

**АКТИВИЗАЦИЯ ОПОЛЗНЕЙ ПРИ ОСВОЕНИИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ*****В.А. Лобкина, Ю.В. Генсиоровский****ФБГУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал, ул. Горького 25,  
г. Южно-Сахалинск, 693023; e-mail: valentina-lobkina@yandex.ru*

Поступила в редакцию 04 июля 2023 г.

Освоение горных территорий ведет к активизации опасных экзогенных процессов, прежде всего оползней и селей. Одним из важных факторов, определяющих интенсивность проявления этих процессов, и значительно влияющим на их характеристики, является увлажнение горных пород в потенциальных оползневых и селевых массивах. В работе рассматривается случай активизации оползня на территории горнолыжного курорта «Горный воздух» в декабре 2021 г. Представлена прогностическая модель формирования оползней, вызванных избыточным увлажнением склонов, откалиброванная под условия южного Сахалина. Для калибровки модели были собраны данные о случаях формирования оползней и селей в радиусе 30 км от гидрометеостанции Южно-Сахалинск. В прогностической модели используются суточное количество осадков, осадки, предшествующие событию, и их кумулятивное количество. Все эти данные находятся в открытом доступе, что делает доступным калибровку модели под любую ближайшую гидрометеорологическую станцию. Суточный порог осадков, при котором вероятно формирование оползней и селей для рассматриваемой территории, был определен в 51.4 мм.

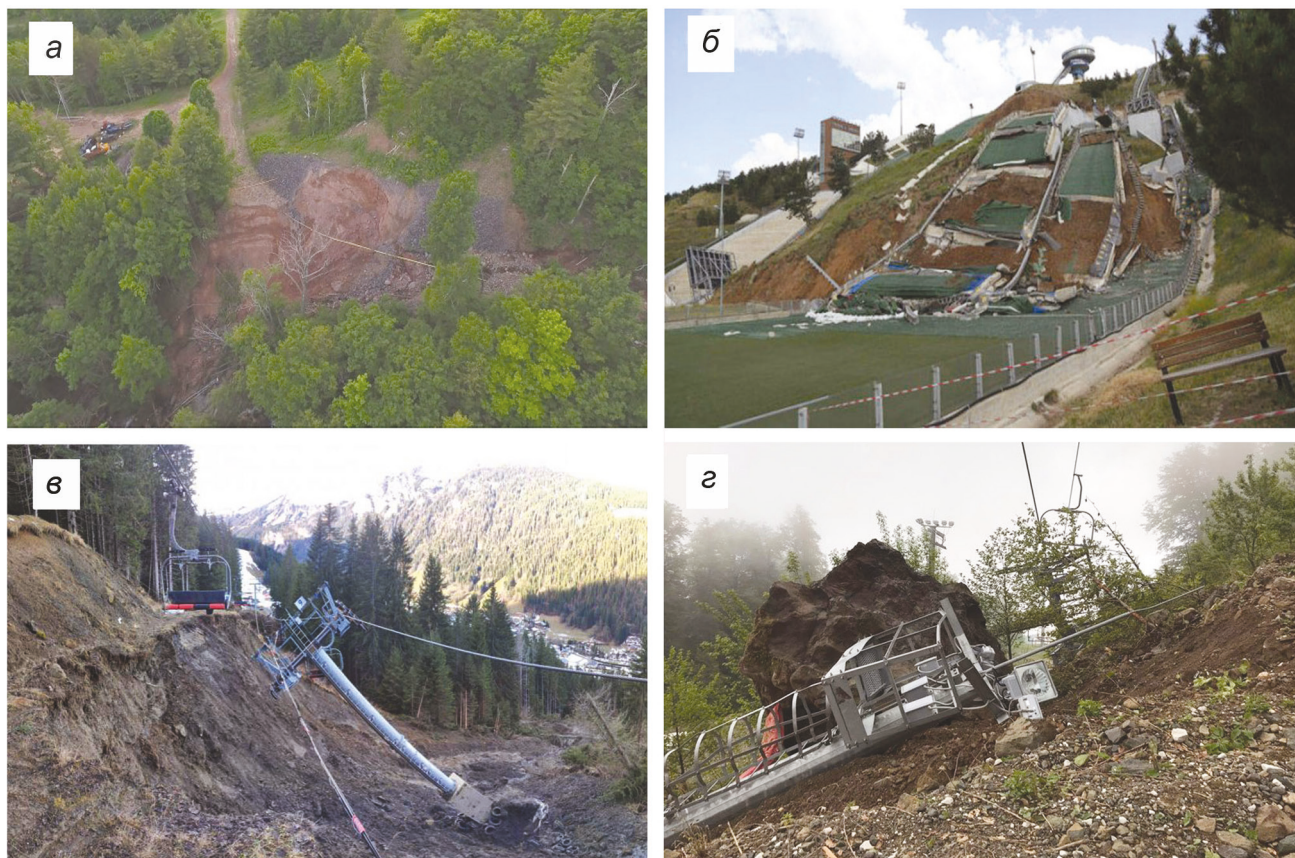
***Ключевые слова:*** оползни, техногенное воздействие, горнолыжные курорты, Сахалин.**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время на территории Российской Федерации происходит активное освоение горных территорий в рекреационных целях. В горах идет строительство горнолыжной и туристической инфраструктуры, прокладываются автомобильные дороги, линии электропередач, газопроводы, сети водоснабжения и канализации. Интенсивное строительство, как показывает практика, влечет за собой активизацию экзогенных геодинамических процессов (далее ЭГП), особенно на начальном этапе освоения территории.

Это связано, в первую очередь, с планировкой склонов под строительство. Сведение леса и срезка почвенного слоя влекут за собой увеличение поступления влаги на эти участки и, как следствие, увлажнение подстилающих горных пород в гораздо большем объеме, чем в ненарушенном состоянии. Перемещение больших масс срезанных со склонов грунтов и их временное складирование в пределах горных территорий неизбежно приводит к формированию потенциальных селевых и оползневых массивов антропогенного происхождения [1, 3, 7, 9, 11, 12]. Пока на спланированных склонах нет дернового покрова, при

выпадении жидких осадков и таянии снега активно проявляют себя процессы плоскостной эрозии.

