

УДК 624.131

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНО-ОБВАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ НА ПЕРЕГОНЕ МУГУЛЕ-МУКУНГА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Сахаровский Александр Владимирович¹,
sakharovskiy_sgt@bk.ru

Строкова Людмила Александровна²,
sla@tpu.ru

¹ ООО «НПП Инженерная защита»,
Россия, 630091 г. Новосибирск, ул. Советская, 52, оф. 310.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность изучения гравитационных процессов заключается в том, что они приводят к чрезвычайным ситуациям с угрозой разрушения сооружений, использования земель, безопасности людей. Особые трудности при изучении скально-обвальных склонов вызывает вопрос о достоверном количественном прогнозе их устойчивости.

Целью данного исследования является оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий опасных склонов и расчет их устойчивости.

Объектом исследования является геологическая среда района трассы железной дороги. Рассмотрены основные факторы, влияющие на развитие гравитационных процессов: геоморфологические и тектонические условия; литологический состав; физико-механические свойства пород, мерзлотные, гидрогеологические и гидрогеологические условия района.

Методы: краткий обзор соответствующей литературы; анализ данных инженерно-геологических изысканий; расчеты устойчивости склонов.

Результаты. Дана характеристика основных факторов оползневой процессу данной территории, приведены результаты расчета устойчивости склонов по опасным сечениям различными методами. Согласно проведенным расчетам устойчивости, рассматриваемые скальные откосы в статическом состоянии и при проектной сейсмической ситуации являются устойчивыми по всем сечениям. Согласно результатам обследования с проведенными замерами трещиноватости на эталонных площадках, предполагаемая мощность потенциального захвата блоков породы при возможном возникновении обвалов составляет 2,0 м. Она определена в полевых условиях по результатам измерения степени трещиноватости массива.

Выводы. Основными причинами деформаций являются: крутизна и экспозиция склонов; слабобитуминозные юрские песчаники, слагающие весь склон, и характер их трещиноватости; подрезка крутых склонов в нижней части дорогой. Предложены мероприятия по защите железнодорожных путей.

Ключевые слова:

инженерно-геологические условия, региональные факторы, грунт, оползень, расчет устойчивости склона, расчетная модель.

Введение

Выявление участков, угрожающих обвалами и вывалами, оценка степени их угрозы для дорог занимают одно из центральных мест при их проектировании, строительстве и эксплуатации. Оценка устойчивости склонов является сложной задачей из-за трудностей установления формы и положения потенциальной поверхности скольжения, распределения нормальных и касательных сил в грунтовой массе, выбора адекватной математической модели, интерпретации геологического строения и распределения свойств грунтов в склоновом массиве. Изучением гравитационных склоновых процессов на протяжении длительного времени занимались многие знаменитые инженеры-геологи: А.П. Павлов (1903, 1935), А.Н. Семихатов (1914), Н.Ф. Погребов (1915), М.И. Декабрун и П.П. Быков (1926), Л.Н. Бернацкий (1935) [1], Г.С. Золотарев (1949–1959) [2], Е.П. Емельянова (1972) [3]. Изучению основных закономерностей формирования оползней, их пространственного распределения в связи с гидрометеорологическими условиями посвящены работы [4–10], моделированию их активности – [10–15], роли техногенных факторов в развитии и активизации оползней,

контролю их состояния и разработки защитных мероприятий – [11–29]. Для расчета устойчивости откосов к настоящему времени разработано более 100 способов, приемов и схем [30].

Целью данного исследования является анализ инженерно-геологических и гидрогеологических условий скально-обвального участка железной дороги в Верхнебуреинском районе Хабаровского края и прогноз развития смещения грунтов.

Методы исследования

Исследование включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях, проведенных летом 2021 г. [31]; оценку напряженно-деформированного состояния грунтового массива, выяснение механизма, факторов и закономерностей развития скально-обвальных участков, проведенные весной 2022 г. в отделении геологии ТПУ.

В ходе инженерно-геологических изысканий выполнены следующие виды работ:

1. Инженерно-геологическая съемка с оценкой степени опасности возникновения деформаций отко-

сов, оценка трещиноватости массива, определение местоположения расчетных сечений, проведение опытов по сбрасыванию камней для установки траектории, скорости их падения и величины «отскока» на двух скально-обвальных участках.

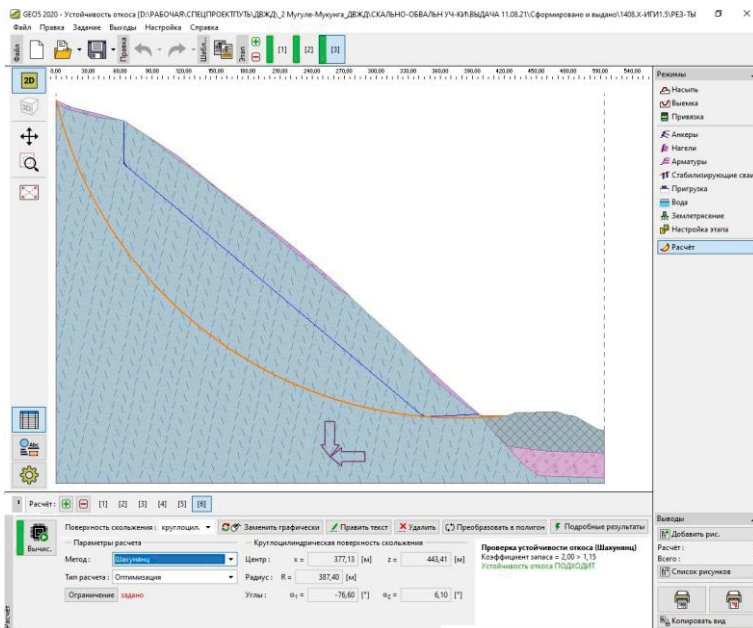
2. Буровые работы для изучения условий залегания скальных грунтов и подземных вод, отбора проб

для определения состава, состояния и физико-механических характеристик грунтов. Бурение скважин глубиной до 6 м проводилось в труднодоступных местах диаметром до 160 мм самоходными буровыми установками, а также переносными буровыми установками типа УКБ 12/25, «ХИЛТИ DD 200» (рис. 1, а).

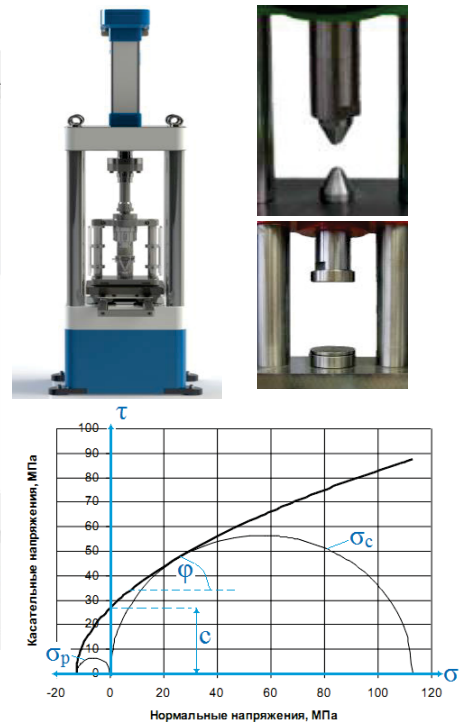


а/а

б/б



в/с



г/д

Рис. 1. Методы исследования: а) буровые работы переносной установкой алмазного бурения; б) сейсморазведочные работы; в) расчет устойчивости откоса в программе GEO5; г) лабораторные работы по определению физико-механических свойств песчаников и диаграмма О.Х. Мора с линейной аппроксимацией паспорта прочности

Fig. 1. Methods of research: а) drilling operations with a portable diamond drilling rig; б) seismic exploration; в) calculation of slope stability in the GEO5 program; д) laboratory work to determine the physical and mechanical properties of sandstones and the O.C. Mohr diagram with a linear approximation of the strength data

