

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СЕВЕРНОГО СКЛОНА ХРЕБТА АИБГА В РАЙОНЕ ПОСЕЛКА ЭСТО-САДОК (СОЧИ, КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)

STABILITY CALCULATION OF THE NORTHERN SLOPE OF THE AIBGA RIDGE NEAR THE ESTO-SADOK VILLAGE (SOCHI, THE KRASNODAR TERRITORY)

СЛЫШКИНА Е.С.

Ведущий инженер-геолог ГК «ПетроМоделинг», аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, elena.slyshkina@petromodeling.com

БАРАНОВ А.А.

Заместитель начальника отдела камеральной обработки ГК «ПетроМоделинг», г. Москва, artem.baranov@petromodeling.com

БЕРШОВ А.В.

Генеральный директор ГК «ПетроМоделинг», ассистент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, alexey.bershov@petromodeling.com

SLYSHKINA E.S.

Leading engineer-geologist of the «PetroModeling» group of companies, postgraduate student of the Geology Faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, elena.slyshkina@petromodeling.com

BARANOV A.A.

Deputy head of the Office Processing Department of the «PetroModeling» group of companies, Moscow, artem.baranov@petromodeling.com

BERSHOV A.V.

General director of the «PetroModeling» group of companies, assistant lecturer of Lomonosov Moscow State University, Moscow, alexey.bershov@petromodeling.com

Ключевые слова:

хребет Аибга; долина реки Мзымта; поселок Эсто-Садок; Сочи; оползневый склон; расчет устойчивости склона; двумерная оценка устойчивости склона; трехмерная оценка устойчивости склона; двумерное моделирование; трехмерное моделирование; сейсмическое воздействие.

Key words:

Aibga ridge; Mzymta river valley; Esto-Sadok village; Sochi; landslide slope; slope stability calculation; two-dimensional slope stability assessment; three-dimensional slope stability assessment; two-dimensional modeling; three-dimensional modeling; seismic impact.

Аннотация

В настоящей статье рассматриваются оползневые процессы, распространенные на северном склоне хребта Аибга в долине реки Мзымта (Северный Кавказ). Описываются двумерные (в программном комплексе PLAXIS 2D AE) и трехмерные (в программном комплексе MIDAS GTS NX) расчеты устойчивости оползневого склона в статических условиях и при сейсмическом воздействии. Приводится анализ полученных результатов.

Введение

В последнее десятилетие происходит активное освоение Адлерского района города Сочи в Краснодарском крае, где в 2014 году были проведены XXII Олимпийские зимние игры. Для обеспечения своевременной доставки грузов и людей в период строительства и во время проведения Олимпиады было построено большое количество объектов инфраструктуры и транспортных путей.

Объектом данного исследования является участок склона на совмещенной автомобильной и железной дороге, соединяющей Большой Сочи и объекты горного кластера, расположенного в среднем течении реки Мзымта вблизи поселка Красная Поляна.

Работы на исследуемом участке начались в 2007 году. В ходе строительства совмещенной автомобильной и железной дороги в сложных инженерно-геологических условиях, в том числе из-за подрезок склона, произошла дестабилизация нижней части северного склона хребта Аибга.

В результате проведения инженерно-геологических исследований с нагорной стороны железной дороги было выявлено несколько оползневых массивов. Результаты мониторинга позволили выявить активные и временно стабилизировавшиеся оползневые тела, а также показали недостаточную эффективность проведенных противооползневых инженерных мероприятий.

Целью настоящей статьи является оценка устойчивости нижней части северного склона хребта Аибга в долине реки Мзымта различными методами. Авторами были изучены инженерно-геологические условия рассматриваемого участка, составлена расчетная схема для оцен-

Abstract

The article deals with landslide processes on the northern slope of the Aibga ridge in the valley of the Mzymta river (North Caucasus). Two-dimensional (in the PLAXIS 2D AE software package) and three-dimensional (in the MIDAS GTS NX software package) calculations of the landslide slope stability in the static conditions and under seismic load are described. Analysis of the obtained results is presented.