В дальнейшем к искусственным факторам активизации ЭГП добавляются протечки различных водоводов, заложенных на склонах: водопроводов подачи воды к гостиничным комплексам и системам оснежения трасс, канализационных коллекторов, систем отвода поверхностных вод. Аварии именно на этих системах увеличивают риск формирования оползней. В качестве примера можно привести разрушение горнолыжных трасс в г. Рипли, штат Мичиган (США), после выпадения интенсивных дождей в июне 2017 г., когда существующие системы не справились с отводом воды, в результате чего активизировались оползневые процессы (рис. 1, а). Активизация оползней в районах размещения спортивных объектов отмечалась в Турции. В 2014 г. оползнями был разрушен комплекс трамплинов ценой более 20 млн евро (рис. 1, б). Разрушение канатных дорог неоднократно отмечалось во Франции, так в декабре 2022 г. были повреждены опоры канатной дороги на горнолыжном курорте Шатель (рис. 1, в). В Российской Федерации последний случай повреждения горнолыжной инфраструктуры был отмечен в конце мая 2017 г. На курор-



**Рис. 1.** Примеры активизации оползней на горнолыжных курортах Мира.

*a* – оползень на горнолыжной трассе в г. Рипли, штат Мичиган (США), 2017 г. (Фото с сайта <https://www.mtu.edu/> <https://www.mtu.edu/geo/undergraduate/capstone/2018-19/tripley/>); *б* – разрушение трамплинов в Турции, 2014 (<http://www.elitehaber.com/10350-erzurumdaki-atlama-kuleleri-coktu.html>); *в* – разрушение опор канатной дороги на горнолыжном курорте Шатель, Франция, 2022 г. (<https://www.ski.ru/az/blogs/post/opolzen-uronil-oporu-podemnika-na-francuzskom-gornolyzhnom-kurorte/>); *г* – последствия формирования оползня на трассах курорта Горки Город, Россия, 2017 г. (<https://funsochi.ru/incidents/landslide-gorky-gorod>).

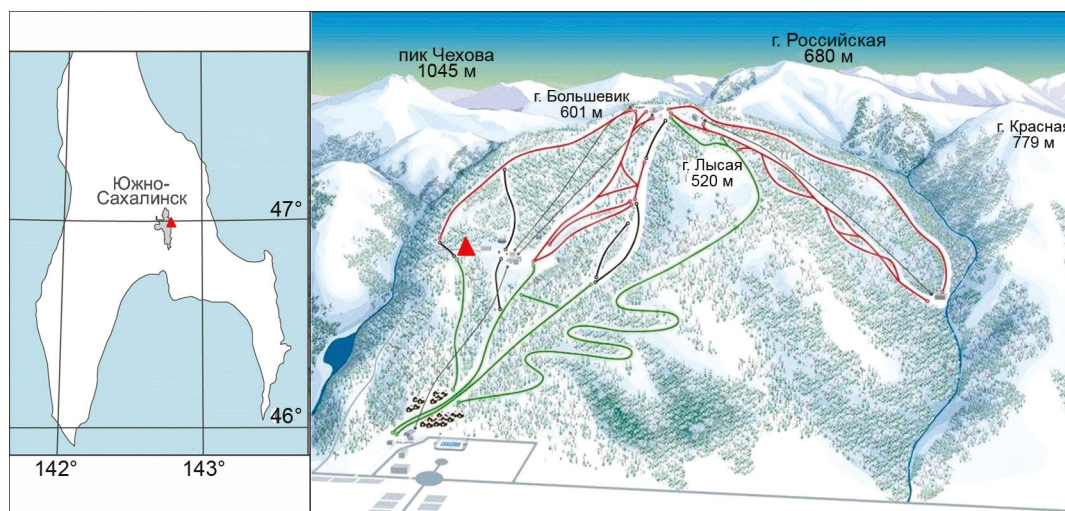
те Горки Город (Западный Кавказ) сформировался оползень площадью около 3 гектаров, разрушивший горнолыжные трассы и несколько опор канатной дороги (рис. 1, *г*).

В Сахалинской области основным районом развития горнолыжной туристической инфраструктуры, является Сусунайский хребет, находящийся в непосредственной близости от областного центра г. Южно-Сахалинск. На склонах хребта расположены (существующие и проектируемые) объекты, входящие в инфраструктуру спортивно-туристического комплекса ОАУ «СТК Горный Воздух» [2]. В настоящее время действуют 35 км горнолыжных трасс, 5 канатных дорог, 13 км системы оснежения склонов (рис. 2). До 2025 г. планируется увеличить длину горнолыжных трасс до 60 км, канатных дорог – до 7 км, систему оснежения продлить до 26 км. На склонах гор и в предгорьях планируется возвести 8 объектов гостиничного бизнеса с сопутствующей инфраструктурой.

При этом основная антропогенная нагрузка придется на западный склон г. Большевик, где уже сейчас находится большая часть инфраструктуры курорта [2].

Исследования оползневых процессов на территории г. Южно-Сахалинск, в границы которого входит и площадь отведенная ОАУ «СТК Горный Воздух», проводившиеся в 2011 г. (Отчет о научно-исследовательских работах «Разработка схем планировочных ограничений (оползневая опасность) к генеральному плану территории населенного пункта Сахалинской области. Схемы планировочных ограничений к генеральным планам г. Макаров, г. Южно-Сахалинск, г. Анива, с. Воскресенское, с. Петропавловское, с. Санаторный Сахалинской области (оползневая опасность)»). ДВГИ ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 2011) показали, что оползнеопасными являются склоны отрогов Сусунайского хребта и делювиально-пролювиальные шлейфы, прилегающие к городской застройке, в том числе и склоны г. Большевик.





**Рис. 2.** Обзорная карта расположения курорта «Горный Воздух» [2].

Красным треугольником обозначено место формирования оползня.

В последующие годы авторы [8, 14], работавшие непосредственно на склоне г. Большевик, указывали на достаточную устойчивость склонов и возможность формирования только поверхностных оползней-оплывин с глубиной захвата не более 300 см. В данных работах была выполнена и оценка устойчивости склонов разных экспозиций г. Большевик. По результатам этих расчетов был сделан вывод о том, что склоны будут находиться в устойчивом состоянии даже с учетом антропогенного воздействия при строительстве инфраструктуры курорта «Горный Воздух» и её дальнейшей эксплуатации.

Однако формирование оползня на западном склоне г. Большевик в 2021–2022 гг. говорит о том, что при определенном сочетании природных и антропогенных факторов активизация оползневых процессов с ущербом для туристической инфраструктуры возможна.