3. Опробование и лабораторные исследования образцов грунтов и воды. Был выполнен 31 комплекс определений физических свойств и механической прочности скальных пород и 28 прочностных испытаний скального грунта на одноосное сжатие σ_c и растяжение σ_r горной породы с построением диаграммы Мора-Кулона (рис. 1, *з*). На диаграмме показаны круги одноосного сжатия и растяжения, а также касательная к обоим кругам, по последней определялись величина удельного сцепления породы (*с*) и угол внутреннего трения (*φ*). Испытания горных пород проводились в соответствии нормативными документами [32, 33].
4. Сейсмические исследования. Использовалась сейсморазведочная коса с 24-ми выводами на сейсмоприемники (рис. 1, *б*). Шаг пунктов приема составил 2 м. Возбуждение упругих волн производилось ударами кувалды по титановой плашке. Шаг пунктов возбуждения составил 2 м. Каждое физическое наблюдение выполнялось с накоплением 8–12 воздействий в зависимости от качества сигнала. Длина записи составила 1 с, шаг дискретизации – 0,125 мс. Для регистрации упругих волн применялись одиночные сейсмоприемники электродинамического типа марки GS-One (4,5 Гц), позволяющие принимать упругие волны в диапазоне 1–250 Гц. Наблюдения проводились путем поочередной регистрации: Р-волн при вертикально направленных ударах и приеме на вертикальных сейсмоприемниках; S-волн при горизонтально направленных перпендикулярно линии профиля встречных ударах и приеме на геофоны горизонтального исполнения. Определение прочностных характеристик по данным сейсмических исследований проводилось в соответствии с методическими указаниями [34].
5. Расчёты устойчивости склонов по 6 сечениям. Расчёты выполнялись для двух различных расчётных схем дестабилизации откосов: потенциально неустойчивых и подверженных разрушению скальных откосов. Расчеты устойчивости скальных откосов выполнялись в программе GEO5 2020 «Устойчивость откоса» (рис. 1, *в*).
6. Выяснение морфометрических особенностей склона, вклада инженерно-геологических условий в степень оползневой опасности. Выполнено в ТПУ с использованием программного комплекса ArcGIS 10.8.2 исходя из рекомендаций [35–40].

Характеристика инженерно-геологических условий объекта

В административном отношении объект исследований располагается в Верхнебуреинском районе Хабаровского края на участке Ургал–Комсомольск-на-Амуре Дальневосточной железной дороги. Географическое положение – центральная часть Хингано-Буреинского нагорья, охватывающая большую часть бассейна р. Буреи. Рассматриваемая территория расположена в таежной зоне. Леса здесь занимают до 85 % поверхности [31].

Геоморфологические особенности. Основным крупным орографическим элементом является водораздельный Буреинский хребет, разделяющий верхнюю и нижнюю части бассейна Амура, представляющий собой горную систему, состоящую из отдельных хребтов и горных групп. Водораздельная часть хребта имеет общее северо-восточное направление. Его максимальная высота 2071 м. Склоны спускаются в долины под углом от 25° до 45°. Сложен хребет из сланцев, песчаников, гнейсов, прорванных гранитами. Вершины хребта куполообразные с гольцовыми террасами. Основной особенностью рельефа является сочетание высоких горных хребтов и сопок с речными долинами, занятыми аккумулятивными террасами и развитыми поймами, по которым текут ручьи и реки Буреинского бассейна, такие как Ургал, Чегдомын, Солони и др. Морфометрические характеристики территории представлены на рис. 2.

В *тектоническом* плане рассматриваемая территория относится к прогибу, занимающему окраинное положение на Буреинском массиве. Сводовое поднятие Буреинского массива – крупная глыба поздних байкалитид, испытавшая в позднем палеозое и мезозое явления тектономагматической активизации. В позднем палеозое явление активизации выразилось во внедрении по крупным разломам огромных масс гранитоидов. С позднемезозойскими движениями связаны поднятия, активный вулканизм и формирование вдоль глубинных разломов наложенных прогибов. Буреинский прогиб вытянут в меридиональном направлении, расположен между Туранским блоком и Чегдомыньским выступом. Углы падения слоев на восточном борту прогиба достигают 40°, в центральной и западной частях колеблются в пределах 5...15°.

Геологическое строение верхней части разреза. Четвертичные отложения распространены практически повсеместно. На изучаемой территории они представлены делювиально-солифлюкционными, десерпционно-делювиальными, аллювиальными отложениями поймы, техногенными грунтами.

Склоновые делювиальные образования (dQ_{III-N}) почти сплошным чехлом мощностью до 10 м покрывают склоны гор. Это преимущественно глыбовые грунты и щебенистые грунты с супесчаным заполнителем, реже дресвяные грунты с суглинистым заполнителем и суглинки дресвяные.

Делювиально-солифлюкционные отложения (d,sQ_{III-N}) распространены преимущественно в северо-западной части изучаемого участка в наиболее низкогорной части рельефа, где занимают выположенные части склонов речных долин. Сложены суглинками, супесями с примесью дресвы и щебня, сформировавшиеся на участках развития сезонной и многолетней мерзлоты под воздействием криогенных факторов и сил тяжести в условиях переувлажненных грунтов. Сортировка обломочного материала обычно отсутствует или проявлена очень плохо. Поверхность отложений мелкобугристая с натечными террасами высотой до 1 м. Мощность отложений не превышает 2 м.