ки устойчивости склона в соответствии с этими условиями, проведены расчеты устойчивости склона методом конечных элементов в двумерной (в программном комплексе PLAXIS 2D AE компании Plaxis, Нидерланды) и трехмерной (в программном комплексе MIDAS GTS NX компании MIDAS IT, Южная Корея) постановке.

Оценка устойчивости оползневых склонов — одна из важнейших и сложнейших задач исследований, однако при ознакомлении с публикациями за последние 10 лет [8, 11] выяснилось, что данное направление развивалось недостаточно интенсивно. В опубликованных работах [14 и др.] представлены результаты расчетов, для проведения которых в трехмерной постановке используется программное обеспечение более чем двадцатилетней давности, не имеющее удобного интерфейса для ввода и обработки информации, а также не обладающее разрешающей способностью, соответствующей точности и объему исходных данных.

Ранее [1] на основе двумерного и трехмерного моделирования было показано, что трехмерные расчеты дают результаты по оценке устойчивости оползневых склонов, которые ближе к реальности, чем данные, полученные традиционными двумерными методами, так как учитывают геометрию всего склона и всей поверхности скольжения, а не только области вокруг расчетного профиля, зачастую не отражающего все вариации инженерно-геологических условий.

Одним из важных преимуществ трехмерной оценки устойчивости склона является то, что такой расчет позволяет прогнозировать развитие оползневого процесса не только по глубине исследованного разреза грунтового массива, но и в плане [8]. Это дает возможность более объективно оценивать риски, связанные с его пространственной активизацией. Трехмерное моделирование также позволяет в полной мере учитывать факторы, оказывающие существенное влияние на устойчивость (например, тектонические разломы, пересекающие склон под углом, подрезку части склона при строительстве дороги, скошенную геометрию тел, изменение уровня подземных вод и т.д.), которые нельзя учесть при двумерном моделировании.

Анализ расчетов устойчивости склона в трехмерной постановке наиболее необходим для склонов со сложной геоморфологией, различным пространственным распределением прочностных и деформационных характеристик грунтов и разнородными гидрогеологическими условиями [14]. В этом случае установление направления перемещения грунта приводит к определению минимального коэффициента устойчивости и рассчитанное значение этого параметра учитывает влияние геометрии и прочностных характеристик склона. Все это может быть выполнено с использованием трехмерного анализа.

Расчет устойчивости склонов в сейсмических районах должен производиться с учетом силы возможных землетрясений [9]. При этом используется несколько вариантов расчета, предназначенных для неоднородных склонов, на базе псевдостатического и динамического анализа.

Инженерно-геологические условия участка

Рассматриваемый участок расположен вблизи поселка Эсто-Садок на территории Адлерского района города Сочи Краснодарского края (рис. 1).

Рельеф

В пределах исследуемой территории развит среднегорный высотно-геоморфологический ярус рельефа. Границами рассматриваемого участка являются ручей Ржаной на юго-востоке и ручей Безымянный на юго-западе. С севера и юга он ограничен высотами 450–850 м над уровнем моря и имеет углы наклона поверхности 20–30° (местами они достигают 45–60°) (рис. 2).

По генетическим признакам на исследуемой территории выделяются две категории рельефа — денудационный и аккумулятивный. Денудационный тип рельефа имеют значительные по площади участки склонов, созданные эрозионными и эрозионно-денудационными процессами, с чехлом покровных отложений элювиально-делювиального происхождения. К аккумулятивному рельефу относятся формы, образовавшиеся в результате накопления разрушенного материала, оползневые массивы и надпойменная терраса реки Мзымта, расположенная в нижней части склона.

Геологическое строение

Участок исследования находится в пределах Краснополянкой зоны Гагрско-Джавского складчато-глыбового поднятия между Эстосадокским и Краснополянским разломами [3, 5].

В геологическом строении территории принимают участие отложения терригенной формации юры (эстосадокская свита J_{1es}) и четвертичные отложения (рис. 3).