Рассматриваемая авторами в этой статье антропогенная активизация оползня первично произошла 09–10 декабря 2021 г. на участке автодороги «Подъезд к горнолыжной базе Горный воздух» в районе ее примыкания к площадке строительства открытого кинотеатра. Данная дорога соединяет г. Южно-Сахалинск со средней станцией канатной дороги, где находятся еще ряд действующих объектов курорта. Оползневое движение обозначалось во время строительных работ по монтажу подпорной стенки вдоль западного откоса дороги. Перепад высот между точкой заезда на дорогу со стороны ул. Горького и средней площадкой, в районе которой и произошла оползневая подвижка, составляет около 150 м, протяженность дороги 1.6 км.

Необходимо заметить, что данный случай активизации оползней на расширяемой площади застройки курорта не единственный. Сведение древесной растительности привело к появлению большого количества эрозионных очагов на новых трассах курорта. Множественные оползневые подвижки отмечались во второй декаде мая 2020 г. Оползни небольшого объема (сплывы) сформировались на трассах западного и северного склонов г. Большевик в высотной зоне 400–450 м [6].

Цель настоящей работы – выяснение причин формирования оползня, а также калибровка прогностической модели формирования оползней, вызванных избыточным увлажнением склонов, под условия южного Сахалина; оценка возможности использования данной модели для определения опасности активизации ЭГП до начала проведения работ на склонах. Использование методов превентивной оценки формирования дождевых оползней при возведении объектов инфраструктуры позволит определить опасные периоды, когда вскрытие склона может привести к активизации оползневой деятельности.

#### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно материалов отчета («Разработка схем планировочных ограничений (оползневая опасность) к генеральному плану территории населенного пункта Сахалинской области. Схемы планировочных ограничений к генеральным планам г. Макаров, г. Южно-Сахалинск, г. Анива, с. Воскресенское, с. Петропавловское, с. Санаторный Сахалинской области (оползневая опасность)»). ДВГИ ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 2011), территория «Горного Воздуха» вхо-

дит в «Оползневой участок I», на котором возможно формирование оползней-оплывин (сплывов) и оползней-обвалов объёмом от 100 м<sup>3</sup> до 3000 м<sup>3</sup>. В выше-названном отчете также, указано, что при антропогенном воздействии на склоны возможно формирование оползней-обвалов и есть условия для развития вязкопластических оползней в глинистых образованиях предгорных шлейфов.

Активизация оползневого процесса произошла на автодороге, проходящей над участком размещения открытого кинотеатра (западный склон г. Большевик). При ее реконструкции (2020 г.) была выполнена подрезка склона над существующим полотном вдоль восточного края. Склон подрезан на высоту от 2.0 до 4.0 м.

Древесная растительность на склоне разрежена. Это вызвано как антропогенной деятельностью (прорубка просек под газопровод, водопровод, горнолыжную трассу «Динамо»), так и естественными причинами – ветровалами 2014–15 гг., что привело к гибели леса, связанной с подрывом корневой системы. Сокращение древесной растительности способствует интенсивному стоку дождевых вод при ливневых осадках. В зимний период редкий древостой способствует избыточному накоплению снега, а хорошая освещенность склона – резкому дружному таянию снега весной. Несмотря на то, что при обследовании склона (декабрь 2022 г.) выходов на дневную поверхность родников и истоков водотоков не обнаружено, в рельефе достаточно хорошо выражены две ложбины формирования стока. Это говорит о наличии благоприятных условий для поверхностного увлажнения склона.

По данным гидрогеологических наблюдений (данные предоставлены ОАУ СТК «Горный воздух»), в скважинах на оползневом участке водоносный горизонт отмечен на глубинах 2.2–10.2 м, что соответствует абсолютным отметкам 269.43–274.8 м (БС). Воды обладают небольшим местным напором 0.3–1.3 м.

По данным бурения, непосредственно в пределах оползневого участка выделено 6 инженерно-гео-

логических элементов грунта (далее ИГЭ) (табл. 1). К специфическим следует отнести техногенные грунты, представленные грунтами земляного полотна и дорожной одеждой – щебеночная смесь (щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, твердым, маловлажным (ИГЭ 1.2)). Основание склона сложено элювиальными грунтами (ИГЭ 1–4), которые из-за неоднородности состава и свойств по глубине, в связи с разной степенью выветрелости, нельзя назвать надежным.

## МЕТОДЫ

В настоящее время существует достаточно много методов расчета устойчивости склонов. Их выбор в первую очередь определяется типом оползневого процесса и механизмом возможного смещения оползневых масс. При этом каждый метод расчета характеризуется своей оригинальной системой сил, полученной в данном способе с использованием того или иного допущения, необходимость которого связана со статической неопределенностью задачи.

Для расчета устойчивости склона в этой работе был использован метод Бишопа. В настоящее время этот метод является наиболее широко используемым и применяется для решения различных задач [13, 16]. Метод удовлетворяет условию равновесия обших моментов и вертикальных сил. Нормальные реакции основания в отсеках определяются из условия выполнения уравнения равновесия в каждом отсеке в проекции на вертикальную ось. Все внешние силы, действующие на каждый отсек, приводятся к равнодействующей.

Граница оползневой зоны в районе строительства, длина опасного участка и вероятный характер воздействия оползневых процессов на дорожное полотно определялись непосредственно во время полевых работ. Устойчивость оползневых комплексов определялась на основе инженерно-геологических данных, полученных по результатам бурения на участке (4 скважины глубиной 10.0–13.0 м) (данные предоставлены

Таблица 1. Физико-механические свойства грунтов на оползневом участке.

№ ИГЭ	Наименование	Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.	Плотность, г/см <sup>3</sup>
1	Суглинок легкий пылеватый твердый с дресвой	30.4	20.1	1.93
1.2	Техногенный: щебеночная смесь (щебенистый грунт с суглинистым заполнителем)	10.0	19.0	1.75
2	Щебенистый грунт с супесчаным заполнителем до 19 %	9.7	32.4	2.03
3	Суглинок легкий пылеватый твердый дресвяный до 46 %	20.1	29.7	1.92
4	Дресвяный грунт с суглинистым заполнителем до 47 %	20.1	29.2	2.71
5	Сланец средней прочности	7.4	28.0	2.19

ОАУ СТК «Горный воздух»). Положение скважин показано на рисунке 3.

Помимо расчета движения склона и выяснения причин его активизации, выполнена калибровка прогностической модели формирования оползней вызываемых осадками [15], для условий южного Сахалина. Для этого использовались архивные данные о суточном количестве осадков на гидрометеорологической станции (далее ГМС) Южно-Сахалинск, расположенной в непосредственной близости от рассматриваемого оползня. Станция находится в долине р. Сусуя (22 абс. м). Средняя высота водоразделов, представленных двумя параллельными горными сооружениями: Камышовым и Сусунайским хребтами, составляет порядка 400 м. Для этой территории за период наблюдений с 1947 по 2020 гг. удалось найти данные о 28 днях, в которые формировались ЭГП (преимущественно оползни и сели) природного и антропогенного характера.