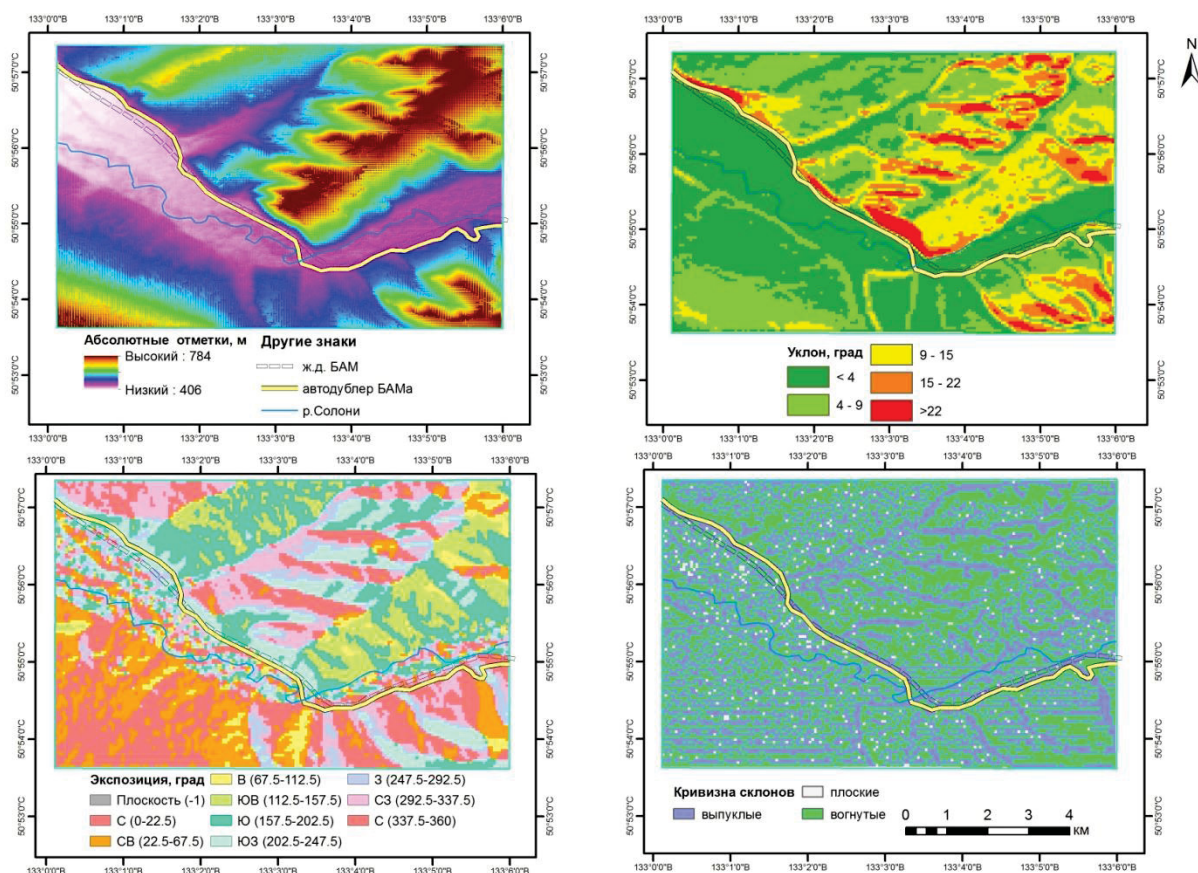


Рис. 2. Морфометрические характеристики территории

Fig. 2. Morphometric characteristics of the territory

Десертционно-делювиальные отложения (d, drQ_{III-H}) широко распространены на выположенных склонах. Они представлены суглинками, супесями, дресвой и щебнем с редкими глыбами, сформировавшимися в результате денудации и перемещения обломочного материала по склонам под воздействием температурных, гидрогенных и криогенных факторов, а также гравитации. Мощность отложений составляет 1,5...2,0 м, но в основании склонов достигает 3...5 м. Основание разреза представлено гранитами Тырмобуреинского габброгранодиорит-гранитового комплекса ($\gamma C_{2-3}t_1$).

Аллювиальные отложения (aQ_H) слагают низкую и высокую поймы и русло рек. Аллювий характеризуется весьма грубым составом материала, невыдержанностью строения (небольшой протяженностью фаций, их быстрой сменой) и небольшой мощностью (3...10 м). Русловые фации представлены галечниками с супесчаным заполнителем, с примесью валунов, реже глыб и щебня.

Техногенные грунты (tQ_H) представлены балластом щебеночным с песчаным и супесчаным заполнителем до 20 % и насыпным галечниковым грунтом с песчаным заполнителем до 30 %.

В гидрогеологическом отношении исследуемая территория относится к Амурской гидрогеологической складчатой области первого порядка Буреинской гидрогеологической области второго порядка. Для рассматриваемой территории характерно глубокое се-

зонное промерзание грунтов, что оказывает существенное влияние на формирование и циркуляцию подземных вод. В зависимости от соотношения с многолетнемерзлыми грунтами выделяются надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды.

Надмерзлотные воды, формирующиеся над толщей мерзлых пород, распространены повсеместно и связаны с водопроницаемыми пористыми (трещиноватыми) породами различного возраста и состава. Источником питания для них служат атмосферные осадки, поверхностные водотоки, реже подмерзлотные воды, проникающие через сквозные талики.

Характерной особенностью гидрогеологических условий района работ является развитие верховодки (вод приповерхностного стока), приуроченной к делювиальным супесям с щебнем и залегающей на глубинах 0,3...5 м. Образование верховодки связано с неглубоким просачиванием атмосферных осадков и наличием водоупора, в качестве водоупора могут выступать как водонепроницаемые тонкодисперсные литологические разности, так и многолетнемерзлые породы. Она проявляется лишь в летний период.

Выделяется водоносный горизонт четвертичных аллювиальных отложений, приуроченный к образованиям пойменных и надпойменных террас в долинах рек. Воды безнапорные и нередко связаны с подстилающими водоносными горизонтами, с которыми имеют единый уровень подземных вод. Водоупором служит сезонномерзлый слой.

Воды делювиальных и аллювиальных отложений пластово-поровые.

Межмерзлотные воды, находящиеся внутри криолитозоны, обычно формируются в обводненных линзах, трещинах и пустотах в толще промороженных пород и имеют локальный характер распространения. Подмерзлотные воды, залегающие под нижней поверхностью криолитозоны, широко распространены и в отличие от первых двух постоянно находятся в жидкой фазе и имеют напорный характер. Питание их происходит за счет атмосферных осадков и подземных вод, перетекающих из соседних структур.

Водоносный комплекс юрских и нижнемеловых отложений в пределах Буреинского артезианского бассейна наиболее водообильный. Воды этого комплекса напорные. В поймах рек в пределах сквозных таликовых зон воды безнапорные и имеют общий уровень с подземными водами аллювиальных отложений. Воды юрских и меловых осадочных пород пластово-трещинные. Подземные воды в пределах

изучаемых площадок не встречены. Грунтовый массив представляет собой активную зону аэрации и плоскостного смыва. Скорость фильтрации зоны аэрации проницаемой, хорошо дренируемой толщи составляет 20 м/сут.

Геокриологические условия. Район исследования приравняется к районам Крайнего Севера и относится к району островного распространения многолетнемерзлых грунтов.

Глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород варьирует от 0,5 до 3,5 м. Геотермическими наблюдениями установлено, что температура пород многолетнемерзлой толщи колеблется от минус 0,2 до минус 1,6 °С. Мощность многолетнемерзлых грунтов в среднем около 30 м, но в отдельных случаях достигает 60, и даже 100 и более метров.

По *литологическому составу, генезису, физико-механическим свойствам* выделено 12 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) и один слой. Их характеристика приведена в табл. 1.

Таблица 1. Сводная характеристика инженерно-геологических элементов

Table 1. Summary characteristics of engineering-geological units

Стратиграфо-генетический комплекс Stratigraphic-genetic complex	Средняя мощность ИГЭ, м Average thickness of the unit, m	Номер ИГЭ Unit number	Описание грунтов Soil description	Показатели характеристик грунтов для выделения инженерно-геологических элементов Indicators of soil characteristics for allocation of engineering and geological units	Расчетные значения характеристик грунтов, рекомендуемые для проектирования оснований и фундаментов Calculated values of soil characteristics recommended for the design of foundations
hQH	0,2	0	Почвенно-растительный слой с корнями трав, деревьев Soil-vegetable layer with roots of grasses, trees	–	–
tQH	0,3	t1ж	Дресвяный грунт с суглинистым твердым заполнителем, неоднородный, малой степени водонасыщения, непучинистый Silty fine gravel, well graded, low degree of water saturation, not-heaving	$\rho = 2,05 \text{ т/м}^3$ $W=0,11, e=0,461; Sr=0,64,$ у заполнителя $I_p=0,10, I_f = -0,59$	$\rho_i=2,05 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=2,05 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=19,89 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=18,7 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=25 \text{ кПа}, c_{II}=26 \text{ кПа},$ $\phi_i=25^\circ, \phi_{II}=27^\circ, E=34,8 \text{ МПа}$
bQ	1,5	tb36	Торф искусственно погребенный, средне-разложившийся, осушенный Peat artificially buried, medium-decomposed, drained	$\rho=1,12 \text{ т/м}^3$ $W=140 \%,$ $e=2,61, Sr=0,91$	$\rho_i=1,10 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=1,11 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=11,1 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=11,1 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=0 \text{ кПа}, c_{II}=0 \text{ кПа},$ $\phi_i=13,5^\circ, \phi_{II}=13,8^\circ, E=1,5 \text{ МПа}$
aQH	5	a19б	Галечниковый грунт неоднородный с текучим супесчаным заполнителем, со слабо выветрелыми обломками средней прочности, незасоленный, непучинистый Soft sandy silty cobbles with crushed stone, unsalted, not-heaving	$\rho=2,18 \text{ т/м}^3,$ $W=0,244, e=0,55, Sr=1,$ у заполнителя $I_p=0,055;$ $\Pi=1,3$	$\rho_i=2,17 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=2,18 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=25,77 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=19,3 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=0,001 \text{ кПа}, c_{II}=0,001 \text{ кПа},$ $\phi_i=31^\circ, \phi_{II}=32^\circ,$
dcQIII-H	0,85	dc2a	Глыбовой грунт с супесчаным твердым заполнителем, с щебнем до 20 % Sandy clayey boulders with crushed stone up to 20 %	$\rho=1,95 \text{ т/м}^3$ $W=0,12, e=0,557, Sr=0,58,$ у заполнителя $I_p=0,24,$ $\Pi=0,18$	$\rho_i=1,88 \text{ т/м}^3, \rho_{II}=1,90 \text{ т/м}^3,$ $\gamma_i=22,05 \text{ кН/м}^3, \gamma_{II}=18,6 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=3 \text{ кПа}, \phi_i=28^\circ$
J3	3,4	21в	Песчаник слабоветрелый, сильнотрещиноватый, средней прочности Sandstone weakly weathered, strongly fractured, of medium strength	$\rho=2,56 \text{ т/м}^3$	$\gamma_i=25,3 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=90 \text{ кПа}, \phi_i=38^\circ$
	3,1	21г	Песчаник слабоветрелый, сильнотрещиноватый прочный Sandstone weakly weathered, strongly fractured, strong	$\rho = 2,64 \text{ т/м}^3$	$\gamma_i=25,7 \text{ кН/м}^3,$ $c_i=163 \text{ кПа},$ $\phi_i=39^\circ$

Геологические процессы и явления. На участке отмечены следующие неблагоприятные природные

процессы: землетрясения; морозное пучение грунтов; эрозия плоскостная; склоновые процессы.