Толща юрских отложений (J_{1es}) представлена глинистыми сланцами, аргиллитами (местами рассланцованными). Встречаются стяжения, конкреции и кристаллы пирита. Породы перемяты в линейные складки (падение — 15–40° в сторону, противоположную падению экспозиции склона) и нарушены разломами. Сланцы — глинистые, углистые, трещиноватые, часто выветрелые, в верхней части склона от прочных до очень низкой прочности, местами окремненные [2]. На участке исследования они распространены повсеместно и перекрыты чехлом четвертичных отложений. К юрским отложениям приурочены трещинные воды,

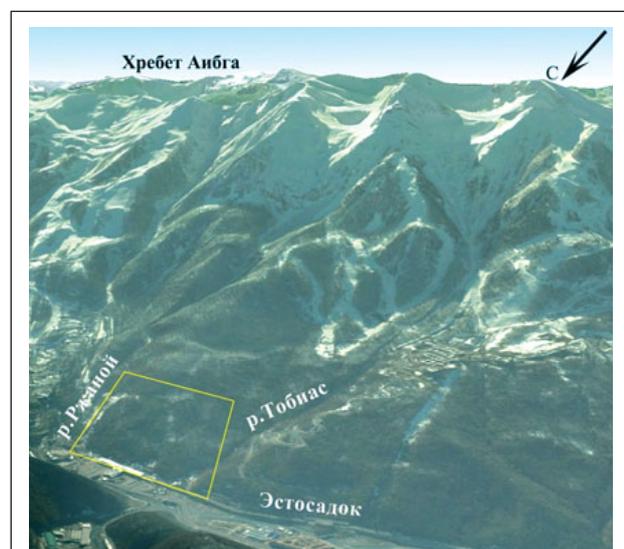


Рис. 1. Исследуемая часть северного склона хребта Аибга (ограничена желтой линией) на основе космоснимка Landsat 6, выполненного 23.02.2014 г. (время съемки — 16:00 мск)

которые встречаются в зонах повышенной трещиноватости. Воды, как правило, безнапорные или слабонапорные, с напором, в среднем не превышающим 6 м.

Четвертичные образования на исследуемом участке представлены элювиальными, оползневыми, делювиальными и аллювиальными отложениями от галечниковых, гравийных, щебенисто-глыбовых до супесчано-суглинистых.