Период возможного формирования оползней и селей для данной территории затяжной и продолжается с мая по октябрь. Нами рассматривается случай формирования оползня в декабре, т.е. в зимний период, что для юга о. Сахалин не характерно. За период с 1947 по 2020 г. сведений о формировании оползней зимой на юге Сахалина нет, крайние сроки формирования оползней относятся к третьей декаде октября.

#### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

##### Первый период активизации

Первичная активизация оползня была отмечена в начале ноября 2021 г. во время земляных работ по устройству габионной подпорной стенки, которая должна была укрепить откос дороги над площадкой открытого кинотеатра. Общая протяженность строящейся стенки составляет 300 м. Изменение угла откоса дороги, совпавшее с ремонтными работами по обустройству дорожного полотна и ограждения, привело к открытию поперечных и продольных трещин в асфальтобетонном дорожном покрытии (рис. 3).

Необходимо отметить, что ноябрь и начало декабря 2021 г. по метеорологическим условиям отличались от среднесуточных значений. Данный период характеризовался более высокими температурами воздуха и большей суммой осадков, представленных преимущественно в виде интенсивных дождей. Снежный покров, сформировавшийся в этот период, таял, что создавало дополнительные условия для увлажнения грунтов. Среднесуточная температура воздуха в ноябре составила +1.3 °С [4], что выше среднесуточных значений на 3.0 °С [5]. Количество выпавших

осадков за месяц составило 122.0 мм, что составляет 163 % от нормы.

Активное оползневое движение склона началось 09–10.12.2021 г. Количество осадков за первую декаду месяца достигло 38.0 мм (по данным ГМС Южно-Сахалинск), что составляет 58 % месячной нормы. Часть осадков, выпавшая в твердом виде, сформировала ровный слой снежного покрова на поверхности почвы, что остановило поступление влаги в грунты. Высота снежного покрова на ГМС начала расти после 01.12.2021 г.

Запас воды в снежном покрове, по данным изучения шурфа, сделанного 04.12.2021 г. авторами, выше оползневого участка превышал сумму осадков зарегистрированных на ГМС на тот же период, и составил 66.0 мм, при средней высоте снега 39 см (сказывается влияние высотного градиента, которое ранее отмечалось в работах авторов). Высота снежного покрова на ГМС максимально доходила до 13 см (04.12.2021 г.). Повышение температуры воздуха (максимально до +9.0 °С), произошедшее накануне события, привело к таянию снега. Сформировавшийся снежный покров был разрушен и имел на склоне очаговый характер залегания. Талая вода поступала на поверхность грунтов и далее в еще не промерзшую толщину, обводняя верхние горизонты. Ливневая канализация над верхним краем автодороги не отвела эту воду, что привело к раскрытию трещин в полотне автодороги.

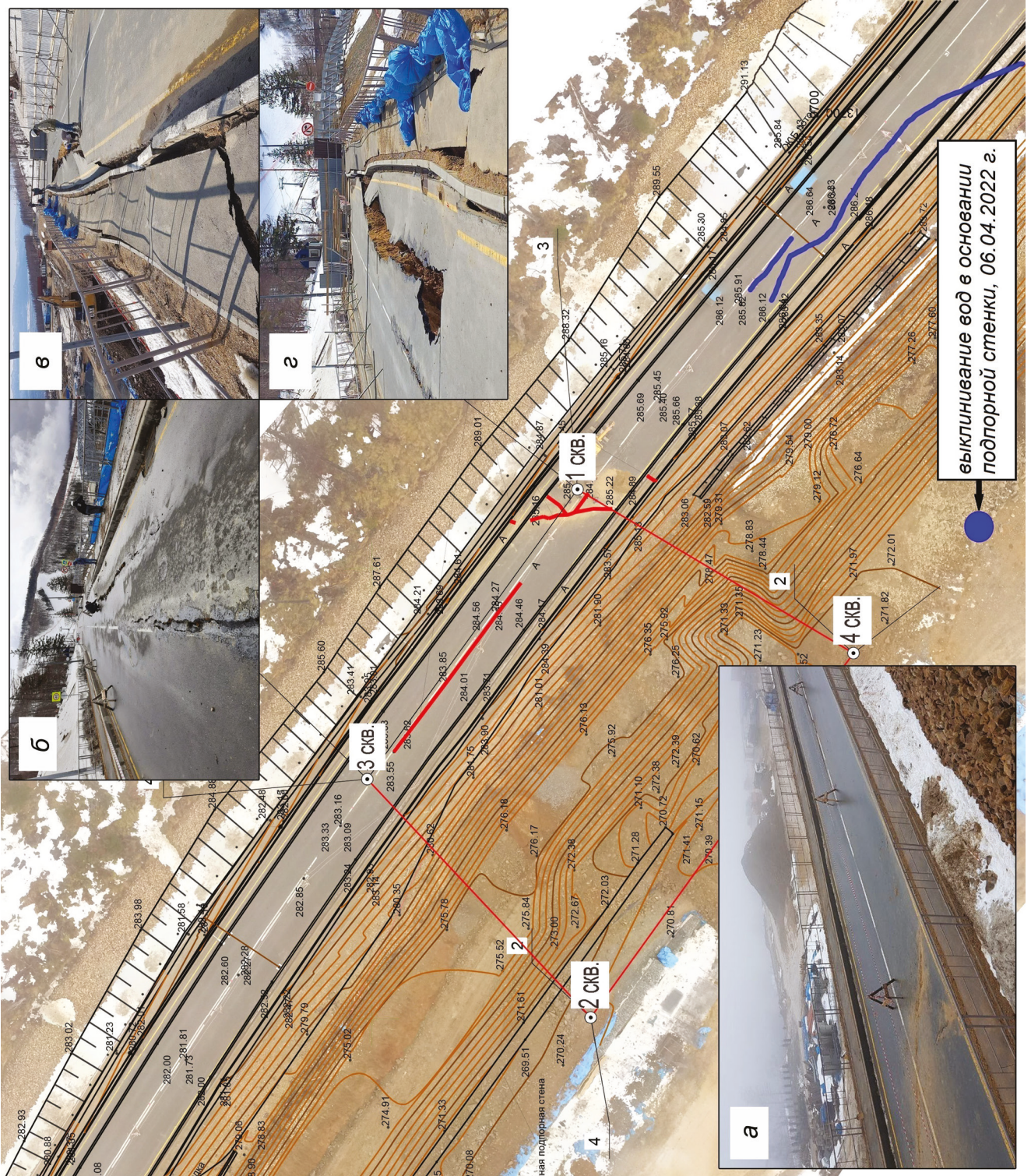
Сформировавшийся оползень представляет собой оползень неглубокого заложения. Протяженность раскрытых продольных трещин достигала 40–50 м, их глубина 10–15 см (рис. 3, а). В районе участка строительства подпорной стенки образовалась диагональная трещина (ступень отседания) протяженностью 20–25 м, глубиной до 50 см. На склоне отмечены трещины отседания.