Землетрясения. С учетом комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2015) вероятность возможного превышения интенсивности землетрясений в течение 50 лет составляет: 7 баллов – по карте А (10 %), 8 баллов – по карте В (5%) и 8 баллов – по карте С (1 %) (г. Чегдомын, Хабаровский край, СП 14.13330.2018).

Морозное пучение. Территория участка относится к району глубокого сезонного промерзания грунтов. При сезонном промерзании и оттаивании грунтов на участке проявляются мерзлотные деформации в основании сооружений.

В зону сезонного промерзания в пределах склоновой части попадают грунты ИГЭ-дс2а. Глыбовый грунт с супесчаным твёрдым заполнителем до 5–10 %, грунт слабопучинистый ($D=1,1$).

Эрозия плоскостная развита на подходах к коренным склонам. За счет средних уклонов свыше 45° (1:1)

поверхностный сток хорошо обеспечен, преобладают гравитационные процессы.

На крутых склоновых участках в периоды обильных ливней и снеготаяния в большей мере наблюдается разгрузка по мелким и глубоким тальвегам, русла и борты которых сложены крупнообломочным материалом.

В процессе деятельности эрозионных процессов по откосам проходит приповерхностный плоскостной смыв с выносом из крупнообломочных грунтов глинистой и пылеватой фракции.

Обвалы и осыпи. По результатам инженерных изысканий выделено два опасных участка (рис. 3), представляющих собой скальные выемки с характерными признаками трещиноватости массива и, как следствие, возможного отчленения и перемещения отдельных глыб или группы обломочного материала с потенциальным перемещением его к подножью выемки на действующую линию однопутной железной дороги.

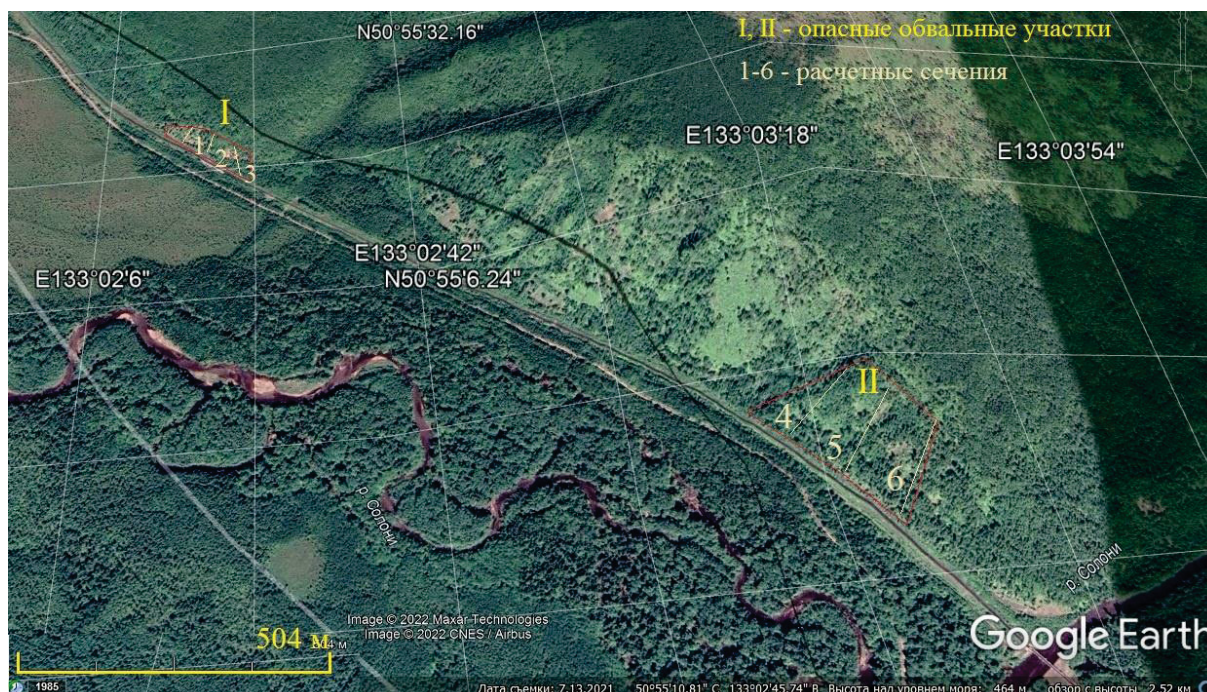


Рис. 3. Схема расположения объекта

Fig. 3. Object location

Участок I длиной 150 м. Экспозиция склона юго-западная. Поверхностный сток хорошо обеспечен. Отмечаются отдельные выходы скальных пород, представленные песчаником слабыветрелым, средней прочности и прочным, сильнотрещиноватым (рис. 4, а). В толще песчаников отмечаются прослойки аргиллитов пониженной прочности, раздробленных, мощностью до 0,1...0,2 м.

На поверхности коренного массива отмечаются отдельные шлейфы глыбовых грунтов, а также конусы выноса обломочного материала на выположенных участках склона (рис. 4, в). Делювиально-колювиальный шлейф сложен глыбовым грунтом с супесчаным твёрдым заполнителем до 10...15 %. Преоб-

ладающая фракция (более 50 %) глыбового грунта составляет 200...250 мм. Площадь локальных шлейфов не превышает 10 м^2 . Скальный массив интенсивно трещиноватый, среднее расстояние между трещинами около 200 мм. Выделены три системы трещиноватости, взаимно пересекающихся друг с другом, которые образуют плитчатые и остроугольные формы блоков (рис. 4, д). Почвенно-растительный слой с корнями растений развит фрагментарно, а также местами имеет мощность менее 3...4 см.

Ниже дана оценка состояния скальных склонов по приложению Г СП 116.13330.2012 в зависимости от их морфометрических и инженерно-геологических характеристик.