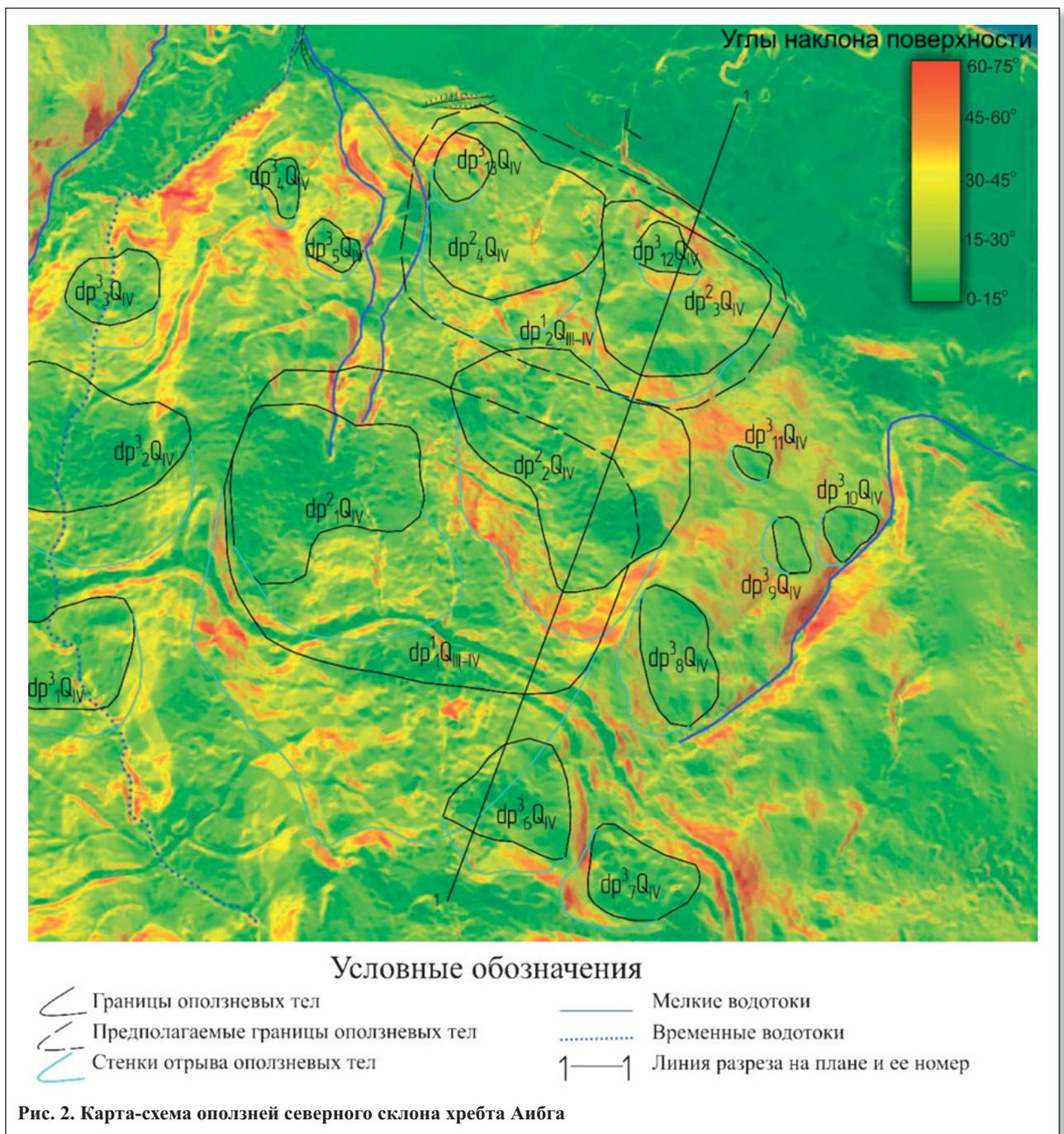
Элювиальные отложения ($eQ(J_{1ес})$) развиты по поверхности юрских пород. В разрезах они представлены суглинками с дресвой выветрелого глинистого сланца. Их мощность изменяется от 1,2–2,0 до 15–20 м. Элювиальные отложения развиты повсеместно, однако на участке исследования встретить их можно в стенках отрыва оползней и в местах подрезки склонов, так как они перекрыты делювиальными и оползневыми отложениями.

Аллювиальные отложения (aQ_{II-IV}) приурочены к руслу и пойме долины реки Мзымта. Они представлены

галечниковыми и гравийными отложениями с песчаным, супесчаным или суглинистым заполнителем, иногда без заполнителя. Мощность аллювия достигает 20–25 м и более в долине реки Мзымта. Аллювиальные отложения располагаются на севере участка исследования широкой полосой (под склоном). К аллювиальным отложениям приурочен безнапорный водоносный горизонт, который распространен в русловой и пойменной части долины реки Мзымта.

Оползневые отложения (dpQ_{IV}, dpQ_{III-IV}) на участке исследования располагаются в центральной и нижней части склона. Они сложены дресвяными грунтами с суглинистым, супесчаным заполнителем. Местами в оползневых толщах встречается обугленная древесина, гнезда ожелезненного песка, глыбы и пачки коренных пород. Мощность оползневых отложений — от 4–5 до 35 м и более.

Делювиальные отложения (dQ_{IV}) нередко представлены глинистыми грунтами с включениями щебня, ще-



бенистыми и дресвяными грунтами с суглинистым заполнителем. Их мощность — от 1,2–2,0 до 3,5 м. Делювиальные отложения на участке исследования широко развиты и имеют покровное залегание. Часто именно к ним приурочены мелкие оползни-оплывины, возникающие при техногенном освоении территории.