Также отмечено медленное движение склона между трассой газпровода и верхним откосом автодороги. Ближе к откосу это проявилось более отчетливо через четко выраженный наклон древесной растительности, как вверх, так и вниз по склону. В виду большой антропогенной нагрузки на склон был дан прогноз о возможной активизации оползневого смещения в весенний период после разрушения устойчивого снежного покрова и повышения уровня стояния грунтовых вод.

##### Второй период активизации

Повторная активизация оползневых процессов на рассматриваемом участке произошла 05–06.04.2022 г. Оползень неглубокого заложения сформировался в 20 м к востоку от первого участка (рис. 3). Как и в первом случае, метеорологические







условия существенно отличались от их среднесуточных величин.

Переход среднесуточной температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  произошел 25.03.2022 г. По данным [4], среднесуточные температуры воздуха 25–31.03.2022 г. колебались в пределах  $+0,4$  –  $+4,2^{\circ}\text{C}$ . В первых числах апреля среднесуточная температура опустилась ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , но уже 03.04.2022 г. среднесуточная температура воздуха поднялась до отметки  $+2,2^{\circ}\text{C}$ , а в последующие двое суток составила  $+5,3^{\circ}\text{C}$ . Такой ход температуры воздуха привел к интенсивной водоотдаче из снежного покрова. К началу активного снеготаяния снеговой запас на ГМС составлял 138 мм. За сутки с 29 по 30 марта высота снега по постоянной рейке на ГМС уменьшилась на 10 см (с 46 до 36 см), далее снижение мощности снега происходило более плавно и ко второму периоду активизации оползня снежный покров имел очаговый характер. Помимо высокой температуры воздуха активному снеготаянию способствовала западная экспозиция, при которой склон длительное время остается освещенным. Также не стоит забывать об антропогенных факторах раннего снеготаяния, таких как расчистка полотна автомобильной дороги и строительные работы на откосе, с его расчисткой от снега. Все это в сочетании с сезонным подъемом уровня грунтовых вод привело к интенсивному увлажнению грунтов.

На восточном краю участка по западной стороне автомобильной дороги сформировалась трещина отседания имеющая циркулярную форму (рис. 3). Величина просадки по полотну дороги составила 30–40 см (рис. 3, б). По западному краю автодороги под асфальтобетонным покрытием были отмечены пустоты, где просадка грунта составляла более 100 см, а раскрытие, с отрывом покрытия от бордюра, достигало 30–60 см. У подошвы склона 06 апреля был отмечен выход воды на дневную поверхность и формирование временного водотока, который сбрасывался на рельеф (рис. 3).

Вечером 07 апреля на участке сформировалась стенка срыва оползня длиной 30 м и видимой глубиной 100–130 см (рис. 3, в, г). Произошло выпирание породы в подошве склона. На самом откосе образовались многочисленные разрывные трещины глубиной до 50 см. С учетом глубины захвата и ширины стенки отседания можно говорить, что в оползневой процесс было вовлечено не менее  $1\,500\text{ м}^3$  грунта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

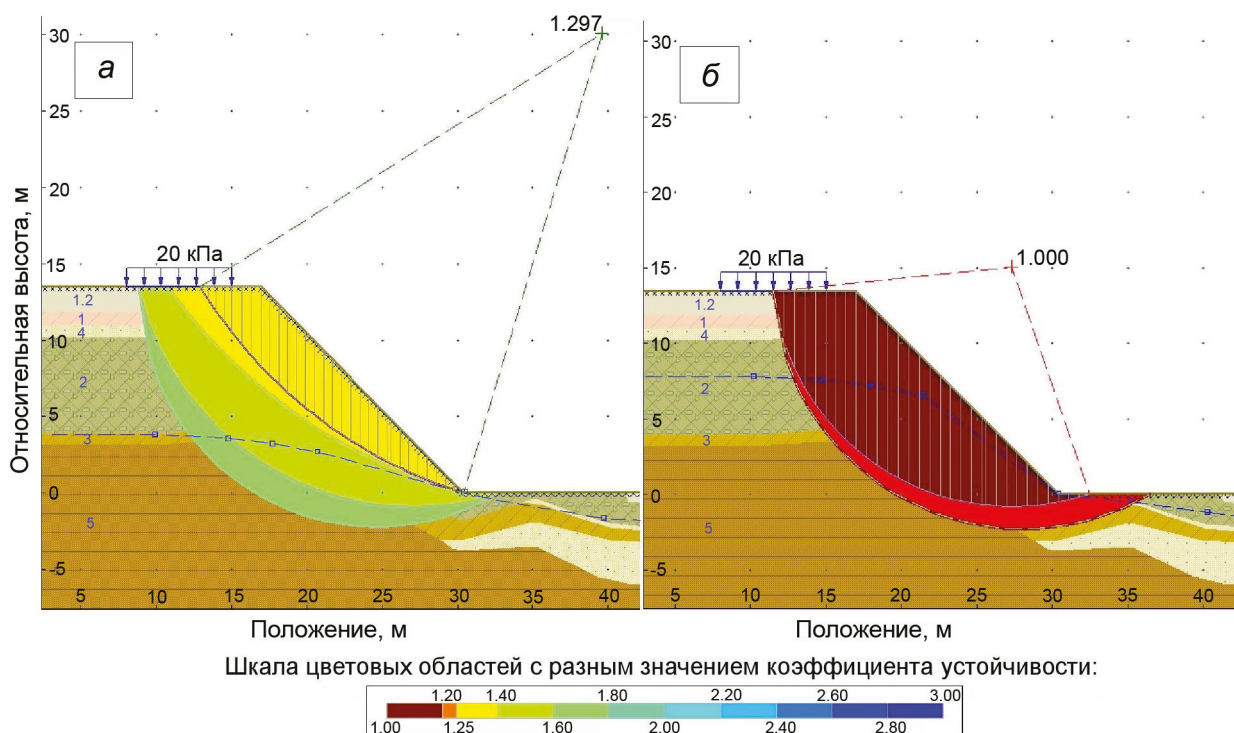
Для оползнеопасного участка выполнен расчет устойчивости склона. Значения показателей физико-механических свойств грунтов, необходимые для расчета коэффициента устойчивости, представлены в таблице 1. При расчете было учтено влияние гидродинамической силы и изменение веса грунта при обводнении. Расчетный профиль сделан по данным инженерно-геологического разреза. Начало профиля совпадает со скв. 1, т.к. в районе скважины отмечается множество просадочных трещин в асфальте. Именно здесь сформировалась основная ступень отседания. Горизонт грунтовых вод расположен на глубине 10,2 м (274,8 абс. м).