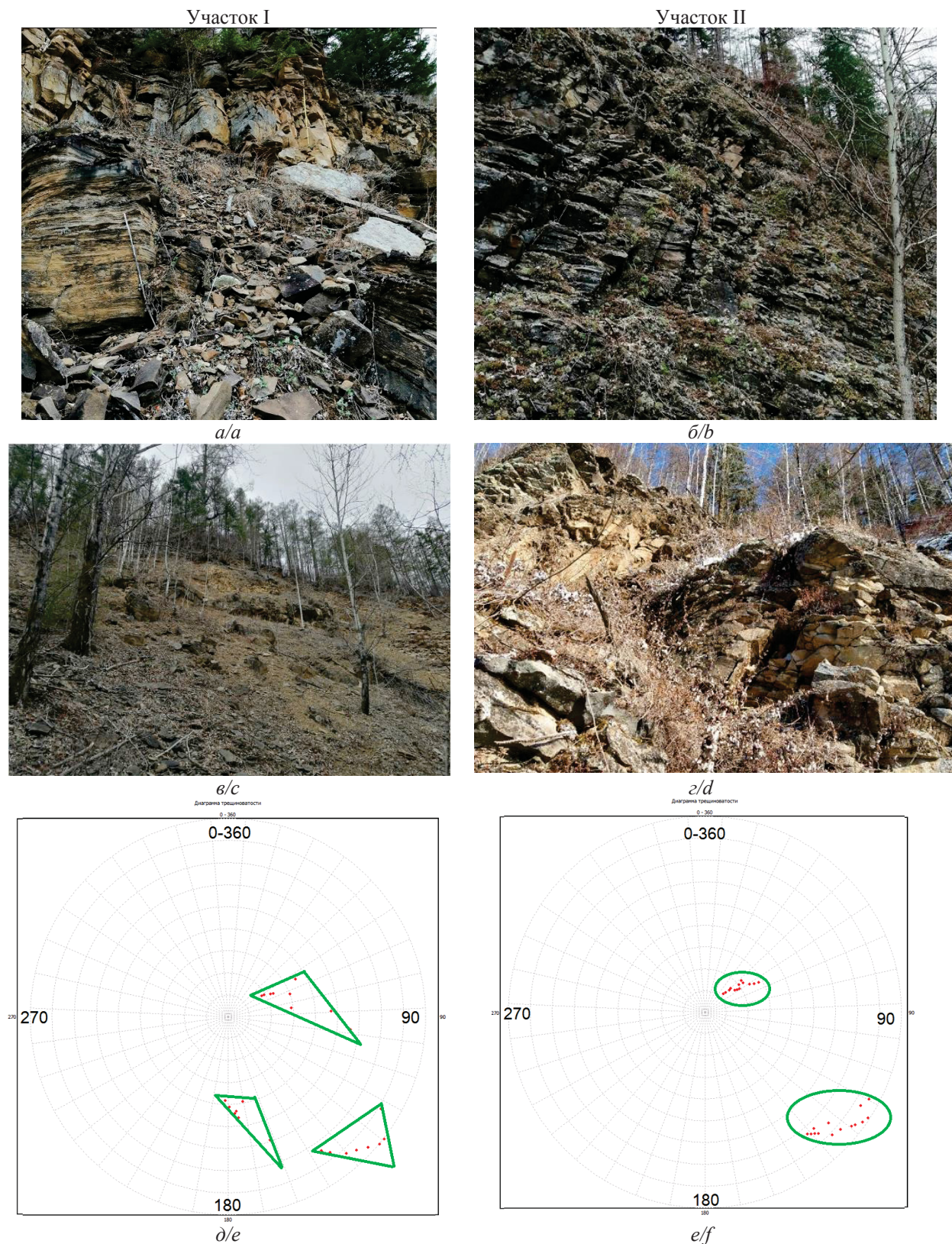


Рис. 4. Характеристики участков: состояние породного массива: а) I участка; б) II участка; в) вид коренного склона с делювиально-коллювиальными шлейфами обломочного материала; г) подготовка вывалов пород; диаграмма трещиноватости: д) I участка; е) II участка

Fig. 4. Characteristics of the plots: the state of the rock mass: a) site I; b) site II; c) type of the root slope with deluvial-colluvial plumes of detrital material; d) preparation of rock falls; fracture diagram: e) site I; e) site II

Морфологическая характеристика участка: высота откоса >12 м, 6 баллов; крутизна 30–45°, 2 балла; форма поверхности неровная и с выступами, 3 балла; расстояние от подошвы откоса до защищаемого объекта >4 м, 0 баллов; расстояние от поверхности уровня подошвы откоса до основания защищаемого объекта >1,5 м, 0 баллов.

Инженерно-геологическая характеристика: среднее количество трещин на 1 м 2–10, 1 балл; направление угла падения трещин по отношению к защищаемому объекту <20°, 0 баллов; ширина раскрытия трещин до 0,5 см, 1 балл; глубина трещин от 1,0...10 м, 2 балла; обводнёность трещин отсутствует, 0 баллов; заполнитель трещин (мелкозем) – лёгкие признаки, 1 балл; характер поверхности стенок трещин – неровные шероховатые, 0 баллов; прочность грунтов на сжатие – средней прочности, 2 балла; выветриваемость (группа грунтов) – II, согласно лабораторным данным 25 циклов попеременного высушивания и увлажнения, потеря образцов в массе при просеивании через сито диаметром 10 мм – 67 %, 1 балл; выветриваемость грунтов откоса в момент обследования – слабая степень выветрелости, 1 балл; объём обвально-осыпных явлений за год на 1 м длины выемки – нет, 0 баллов; сейсмичность в баллах – 8, 2 балла.

Итоговая оценка степени опасности нарушения устойчивости скальных откосов и склонов: 22 балла. Степень опасности – неопасные. Класс откоса по потенциальной опасности – III.

Участок II длиной 190 м. Участок коренного склона имеет среднюю крутизну около 45...50° (1:1 – 1:0,84) Экспозиция склона юго-западная. Поверхностный сток хорошо обеспечен. Обнажениями скальных пород покрыто до 25–30 % всего изучаемого участка. Выходы скальных пород представлены песчаником слабыветрелым, прочным и в меньшей степени средней прочности, сильнотрещиноватым, в отдельных обнажениях среднетрещиноватым (рис. 4, б). Среднее расстояние между трещинами всех систем около 200 мм. Отмечены локальные очаги подготовки к обвалу глыбового материала (рис. 4, з). Коренной склон имеет отдельные шлейфы и конусы выноса делюви-

ально-коллювиальных отложений, представленных глыбовым грунтом с супесчаным заполнителем до 5...10 % мощностью от 0,8 до 1,6 м. Формирование покровного чехла, представленного глыбовым грунтом, обусловлено прежде всего локальными зонами выветривающихся участков. Выделены две системы трещиноватости, взаимно пересекающихся друг с другом, которые образуют преимущественно параллелепипедные формы блоков (рис. 4, е).

Морфологическая характеристика: высота откоса >12 м, 6 баллов; крутизна 45–60°, 4 балла; форма поверхности неровная и с выступами, 3 балла; расстояние от подошвы откоса до защищаемого объекта >4 м, 0 баллов; расстояние от поверхности уровня подошвы откоса до основания защищаемого объекта >1,5 м, 0 баллов.

Инженерно-геологическая характеристика: среднее количество трещин на 1 м 2–10, 1 балл; направление угла падения трещин по отношению к защищаемому объекту <20°, 0 баллов; ширина раскрытия трещин до 0,5 см, 1 балл; глубина трещин от 1,0–10 м, 2 балла; обводнёность трещин отсутствует, 0 баллов; заполнитель трещин (мелкозем) – лёгкие признаки, 1 балл; характер поверхности стенок трещин – неровные шероховатые, 0 баллов; прочность грунтов на сжатие – средней прочности, 2 балла; выветриваемость (группа грунтов) – II, согласно лабораторным данным 22 цикла попеременного высушивания и увлажнения, потеря образцов в массе при просеивании через сито диаметром 10 мм – 62 %, 1 балл; выветриваемость грунтов откоса в момент обследования – слабая степень выветрелости, 1 балл; объём обвально-осыпных явлений за год на 1 м длины выемки – нет, 0 баллов; сейсмичность в баллах – 8, 2 балла.

Итоговая оценка степени опасности нарушения устойчивости скальных откосов и склонов: 24 балла. Степень опасности – опасные. Класс откоса по потенциальной опасности – II.

На обоих участках обнажений рекомендуется уборка разрушенного массива на глубину (толщ скальной стены) до 2,0 м, а также укрепление скального массива анкерами и габионной сеткой.

