гейзеров (полуостров Камчатка) // Инженерная геология. — 2015. — № 6. — С. 30–42.
15. Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Гвоздева И.П. Влияние гидротермальных преобразований на физико-механические свойства туфогенных пород Долины гейзеров и их роль в формировании оползней // Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тез. докл. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019 г. — Южно-Сахалинск: Изд-во Ин-та морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2019. — С. 186.
16. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Роль оползней в формировании гейзеров Долины Гейзеров, Камчатка // Материалы конф. «Вулканизм и связанные с ним процессы». — Петропавловск-Камчатский: Изд-во Ин-та вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2017. — С. 155–157.

17. Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the giant landslide // Applied Geochemistry. — 2012. — Vol. 27. — P. 1753–1766. — DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.011
18. Kiryukhin A.V. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides—mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) // Journ. of Volcanology and Geothermal Research. — 2016. — Vol. 323. — P. 129–147. — DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.05.008
19. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / Ред. А.В. Завадская. — М.: КРАСАНД, 2015. — 88 с.
20. Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование / Ред. С.И. Набоко. — М.: Недра, 1974. — 262 с.
21. Зеленин Е.А. Активная разломная тектоника областей современного вулканизма Камчатки: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М., 2018. — 26 с.
22. Kozhurin A., Zelenin E. An extending island arc: The case of Kamchatka // Tectonophysics. — 2017. — Vol. 706. — P. 91–102.
23. Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Зубин М.И. Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. — М.: Наука, 1991. — С. 94–141.
24. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models // Earth-Science Reviews. — 2018. — N 180. — P. 60–91. — DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001
25. Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2020. — № 3. — С. 22–33.
26. Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia Using UAV Data // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 18, N 13, 3629. — 17 p. — DOI: 10.3390/rs13183629
27. Galve J.P., Bartelletti C., Notti D., Fernández-Chacyn F., Barsanti M., Azacyn J.M., Pérez-Peca V., Giannecchini R., D'Amato Avanzi G., Galanti Y., Lamas F.J., Mateos R.M. Deterministic and Probabilistic Slope Stability Models Forecast Performance at ~1:5 000-Scale // Advancing Culture of Living with Landslides: Vol. 2 Advances in Landslide Science. — 2017. — P. 741–748. — DOI: 10.1007/978-3-319-53498-5\_85
28. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, N 1. — P. 5–32. — DOI: 10.1023/A:1010933404324
29. Харченко С.В. Распознавание образов в задачах картографирования рельефа суши // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2023. — Т. 87, № 1. — С. 1–15.
30. Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В. Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной. Геодинамические процессы и природные катастрофы // Тез. докл. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019 г. — Южно-Сахалинск: Изд-во Ин-та морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2019. — С. 138.
31. Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Landslide Activity and Landslide Hazard in Geysers Valley (Kamchatka Peninsula, Russia) // Natural Hazards and Risk Research in Russia, Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. — 2019. — P. 317–344. — DOI: 10.1007/978-3-319-91833-4\_23
32. Действующие вулканы Камчатки. В 2 томах. Т. 2 / Ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. — М.: Наука, 1991. — 302 с.
33. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. — М.: Наука, 1989. — 104 с.
34. King D., Bourennane H., Isambert M., Macaire J.J. Relationship of the Presence of a Non-Calcareous Clay-Loam Horizon to DEM Attributes in a Gently Sloping Area // Geoderma. — 1999. — Vol. 89, N 1–2. — P. 95–111.
35. Guisan A., Weiss S.B., Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution // Plant Ecology. — 1999. — N 143. — P. 107–122.
36. Gruber S., Peckham S. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology // Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. — Amsterdam: Elsevier, 2009. — P. 293–308. — DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00007-X
37. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology // Hydrology Science Bulletin. — 1979. — N 24 (1). — P. 43–69.
38. Леонов А.В. Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника // Долина гейзеров и кальдера Узон: история и современность. — М.: Реарт, 2017. — 384 с.

*Поступила в редакцию 11.10.2024*

*После доработки 13.01.2025*

*Принята к публикации 21.05.2025*