Проведенный расчет коэффициента устойчивости склона методом Бишопа составил 1,297 для наиболее опасной поверхности (рис. 4, а), склон считается устойчивым при значении коэффициента 1,25 и более. При этом режущая поверхность не совпадает с поверхностью, обозначившейся при смещении 10–11.12.2021 г. При подгоне поверхности смещения к наблюдаемой коэффициент устойчивости увеличивается до 1,400. При выполнении работ по возведению подпорной стенки вдоль участка автодороги, испытывавшего смещение, нормативное значение коэффициента устойчивости было снижено до 1,04, что разрешается [10] в период строительства и ремонта сооружений, относящихся к 3 уровню ответственности. Т.е. при нахождении грунтов, слагающих склон в сухом состоянии активизации бы не произошло.

Однако при обследовании склона, проведенного 12.12.2021 г. после проявления оползневых процессов, зафиксировано выклинивание воды на поверхности откоса и процесс суффозии. Это дает основание говорить, что уровень грунтовых вод на момент формирования оползня был на 3,5–4,0 м выше уровня стояния вод при бурении скважин, т.е. располагался в районе скв. 1 на глубине  $\approx 6,2$  м (278,8 абс. м). Косвенным подтверждением более высокого уровня грунтовых вод является описание керна, в котором указано, что грунты в верхней части насыпи находятся в мерзлом состоянии. С таким уровнем (рис. 4, б), при выполнении расчета коэффициент устойчивости опускается до 1,000. Склон переходит в неустойчивое состояние, что подтверждает его декабрьскую подвижку, которая была вызвана обводнением грунтов.

**Рис. 3.** Схема оползнеактивного участка склона.

Красные линии – трещины отседания в первый период активизации. Синие линии – отседание во второй период активизации. а – трещины в дорожном полотне в районе скв. 1, 09.12.2021 г.; б – начало повторной активизации, 05.04.2022 г.; в, г – разрушение полотна автодороги, 07.04.2022 г.



**Рис. 4.** Наиболее вероятные поверхности скольжения оползня (показаны цветом согласно шкале) и коэффициент устойчивости при уровне стояния грунтовых вод.

*a* – по данным инженерно-геологических работ; *б* – с учетом более высокого стояния уровня грунтовых вод на момент события. Уровень грунтовых вод показан синей пунктирной линией. Номера ИГЭ в поле рисунка соответствуют таблице 1.

Проведенные расчеты показывают, что пока на участке автодороги происходило отведение вод, грунты откоса не насыщались водой, чтобы перейти в подвижное состояние. Прекращение работ на «подрезанном» склоне и закрытие автодороги на зимний период на участке оползневого смещения, привело к его стабилизации.

Но уже в апреле 2022 г. работы на склоне, совпавшие с началом периода активного снеготаяния, привели к повторной активизации оползня. Смещение захватило участок дороги на границе расчетного профиля. При активизации оползня в декабре 2021 г. линия геологического разреза совпадает с правой границей оползня, в апреле – с левой границей смещения.

К настоящему моменту возведение габионной стенки на опасном участке дороги завершено, что стабилизировало насыпь и склон над площадкой открытого кинотеатра. Однако необходимо проведение геотехнического мониторинга. Целостность водоотводящих сооружений на участке должна регулярно проверяться, т.к. нарушение целостности систем ливневой канализации может привести к переувлажнению склона и, как следствие, новой активизации оползневого процесса.

Формирования оползня можно было избежать, сделав предварительную оценку увлажненности грунтов до начала работ. В [15] представлена упрощенная прогностическая модель формирования оползней, вызванных переувлажнением склонов ливневыми осадками. Модель опробована на примере г. Владивосток. Авторами выполнена калибровка модели под ГМС Южно-Сахалинск.

Для калибровки авторами использовался массив данных о суточном количестве осадков на ГМС Южно-Сахалинск за период 1947–2020 гг. (исключая 1985 г. в связи с отсутствием данных). Также были собраны сведения о случаях активизации ЭГП на территориях, прилегающих к г. Южно-Сахалинску в радиусе 30 км, за исключением береговой зоны. Всего была найдена информация о 28 днях, в которые фиксировались как массовые, так и одиночные случаи проявления ЭГП. Дни с ЭГП отмечены красными ромбами на рис. 5. Максимальное суточное количество осадков по ГМС Южно-Сахалинск составляет 131.4 мм (23.08.2001 г.), стандартное отклонение за рассматриваемый период – 6.1 мм. Минимальное суточное количество осадков, выпавшее в день с ЭГП (26.10.1980 г.) – 44.0 мм.