По механизму смещения оползневые тела являются инсеквентными оползнями сдвига. Смещение оползневых масс ориентировано преимущественно в северном направлении по вогнутой криволинейной поверхности. Наличие разломов и расчлененность коренного массива допускают смещение как в долину с перераспределением соседних блоков, так и по механизму выклинивания или опускания.

К оползневым отложениям приурочены пластово-поровые воды, которые встречаются на глубинах от 3 до 7 м и являются практически безнапорными. Водовмещающими породами являются линзы и прослои щебенистых и дресвяных грунтов, разрушенные блоки коренных пород. Водоносные горизонты являются невыдержанными и часто не связанными между собой.

Интерпретация оползневой истории

На основании карты наклонов поверхности северного склона хребта Аибга и проинтерпретированных материалов ранее выполненных изысканий на участке исследования была составлена оползневая схема этого склона и выделены оползневые тела нескольких генераций (см. рис. 2).

Образование оползневых тел первой генерации авторы связывают с углублением долины реки Мзымта в позднем неоплейстоцене и голоцене в результате тектонической активности территории и с последующим изменением базиса эрозии реки, при котором происходили вскрытие рельефа района рекой и ее притоками и, как следствие, образование крупных оползневых массивов большой мощности, развитых в отложениях нижней юры.

На участке исследования выделено два оползневых тела первой генерации ($dp^1_{I-Q_{III-IV}}$, $dp^2_{I-Q_{III-IV}}$), имеющих в плане овальную форму. Размеры оползневых тел в плане составляют порядка 200 м вдоль направления смещения, до 300 м поперек него и классифицируются как большие [6].

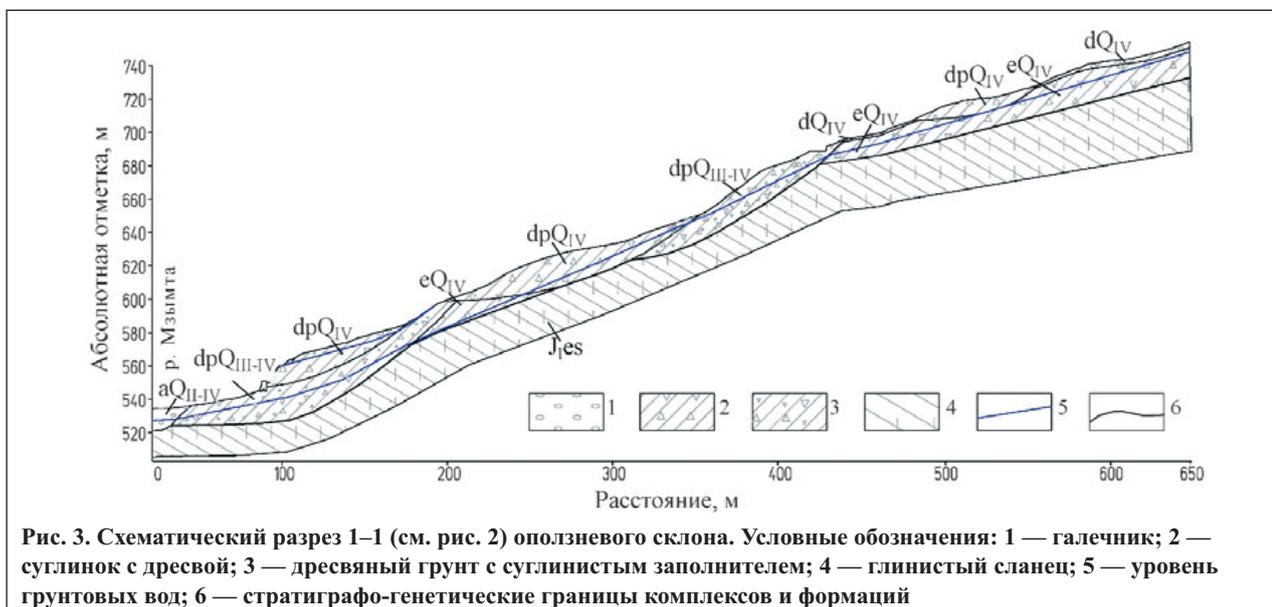
Оползневые тела второй генерации, по мнению авторов, развиты в пределах более ранних крупных оползневых массивов (см. рис. 2). Их формирование было вызвано несколькими причинами, среди которых — дальнейшее развитие эрозионной деятельности в бортах долины реки Мзымта, в частности разветвление овражной сети и ее продвижение к водораздельным частям хребта Аибга, а также сейсмические события различной силы.