Таблица 2. Результаты статистической обработки прочностных характеристик скальных грунтов, полученных в водонасыщенном состоянии

Table 2. Results of statistical processing of the strength characteristics of rocks obtained in a water-saturated state

Краткая характеристика скальных грунтов Description of rocks	Параметр Parameter	Обозначение Designation	Сцепление C_{sat} , МПа Cohesion C_{sat} , MPa	Угол внутреннего трения φ_{sat} , град Internal friction angle, φ_{sat} , degree
ИГЭ-21в Песчаник слабыветрелый, сильнотрещиноватый, средней прочности is Weakly matured, strongly fractured, sandstone of medium strength	Нормативное значение/Average value	Xn	10,25	38
	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	S	1,898	1,246
	Коэффициент вариации Coefficient of variation	v	0,19	0,03
	Количество определений Count of numbers	n	8	8
ИГЭ-21г Песчаник слабыветрелый, сильнотрещиноватый, прочный Weakly matured, strongly cracked, strong sandstone	Нормативное значение/Average value	Xn	17,52	39
	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	S	2,325	1,414
	Коэффициент вариации Coefficient of variation	v	0,13	0,04
	Количество определений Count of numbers	n	6	6

Расчёты устойчивости грунтов

Расчёты устойчивости грунтов проводились в программном комплексе Geo5 «Скальный откос». Расчёты в программе GEO5 v.18 выполнены по заданной поверхности скольжения методами Бишопа, Феллениуса–Петерсона, Спенсера, Моргенштерна–Прайса, Янбу, Шахунянца. Для расчетов выбирались наиболее характерные разрезы по линиям максимального уклона поверхности склонов. Положение расчетных сечений устойчивости склонов приведены на рис. 3.

Для назначения исходных данных было выполнено сопоставление значений лабораторных показателей (табл. 2) и показателей свойств грунтов, полученных при сейсморазведке [30, 31]. Последние оказались выше показателей лабораторных данных, поэтому не использовались в расчетах.

Результаты расчетов устойчивости склонов различными методами по шести расчетным сечениям приведены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные значения коэффициента устойчивости различными методами

Table 3. Calculated values of the stability coefficient by different methods

Номер расчетного сечения Number of the section	Методы расчета устойчивости Methods of stability calculation	Сочетание нагрузок; Проектная ситуация Combination of loads; Project situation		
		Основное; Постоянная Basic; Permanent	Особое; Сейсмика 7 баллов Special; Seismics 7 points	Особое; Сейсмика 8 баллов Special; Seismics 8 points
1-1	Бишопа/Bishop	1,43	1,36	1,30
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Pettersson	1,40	1,33	1,27
	Спенсера/Spencer	1,43	1,36	1,30
	Янбу/Janbu	1,43	1,36	1,30
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	1,43	1,36	1,30
	Шахунянца/Shahunjanc	1,40	1,33	1,27
2-2	Бишопа/Bishop	2,30	2,19	2,09
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Pettersson	2,17	2,06	1,97
	Спенсера/Spencer	2,30	2,19	2,09
	Янбу/Janbu	2,28	2,17	2,07
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	2,33	2,22	2,13
	Шахунянца/Shahunjanc	2,24	2,11	2,00
3-3	Бишопа/Bishop	1,94	1,83	1,73
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Pettersson	–	1,83	1,73
	Спенсера/Spencer	1,94	1,83	1,73
	Янбу/Janbu	1,95	1,83	1,73
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	1,95	1,84	1,74
	Шахунянца/Shahunjanc	1,94	1,83	1,73
4-4	Бишопа/Bishop	5,52	4,47	3,72
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Pettersson	5,53	4,57	3,89
	Спенсера/Spencer	–	–	–
	Янбу/Janbu	–	–	–
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	–	–	–
	Шахунянца/Shahunjanc	5,56	5,31	5,09
5-5	Бишопа/Bishop	2,43	1,91	1,55
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Pettersson	2,43	1,96	1,65
	Спенсера/Spencer	2,43	–	–
	Янбу/Janbu	2,43	–	–
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	2,43	–	–
	Шахунянца/Shahunjanc	2,42	2,30	2,18
6-6	Бишопа/Bishop	5,58	4,58	3,73
	Феллениуса–Петерсона Fellenius–Pettersson	5,87	4,65	3,85
	Спенсера/Spencer	5,88	–	–
	Янбу/Janbu	5,88	–	–
	Моргенштерна–Прайса Morgenstern–Price	5,88	–	–
	Шахунянца/Shahunjanc	5,86	5,55	5,28

Согласно проведенным расчетам устойчивости, рассматриваемые скальные откосы в статическом состоянии и при проектной сейсмической ситуации являются устойчивыми по всем сечениям. Согласно результатам обследования, с проведенными замерами трещиноватости на эталонных площадках, предполагаемая мощность потенциального захвата блоков породы, при возможном возникновении обвалов, составляет 2,0 м (определена в полевых условиях по результатам измерения степени трещиноватости массива).

Для защиты железной дороги предложены следующие варианты проектных решений: устройство покровных сеток; устройство улавливающих сетчатых барьеров; обрушение неустойчивых камней. По мере накопления осыпного материала под сеткой у подошвы скального откоса (полки террасы) необходимо выполнять расчистку осыпи. Очистку скальных склонов от неустойчивых в обвальном отношении обломков горных пород следует производить поэтапно в зависимости от степени опасности, которая выявляется в результате предварительного осмотра склонов. В условиях интенсивного движения поездов на Байка-

ло-Амурской магистрали эти меры сыграют существенную роль в безопасности движения поездов.

Выводы

1. В статье приведена инженерно-геологическая оценка территории, расчеты устойчивости склонов. Выявлены механизм, динамика, факторы и закономерности развития скально-обвальных участков, что учитывалось при разработке защитных мероприятий на этом перегоне железной дороги.
2. Основными причинами деформаций являются: крутизна и экспозиция склонов; слаболитифицированные юрские песчаники с прослойками аргиллитов, слагающие весь склон, и характер их трещиноватости; подрезка крутых склонов в нижней части дорогой.
3. Для участка предложены мероприятия по защите железнодорожных путей.

Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оползни и устойчивость склонов. Библиографический указатель. – М.: ЗАО «Геоинформарк», 2010. – 528 с.
2. Золотарев Г.С. Генетические типы оползней, их развитие и изучение // Матер. сов. по изучению оползней и мер борьбы с ними. – Киев: Изд-во КГУ, 1964. – С. 165–170.
3. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. – М.: Недра, 1972. – 310 с.
4. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Природные и антропогенные факторы, обуславливающие активность склоновых процессов территории проектируемой железной дороги Элегест-Кызыл-Курагино // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 170–181.
5. Леонова А.В., Строкова Л.А., Никитенков А.Н. Оценка оползневых процессов на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2021. – № 1. – С. 94–103.
6. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
7. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осмушкина, А.В. Осмушкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
8. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012051.
9. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia) / L.A. Strokova, E.M. Dutova, A.V. Ermolaeva, I.N. Alimova, A.B. Strelnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012032
10. Strokova L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2009. – V. 46. – № 3. – С. 117–119.
11. Characteristics of rainfall-induced landslides in Miocene formations: a case study of the Shenmu watershed, Central Taiwan / S.-C. Chen, H.-T. Chou, S.-C. Chen, C.-H. Wu, B.-S. Lin // Engineering Geology. – 2014. – V. 169. – P. 133–146. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.11.020
12. Fan L., Lehmann P., Or D. Effects of soil spatial variability at the hillslope and catchment scales on characteristics of rainfall-induced landslides // Water Resources Research. – 2016. – V. 52 (3) – P. 1781–1799. URL: [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1944-7973](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1944-7973) (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1002/2015WR017758.
13. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / W.-Z. Guo, L. Luo, W.-L. Wang, Z.-Y. Liu, Z.-X. Chen, H.-L. Kang, B. Yang // Geomorphology. – 2019. – V. 337. – P. 69–78. URL: www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/ (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006
14. Minder J.R., Roe G.H., Montgomery D.R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility // Water Resources Research. – 2009. – V. 45 (4). – art. no. W04419. DOI: 10.1029/2008WR007027.
15. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // Special Report – National Research Council, Transportation Research Board. – 1996. – V. 247. – P. 36–75.
16. Dai F.C., Lee C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong // Geomorphology. – 2002. – V. 42 (3–4). – P. 213–228. URL: www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/ (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00087-3
17. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy / F. Guzzetti, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli, P. Reichenbach, M. Rossi // Geomorphology. – 2008. – V. 96 (1–2). – P. 105–122. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.07.015.
18. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards // Science. – 2007. – V. 316 (5828). – P. 1136–1138. DOI: 10.1126/science.1143308.
19. Evaluating factors for controlling sediment connectivity of landslide materials: a flume experiment / H.S. Kharismalatri, Y. Ishikawa, T. Gomi, R.C. Sidle, K. Shiraki // Water (Switzerland). – 2017. – V. 11 (1). – art. no. 17. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/17/pdf> (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.3390/w11010017.
20. Landslides on the Loess Plateau of China: a latest statistics together with a close look / X.Z. Xu, W.Z. Guo, Y.K. Liu, J.Z. Ma, W.L. Wang, H.W. Zhang, H. Gao // Natural Hazards. – 2017. – V. 86 (3). – P. 1393–1403. URL: www.wkap.nl/journalhome/0921-030X (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.1007/s11069-016-2738-6.
21. Strokova L. Landslide susceptibility zoning in surface coal mining areas: a case study Elga field in Russia // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – V. 15. – art. no. 146. URL:

- <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09314-2> (дата обращения 12.05.2022).
22. Experimental studies of soil base deformations under the mode of flexible bottom of steel vertical tanks / R.A. Mangushev, V.V. Konyushkov, R.A. Usmanov, V.M. Kirillov // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference.* – St-Petersburg, 2019. – P. 165–171.
 23. Конюшков В.В., Веселов А.А., Кондратьева Л.Н. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 111–125.
 24. Short-term forecast of landslide processes development using the method of engineering-geological analogy on the territory of Inopolis city (Russia) / N. Zharkova, A. Latypov, I. Nuriev, G. Cherniychuk // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM.* – 2015. – V. 2 (1). – P. 649–656.
 25. Ильин В.В., Сахаров В.А. Расчет устойчивости склонов на участках строительства объектов спортивно-туристического комплекса «Горный воздух» (гора Большевик, г. Южно-Сахалинск) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 208–216.
 26. Кропоткин М.П. Гравитационные склоновые процессы – оценки опасности и проблемы нормирования расчетов // *Инженерные изыскания.* – 2017. – № 10. – С. 24–34. DOI: 10.25296/1997-8650-2017-10-24-34
 27. Кропоткин М.П. Гравитационные склоновые процессы – возможная общая классификация // *Инженерная геология.* – 2017. – № 4. – С. 28–39. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-28-38
 28. Квашук С.В., Малеев Д.Ю., Федоренко Е.В. Оползневая опасность на Шуфанском плато для линейных объектов инфраструктуры (Приморский край) // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН.* – 2021. – № 1. – С. 40–49.
 29. Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа. *Вестник Московского университета. Серия 5. География.* – 2020. – V. 3. – С. 22–33.
 30. Руководство по проектированию противооползневых и противообвальных защитных сооружений. – М.: МИНТРАНССТРОЙ, 1983. – 119 с.
 31. Сахаровский А.В. и др. Технический отчет по результатам дополнительных инженерно-геологических изысканий по скально-обвальным участкам для подготовки проектной документации по двухпутной вставке на перегоне Мугуле-Мукунга с примыканием к разъезду Мугуле Дальневосточной железной дороги. – Новосибирск: Сибгипротранспуть, 2021. – 371 с.
 32. ГОСТ 21153.3-85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 14 с.
 33. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 9 с.
 34. Назаров Г.Н. Методические указания по комплексным сейсмологическим и инженерно-геологическим исследованиям с применением портативных сейсмозвездочных установок. – М.: Издание ВИА, 1969. – 123 с.
 35. The fault-controlled Chengtian landslide triggered by rainfall on 20 May 2021 in Songyang County, Zhejiang Province, China / F. Wang, Y. Chen, X. Peng, G. Zhu, K. Yan, Z. Ye // *Landslides.* – 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01891-x> (дата обращения 12.05.2022).
 36. A GIS-based tool for probabilistic physical modelling and prediction of landslides: GIS-FORM landslide susceptibility analysis in seismic areas / J. Ji, H. Cui, T. Zhang, J. Song, Y. Gao // *Landslides.* – 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01885-9> (дата обращения 12.05.2022).
 37. Landslide detection in the Himalayas using machine learning algorithms and U-Net / S.R. Meena, L.P. Soares, C.H. Grohmann, C. van Westen, K. Bhuyan, R.P. Singh, M. Floris, F. Catani // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 1209–1229. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01861-3> (дата обращения 12.05.2022).
 38. Smoothed Particle Hydrodynamics for modelling landslide – water interaction problems / A. Mahalle, M. Roudane, A. Krimi, S.A. Gouri // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 1249–1263. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01807-1> (дата обращения 12.05.2022).
 39. Slope reliability analysis through Bayesian sequential updating integrating limited data from multiple estimation methods / W. Yao, C. Li, C. Yan, H. Zhan // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 1101–1117. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01812-4> (дата обращения 12.05.2022).
 40. Modelling discontinuity control on the development of Hell’s Mouth landslide / L. He, J. Coggan, D. Stead, M. Francioni, M. Eyre // *Landslides.* – 2022. – V. 19. – P. 277–295. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01813-3> (дата обращения 12.05.2022).

Поступила 20.05.2022 г.

Прошла рецензирование 06.10.2022 г.

Информация об авторах

Сахаровский А.В., директор, ООО «НПП Инженерная защита».

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

DETERMINATION OF THE STABILITY OF ROCK-FALL SITES ON THE MUGULE-MUKUNGA STRETCH OF THE FAR EASTERN RAILWAY

Aleksandr V. Sakharovskiy¹,
sakharovskiy_sgt@bk.ru

Lyudmila A. Stroková²,
sla@tpu.ru

¹ LLC «Scientific and Production Enterprise Engineering Protection»,
office 310, 52, Sovetskaya street, Novosibirsk, 630091, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of studying gravitational processes lies in the fact that they lead to emergencies with the threat of destruction of structures, land use, and human safety. The question of a reliable quantitative forecast of their stability causes particular difficulties in the study of rock-collapse slopes.

This study aims to assess the engineering-geological and hydrogeological conditions of dangerous slopes and calculate their stability.

The object of the study is the geological environment of the railway route area. The main factors influencing the development of gravitational processes, geomorphological and tectonic conditions; lithological composition; physical and mechanical properties of rocks, permafrost, hydrological and hydrogeological conditions of the area are considered.

Methods: brief review of the relevant literature; analysis of engineering and geological survey data; calculations of slope stability.

The results. We considered the characteristics of the main factors of the landslide process of this territory, the results of calculating the stability of slopes along dangerous sections by various methods. We carried out the stability calculations; according to them the considered rock slopes in a static state and in a design seismic situation are stable across all sections. According to the results of the survey with the conducted measurements of fracturing at the reference sites, the estimated capacity of the potential capture of rock blocks, with the possible occurrence of collapses, is 2,0 m. It was determined in the field by measuring the degree of fracturing of the array.

Summary. The main causes of deformations are: the steepness and aspect of the slopes, weakly lithified Jurassic sandstones composing the entire slope, and the nature of their fracturing, cutting of steep slopes in the lower part of the road. We proposed the measures to protect railway tracks.

Key words:

engineering and geological conditions, regional factors, soil, landslide, slope stability assessment, simulation model.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Program of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement (VIU funds).