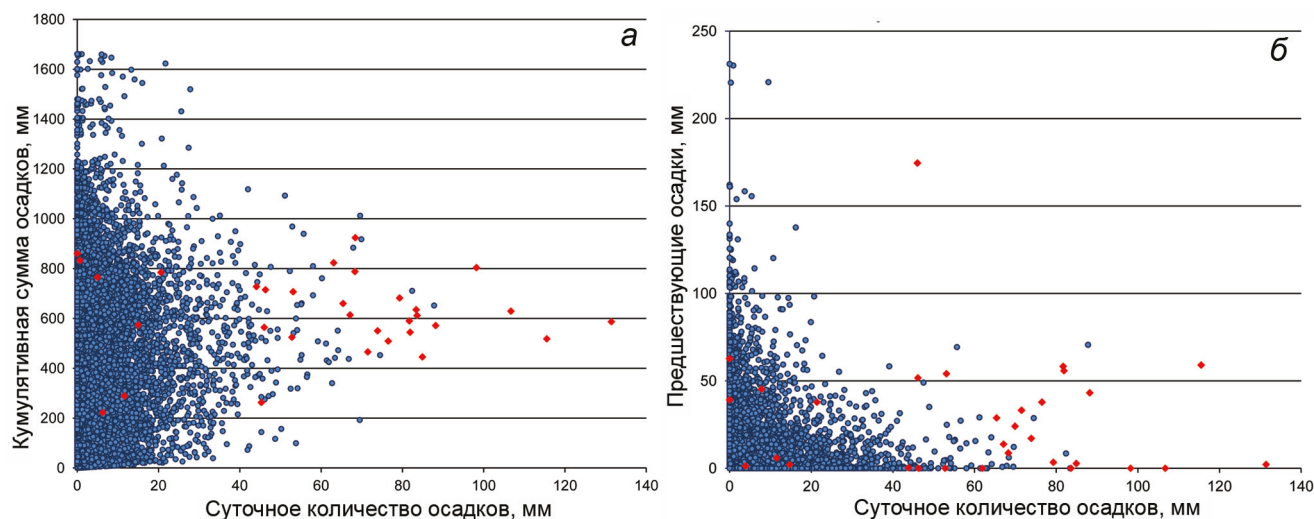


Рис. 5. Распределение суточного количества осадков и кумулятивной суммы осадков (а) и предшествующих осадков (б). Дни формирования ЭГП отмечены красными ромбами.

Прогностическая модель учитывает данные о предшествующих осадках (ПО), кумулятивное количество осадков (КО) и их суточную интенсивность (СИ). Все эти данные находятся в открытом доступе, что позволяет делать превентивный прогноз до проведения любых работ на территориях, обозначенных как оползнеопасные.

На рис. 5, а показаны дни формирования ЭГП увязанные с суточным и кумулятивным количеством осадков. Отмечаем, что при кумулятивном количестве осадков менее 200 и более 950 мм, дней с оползнями не наблюдалось, что показывает на маловероятное возникновение оползней в зимний период. Распределение дней в которые отмечались и не отмечались оползни от предшествующих осадков (рис. 5, б), указывает на триггерный эффект предварительного увлажнения склонов, который прослеживается более чем в половине дней активизации ЭГП. Рис. 5 так же иллюстрирует несбалансированность набора данных, с явным преобладанием дней, когда ЭГП не фиксировались. Поэтому был определен минимальный порог. Для этого из минимального количества осадков, приводящего к ЭГП, было вычтено стандартное отклонение, получено значение 37.9 мм. После сортировки данных получился массив из 143 значений, удовлетворяющий условию  $\geq 37.9$  мм, эти данные были использованы для построения регрессионной прогностической модели, которая получила вид:

$$СИ + 0.01 \cdot КО + 0.26 \cdot ПО \geq 63.52 \quad (1)$$

Коэффициенты модели получены с помощью логистической регрессии. Порог суммы осадков, при котором вероятен переход склона в неустойчивое со-

стояние и формирование ЭГП, определен в 63.52 мм (1). Набор данных не сбалансирован, и со стандартной вероятностью 0.5 при выборе порогового значения модель показала большое количество ложных срабатываний. Поэтому был выполнен расчет с другими вероятностями, из которых наилучший результат был получен для 0.1. Эта вероятность и была использована для получения порогового значения суммы осадков.

Проверка модели сделана через определение истинно положительных и истинно отрицательных результатов, а также определение ложных срабатываний и ложноотрицательных, ложноположительных результатов (подробнее в [15]). Метрики оценки эффективности модели представлены в (табл. 2). За точность модели принята доля истинных значений, найденных моделью применительно ко всем значениям, относящимся к рассматриваемой категории. Точность классификатора – это доля истинных значений категории относительно всех значений, которые модель проассоциировала к этой категории. К сожалению, одновременная максимальная точность обеих метрик не возможна, поэтому в таблице 2 представлена F1 Score, которая представляет собой гармоническое среднее между рассмотренными метриками.

Таблица 2. Эффективность модели.

Категория	Точность модели	Точность классификатора	F1 Score
Дни с ЭГП	0.84	0.44	0.58
Дни без ЭГП	0.77	0.96	0.85

Как описано выше, метеорологические условия в начале зимнего сезона существенно отличались от их среднемноголетних величин. В результате этого появились условия для формирования оползня в декабре, чего ранее не отмечалось. Для первого периода активизации рассматриваемого оползня получено значение суммы осадков 63.65 мм (в расчет включены указанные выше данные снегомерных работ на участке и количество жидких осадков по ГМС), для второго – 65.74 мм (на основании данных ГМС), оба значения выше порога. В обоих случаях формирование оползня классифицировано моделью как положительное.

Представленная модель имеет высокую сбалансированную точность – 70 %, что делает возможным ее использование для площадной оценки территории на возможность формирования ЭГП. Однако модель не учитывает материальные параметры склона, поэтому не предназначена для локализованных расчетов. Сбалансированную точность можно улучшить дополнением архива данных о днях с проявлением ЭГП, ведь за период с 1947 по 1979 гг. найдены сведения только о 10 днях. Все остальные дни с ЭГП отнесены к периоду после 1980 г. когда фиксация данных стала более организованной, информация о проявлениях ЭГП стала появляться в прессе.

### ВЫВОДЫ

Оползни – являются самым распространенным процессом, с которым сталкиваются при освоении горных территорий. Горнолыжный курорт «Горный воздух» находится в зоне их интенсивного развития. Этому способствует сведение древесной растительности и удаление почвенно-растительного слоя при строительстве новых горнолыжных трасс, канатных и подъездных дорог. Сведение растительности, а также строительство систем водораспределения на склонах приводит к изменению поверхностного и подземного стока, а следовательно к новому режиму увлажнения грунтов.

Рассматриваемый оползень сформировался во время проведения строительных работ на автодороге, проходящей вдоль западного склона г. Большой. Метеорологические условия в момент активизации оползня отличались от среднемноголетних величин. В целом этот период характеризовался более высокими температурами воздуха и осадками, выпадавшими преимущественно в виде интенсивных дождей, активным таянием снежного покрова. В апреле 2022 г. ход температуры воздуха привел к интенсивной водоотдаче из снежного покрова, что в сочетании с сезонным подъемом уровня грунтовых

вод привело к дополнительному увлажнению грунтов на склоне.

Выполненный расчет устойчивости с учетом более высокого уровня стояния грунтовых вод показал, что склон находился в состоянии неустойчивого равновесия. Проведение строительных работ на склоне в период его значительного увлажнения привело к уменьшению запаса устойчивости, а нарушение работы дренажной системы ливневой канализации способствовало проникновению в грунт дополнительного объема воды.