Согласно схеме наклонов поверхности на участке исследования было выделено четыре оползневых тела второй генерации ($dp^2_{I-Q_{IV}}$, $dp^2_{II-Q_{IV}}$, $dp^2_{III-Q_{IV}}$, $dp^2_{IV-Q_{IV}}$), имеющих в плане изогнутую овальную форму. Размеры оползневых тел в плане составляют порядка 120–150 м вдоль направления смещения, до 150–200 м поперек него и классифицируются как большие и средние [6].

Формирование оползневых тел третьей генерации связывается с техногенным освоением территории. Активизация оползневой деятельности вызвана: подрезкой существующих склонов; планировкой рельефа, при которой на локальных участках создавались более крутые поверхности; использованием в качестве тел насыпей местных легко выветриваемых и размываемых грунтов, переходящих в неустойчивое состояние при водонасыщении; пригрузкой склонов за счет насыпей техногенного грунта.

Выделенные оползневые тела третьей генерации ($dp^3_{I-Q_{IV}}$, $dp^3_{II-Q_{IV}}$, $dp^3_{III-Q_{IV}}$, $dp^3_{IV-Q_{IV}}$, $dp^3_{V-Q_{IV}}$, $dp^3_{VI-Q_{IV}}$, $dp^3_{VII-Q_{IV}}$, $dp^3_{VIII-Q_{IV}}$, $dp^3_{IX-Q_{IV}}$, $dp^3_{X-Q_{IV}}$, $dp^3_{XI-Q_{IV}}$) имеют в плане неправильную форму. Размеры тел разных оползней изменяются от 20 до 130 м вдоль направления смещения, от 30 до 160 м поперек него и классифицируются как средние и небольшие [6].

Составленная авторами схема (см. рис. 2) учитывает последовательность оползневых событий, однако сильно эродированный рельеф склона усложняет выделение оползней, их генераций и определение факторов их образования. Проведение радиоуглеродного датирования оползневых отложений даст точный ответ о времени оползневых событий и поможет прояснить природу возникновения оползней, о которой до настоящего времени нет единого мнения.



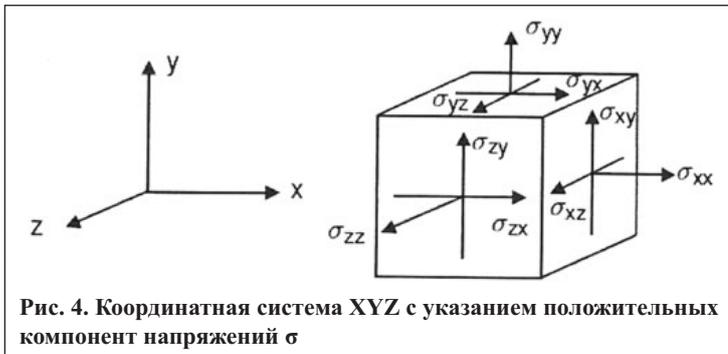


Рис. 4. Координатная система XYZ с указанием положительных компонент напряжений σ

Методика расчета устойчивости оползневого склона

Основой для построения инженерно-геологической модели нижней части склона хребта Аибга площадью 7 га послужили данные цифровой съемки местности и материалы инженерно-геологических изысканий. Согласно этим данным на моделируемом участке склона было пробурено 80 горных выработок, оборудовано 25 инклинометрических и 25 гидрогеологических скважин. Склон был изучен на глубину 40 м при максимальной глубине проходческих работ 60 м. Также в большом объеме были выполнены геофизические работы -- сейсмопрофилирование, сейсмическая томография, георадиолокационные и скважинные геофизические исследования, электроразведка.