REFERENCES

- Opolzni i ustoychivost sklonov [Landslides and slope stability]. *Bibliograficheskiy ukazatel* [Bibliographic index]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2010. 528 p.
- Zolotarev G.S. Geneticheskie tipy opolzney, ikh razvitiye i izucheniye [Genetic types of landslides, their development and study]. *Materialy soveshchaniya po izucheniyu opolzney i mer borby s nimi* [Proceedings of the meeting on the study of landslides and landslide control measures]. Kiev, KGU Publ., 1964. pp. 165–170.
- Emelyanova E.P. *Osnovnye zakonomernosti opolznevyykh protsessov* [The main regularities of landslide processes]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 310 p.
- Stroková L.A., Nadezhdina Yu.Yu. The natural and anthropogenic factors related to activity of slope processes on the territory of the projected railway Egeest-Kyzyl-Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 170–181. In Rus.
- Leonova A.V., Stroková L.A., Nikitenkov A. N. Assessment of landslide processes on the territory of Tomsk by using GIS technologies. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 1, pp. 94–103. In Rus.
- Phi H.T., Stroková L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
- Stroková L.A., Dmitrieva S.A. Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
- Stroková L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012051.
- Stroková L.A., Dutova E.M., Ermolaeva A.V., Alimova I.N., Strelnikova A.B. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 012032. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012032> (accessed 12 May 2022).
- Stroková L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2009, vol. 46, no. 3, pp. 117–119.
- Chen S.-C., Chou H.-T., Chen S.-C., Wu C.-H., Lin B.-S. Characteristics of rainfall-induced landslides in Miocene formations: A case study of the Shenmu watershed, Central Taiwan. *Engineering Geology*, 2014, vol. 169, pp. 133–146. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.11.020
- Fan L., Lehmann P., Or D. Effects of soil spatial variability at the hillslope and catchment scales on characteristics of rainfall-induced landslides. *Water Resources Research*, 2016, vol. 52 (3), pp. 1781–1799. Available at: [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1944-7973](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1944-7973) (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1002/2015WR017758
- Guo W.-Z., Luo L., Wang W.-L., Liu Z.-Y., Chen Z.-X., Kang H.-L., Yang B. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass move-

- ments on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2019, vol. 337, pp. 69–78. Available at: www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/ (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006
14. Minder J.R., Roe G.H., Montgomery D.R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45 (4), art. no. W04419. DOI: 10.1029/2008WR007027
 15. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes. *Special Report – National Research Council, Transportation Research Board*, 1996, vol. 247, pp. 36–75.
 16. Dai F.C., Lee C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 2002, vol. 42 (3–4), pp. 213–228. Available at: www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/ (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00087-3
 17. Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Reichenbach P., Rossi M. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 2008, vol. 96, no. 1–2, pp. 105–122. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.07.015
 18. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards. *Science*, 2007, vol. 316 (5828), pp. 1136–1138. DOI: 10.1126/science.1143308
 19. Kharismalatri H.S., Ishikawa Y., Gomi T., Sidle R.C., Shiraki K. Evaluating factors for controlling sediment connectivity of landslide materials: a flume experiment. *Water (Switzerland)*, 2018, vol. 11 (1), art. no. 17. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/17/pdf> doi: 10.3390/w11010017 (accessed: 12 May 2022).
 20. Xu X.Z., Guo W.Z., Liu Y.K., Ma J.Z., Wang W.L., Zhang H.W., Gao H. Landslides on the Loess Plateau of China: a latest statistics together with a close look. *Natural Hazards*, 2017, vol. 86 (3), pp. 1393–1403. Available at: www.wkap.nl/journalhome.htm/0921-030X (accessed: 12 May 2022). DOI: 10.1007/s11069-016-2738-6
 21. Strokova L. Landslide susceptibility zoning in surface coal mining areas: a case study Elga field in Russia. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, art. no. 146. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09314-2> (accessed: 12 May 2022).
 22. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Usmanov R.A., Kirillov V.M. Experimental studies of soil base deformations under the mode of flexible bottom of steel vertical tanks. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. Proceedings of the International Conference*. St-Petersburg, 2019. pp. 165–171.
 23. Konyushkov V.V., Veselov A.A., Kondratyeva L.N. Comprehensive analysis of the results of engineering surveys for design, construction and exploitation of structures in the areas with landslide processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125. In Rus.
 24. Zharkova N., Latypov A., Nuriev I., Cherniyuchuk G. Short-term forecast of landslide processes development using the method of engineering-geological analogy on the territory of Innopolis city (Russia). *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 649–656.
 25. Ilyin V.V., Sakharov V.A. Calculation of stability of slopes in the areas of construction of sports and tourist complex «Gorny Vozdukh» (Mountain Bolshevik, Yuzhno-Sakhalinsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 208–216. In Rus.
 26. Kropotkin M.P. Gravitational slope processes – hazard assessments and problems of rationing calculations. *Engineering Survey*, 2017, no. 10, pp. 24–34. In Rus. DOI: 10.25296/1997-8650-2017-10-24-34.
 27. Kropotkin M.P. Gravitational slope processes are a possible general classification. *Engineering Geology World*, 2017, no. 4, pp. 28–39. In Rus. DOI: 10.25296/1993-5056-2017-4-28-38
 28. Kvashuk S.V., Maleev D.Yu., Fedorenko E.V. Landslide hazard for linear infrastructure on the SHUFAN plateau (Primorsky Krai). *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*, 2021, no. 1, pp. 40–49. In Rus.
 29. Kharchenko S.V., Shvarev S.V. Forecasting landslide hazards in the vicinity of Krasnaya Polyana basing on the linear discriminatory analysis. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2020, vol. 3, pp. 22–33. In Rus.
 30. *Rukovodstvo po proektirovaniyu protivopozhnykh i protivoovalnykh zashchitnykh sooruzheniy* [Guidelines for the design of anti-landslide and anti-avalanche protective structures]. Moscow, MINTRANSSTROY Publ., 1983. 119 p.
 31. Sakharovskiy A.V. *Tekhnicheskii otchet po rezultatam dopolnitelnykh inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy po skalno-obvalnym uchastkam dlya podgotovki proektnoy dokumentatsii po dvukhputnoy vstavke na peregone Mugule-Mukunga s primykaniem k razyezdu Mugule Dalnevostochnoy zheleznoy dorogi* [Technical report on the results of additional engineering and geological surveys on rock-fall sites for the preparation of project documentation for a double-track insert on the Mugule-Mukunga stretch with an adjunction to the Mugule siding of the Far Eastern Railway]. Novosibirsk, Sibgiprotransput Publ., 2021. 371 p.
 32. GOST 21153.3-85 *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii* [State Standard 21153.3-85 Rocks. Methods for determining the tensile strength at uniaxial tension]. Moscow, Standards Publ., 1986. 14 p
 33. GOST 21153.2-84 *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii* [State Standard 21153.2-84 Rocks. Methods for determining the ultimate strength in uniaxial compression]. Moscow, Standards Publ., 1986. 9 p
 34. Nazarov G.N. *Metodicheskie ukazaniya po kompleksnym seismologicheskim i inzhenerno-geologicheskim issledovaniyam s primeneniem portativnykh seysmorazvedochnykh ustanovok* [Methodological guidelines for complex seismological and engineering-geological studies using portable seismic exploration installations]. Moscow, VIA Publ., 1969. 123 p.
 35. Wang F., Chen Y., Peng X., Zhu G., Yan K., Ye Z. The fault-controlled Chengtian landslide triggered by rainfall on 20 May 2021 in Songyang County, Zhejiang Province, China. *Landslides*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01891-x> (accessed: 12 May 2022).
 36. Ji J., Cui H., Zhang T., Song J., Gao Y. A GIS-based tool for probabilistic physical modelling and prediction of landslides: GIS-FORM landslide susceptibility analysis in seismic areas. *Landslides*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01885-9> (accessed: 12 May 2022).
 37. Meena S.R., Soares L.P., Grohmann C.H., Van Westen C., Bhuyan K., Singh R.P., Floris M., Catani F. Landslide detection in the Himalayas using machine learning algorithms and U-Net. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 1209–1229. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01861-3> (accessed: 12 May 2022).
 38. Mahalle A., Roudane M., Krimi A., Gouri S.A. Smoothed Particle Hydrodynamics for modelling landslide–water interaction problems. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 1249–1263. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01807-1> (accessed: 12 May 2022).
 39. Yao W., Li C., Yan C., Zhan H. Slope reliability analysis through Bayesian sequential updating integrating limited data from multiple estimation methods. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 1101–1117. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01812-4> (accessed: 12 May 2022).
 40. He L., Coggan J., Stead D., Francioni M., Eyre M. Modelling discontinuity control on the development of Hell’s Mouth landslide. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 277–295. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01813-3> (accessed: 12 May 2022).

Received: 20 May 2022.

Reviewed: 6 October 2022.

Information about the authors

Aleksandr V. Sakharovskiy, director, LLC «Scientific and Production Enterprise Engineering Protection».

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.