Насыщение грунтов большим количеством воды – одна из основных причин формирования оползней. Для территории Сахалина характерны циклоны с длительным и интенсивным выпадением жидких осадков. Поэтому калибровка модели формирования оползней от количества выпавших осадков для Сахалина является актуальной задачей. Представленная модель дала положительный прогноз в оба периода активизации оползня. Расчетный порог суммы осадков, при котором возможно ожидать активизацию ЭГП на юге Сахалина, составляет 63.52 мм, что подтверждается полевыми наблюдениями, выполняемыми сотрудниками ДВГИ ДВО РАН на территории Сахалинской области. Полученная сбалансированная точность модели – 70 %, что говорит о перспективе ее использования для превентивной оценки оползнеопасных склонов.

Представленная модель позволяет дать предварительный прогноз активизации ЭГП, который не требует дополнительных изысканий, но при этом позволяет определить периоды в течение года, когда вскрытие склонов и откосов может привести к активизации оползней, как, например, в рассмотренном случае. Методика построения модели проста, возможна её быстрая калибровка под любую ГМС, имеющую продолжительный ряд наблюдений за осадками. Однако необходим детальный сбор информации о случаях активизации ЭГП на изучаемой территории.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы приносят благодарность ОАУ СТК «Горный воздух» за представление материалов изысканий, проводившихся на рассматриваемой территории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Н.А., Генсиоровский 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. М.: Наука, 2013. № 6. С. 516–529.
2. Концепция развития – Горный воздух. 2022. [Электрон-



- ный ресурс]. URL: <https://ski-gv.ru/about-us/kontseptsiya-razvitiya-kompleksa/> (дата обращения: 26.04.2023).
3. Кресгин Б.М., Мальнева И.В., Кононова Н.К. Особенности развития опасных природных процессов на территории большого Сочи в соответствии с современными изменениями // Устойчивое развитие горных территорий. Владикавказ: Северо-кавказский горно-металлургический институт. 2016. Т. 8, № С. 73–80.
  4. Метеорологическая база данных Aisori. Специализированные массивы для климатических исследований. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml> (дата обращения: 11.04.2023).
  5. Научно-прикладной справочник по климату СССР (Сахалинская область). Л.: Гидрометеиздат, 1990. 350 с.
  6. Новостной портал АСТВ. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://astv.ru/news/society/2020-06-13-takaya-inzhenernaya-zashita-gornyj-vozduh-ne-zashitit> (дата обращения: 17.05.2023).
  7. Новостной портал АСТВ. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://astv.ru/news/criminal/2022-04-26-podvizhka-grunta-za-kristallom-v-yuzhno-sahalinske-prodolzhaetsya-eksperty-prosyat-prinyat-meru> (дата обращения: 17.05.2023).
  8. Сахаров В.А., Ильин В.В. Динамика экзогенных процессов на участках строительства объектов спортивно-туристического комплекса «Горный воздух» // Изв. Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. Томск: ГОУ ВПО ТПУ, 2019. Т. 330, № 9. С. 32–41.
  9. Сократов С.А., Селиверстов Ю.Г., Шныпарков А.Л., Колтерманн К.П. Антропогенное влияние на лавинную и селевую активность // Лед и снег. М.: Наука, 2013. Т. 53, № 2. С. 121–128.
  10. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095540> (дата обращения: 11.05.2023).
  11. Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Количественная оценка антропогенного воздействия на активизацию селевых процессов в малых водосборах хр. Аибга (район пос. Красная Поляна) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды Междунар. конф., Душанбе-Хорог, 20–26 сент. 2021 г. / Севкавгипроводхоз, межрегион. общ-во с орг. «Селевая ассоциация». Душанбе. С. 529–540.
  12. De Jong C., Carletti G., Previtali F. Assessing impacts of climate change, ski slope, snow and hydraulic engineering on slope stability in ski resorts (French and Italian Alps) / Ch. In: Lollino G, Manconi A, Guzzetti F, Culshaw M, Bobrowsky P, Luino F (eds.) // Engineering Geology for Society and Territory. Climate Change and Engineering Geology, Springer, Torino. 2014. V. 1. P. 51–55.
  13. Ma L., Zhao J., Zhang J., Xiao S. Slope Stability Analysis Based on Leader Dolphins Herd Algorithm and Simplified Bishop Method // IEEE Access. 2021. 9. P. 28251–28259. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3058117
  14. Matsiy S., Matsiy V. Landslide protection of the ski resort «Mountain Air» on the Sakhalin Island. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926504013> (дата обращения: 10.04.2023).
  15. Stepnova Y.A., Stepnov A.A., Kononov A.V., Gensiorovskiy Yu.V., Lobkina V.A., Muzychenko L.E., Muzychenko A.A., Orekhov A.A. Predictive model of rainfall-induced landslides in high-density urban areas of the south Primorsky Region (Russia) // Pure and Applied Geophysics. 2022. 179. P. 4013–4024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02822-y>
  16. Zhang T., Cai Q., Han L., Shu J., Zhou W. 3D stability analysis method of concave slope based on the Bishop method // International Journal of Mining Science and Technology. 2017. 27. P. 365–370. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.01.020

*Рекомендована к печати А.В. Коноваловым  
после доработки 13.12.2023 г.  
принята к печати 11.01.2024 г.*

*V.A. Lobkina, Yu.V. Gensiorovsky*

### Landslide activation during the development of mountainous areas

The development of mountainous areas for recreation increases the level of risk of activation of dangerous exogenous processes, primarily landslides and mudflows. Water accumulation in the ground in the regions prone to landslides and mudflows is one of the important factors determining the intensity of manifestation of these processes and significantly influencing their characteristics. The paper considers the case of landslide activation at the Gornyi Vozduh ski resort in December 2021. A predictive model is presented for rainfall-induced landslides on saturated soil slopes, whose parameters were adjusted to the conditions of southern Sakhalin. Data on landslides and mudflows within a 30 km radius from the Yuzhno-Sakhalinsk meteorological station were collected to calibrate the model. The predictive model uses data on daily precipitation, pre-event precipitation, and cumulative precipitation. All these data are publicly available allowing model calibration for the conditions of any nearest meteorological station. The daily precipitation threshold for likely landslide and mudflow initiation in the territory under consideration was determined to be 51.4 mm.

**Key words:** ski resorts, landslides, technogenic impact, Sakhalin.