В настоящей работе расчет устойчивости оползневого склона проводился на двумерной модели сечения склона для статических условий и с учетом сейсмического воздействия на основе псевдостатического анализа, а также на трехмерной модели для статических условий и с учетом сейсмического воздействия на основе динамического анализа.

Расчеты устойчивости склона выполнялись в следующей последовательности:

- начальный расчет (статические условия, заданные напряжения от собственного веса массива грунта);
- расчет устойчивости склона методом снижения прочностных характеристик в статических условиях;
- псевдостатический или динамический расчет устойчивости склона при сейсмическом воздействии.

Особенности расчета устойчивости склона в программном комплексе PLAXIS 2D AE

Построение двумерной конечноэлементной модели в программном комплексе PLAXIS 2D AE основано

на создании геометрической модели. Модель создается в плоскости XY глобальной системы координат, во время как ось Z направлена на пользователя. Во всех случаях считается, что выходные сжимающие напряжения и усилия (включая поровое давление) имеют отрицательные значения, а растягивающие напряжения и усилия — положительные.

Несмотря на то что программный комплекс PLAXIS представляет собой программу для решения двумерных (плоских) задач, рассчитанные с ее помощью напряжения основаны на трехмерной декартовой системе координат (рис. 4). При расчете в условиях плоской деформации нормальное напряжение σ_{zz} , действующее параллельно оси Z, является поперечным напряжением.

Основой для расчета устойчивости оползневого склона с использованием двумерной модели в программном комплексе PLAXIS 2D AE стал инженерно-геологический разрез 1–1 (см. рис. 2, 3), который был построен по наиболее вероятному направлению развития оползневого процесса. Геомеханическая модель (рис. 5), используемая при расчете, полностью соответствует инженерно-геологическому разрезу (см. рис. 3).

При построении инженерно-геологического разреза использовались результаты обработки материалов инженерно-геологических изысканий. Они позволили детально установить границы между геологическими телами, различающимися по своим физическим и механическим характеристикам. За неимением расчетных показателей свойств, для расчета применялись нормативные характеристики грунтов, что, в свою очередь, привело к увеличению коэффициента устойчивости. Свойства отдельного слоя (табл. 1) задавались через наборы данных по материалам, которые имеются в базе данных программного пакета PLAXIS 2D AE.

Для расчетов была принята упругопластическая модель поведения грунтов Кулона — Мора, так как она описывает предельные соотношения между напряжениями и прочностными показателями в некоторой части массива пород и с помощью нее исследуется его устойчивость [4].

Граничные условия геометрической модели задавались следующим образом (рис. 6). Верхняя граница свободна от напряжений. Нижняя граница удалена так, что не оказывает влияния на решение задачи, поэтому вдоль нее задаются нулевые значения перемещений. Боковые границы не испытывают влияния факторов, вызывающих перераспределение напряжений, поэтому точки, расположенные на боковых гранях, не будут перемещаться в горизонталь-

Таблица 1

Параметры грунтов в модели Мора — Кулона, используемые при расчетах в программных комплексах PLAXIS 2D AE и MIDAS GTS NX									
Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Расчетный элемент						
			J _{Ies}	eQ _{IV}	dpQ _{III-IV}	dpQ _{IV}	dQ _{IV}	aQ _{II-IV}	
Удельный вес грунта выше уровня грунтовых вод	γ_{unsat}	кН/м ³	21,40	22,60	20,40	21,00	20,60	20,90	
Удельный вес грунта ниже уровня грунтовых вод	γ_{sat}	кН/м ³	23,39	22,90	21,05	21,95	22,06	21,52	
Начальный коэффициент пористости	e_{init}	-	0,388	0,370	0,601	0,505	0,480	0,475	
Модуль деформации	E'	кН/м ²	49700	26000	22000	30000	30000	20900	
Коэффициент Пуассона	ν'	-	0,28	0,35	0,35	0,35	0,32	0,28	
Угол внутреннего трения	ϕ	град.	45	26	15	21	20	44	
Удельное сцепление	c	кН/м ²	86	52	31	36	17	27	

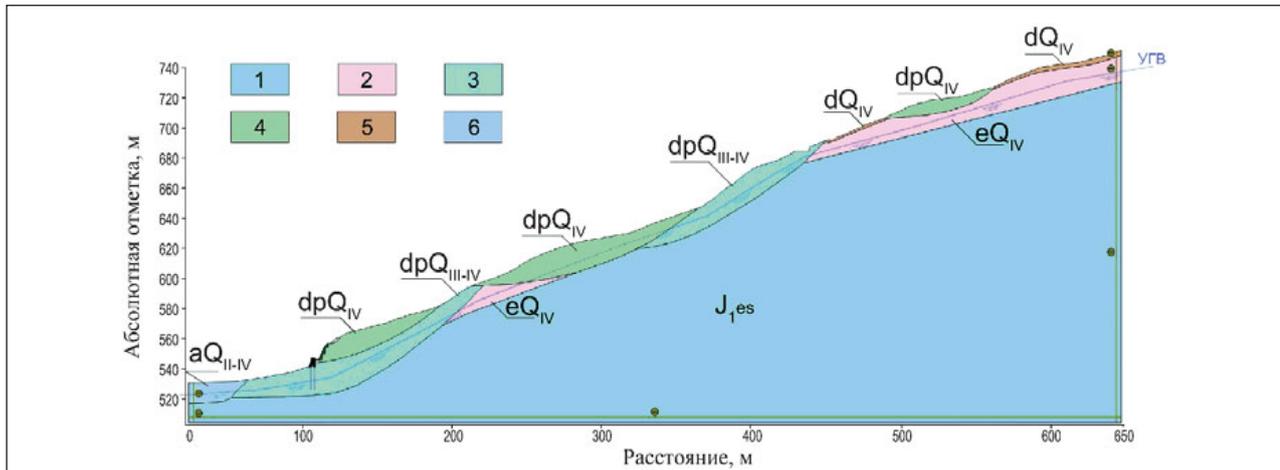


Рис. 5. Профильная геометрическая модель, используемая при расчете в программном комплексе PLAXIS 2D AE. Условные обозначения: 1 — отложения терригенной формации юры (эстосадокской свиты); 2 — элювиальные отложения; 3 — плейстоцен-голоценовые оползневые отложения; 4 — голоценовые оползневые отложения; 5 — делювиальные отложения; 6 — плейстоцен-голоценовые аллювиальные отложения; УГВ — уровень грунтовых вод

ном направлении. И также отсутствует трение по боковой поверхности (нулевое касательное напряжение).

Созданная модель использовалась при линейно-статическом расчете для определения напряженно-деформированного состояния массива от собственного веса. Затем проводился расчет устойчивости склона с использованием метода снижения прочности (SRM — Shear Reduction Method), по которому поэтапно уменьшаются тангенс угла внутреннего трения $tg \varphi$ и удельное сцепление c , на каждом этапе оцениваются сопротивление сдвигу и деформация — и так до наступления разрушения склона [10]. Критерий разрушения модели определяется условием Кулона — Мора. Коэффициент устойчивости K_s будет соответствовать коэффициенту снижения прочности (прочностных характеристик) для последнего устойчивого состояния склона. Поверхность скольжения и коэффициент устойчивости определяются одновременно в процессе расчета в программе.

Учет сейсмического воздействия осуществлялся с использованием псевдостатического анализа — путем задания общего ускорения в направлении по осям X и Y. Для расчетного землетрясения интенсивностью 9 баллов вертикальная компонента ускорения составила $0,100g$, горизонтальная — $0,033g$.

Особенности расчета устойчивости склона в программном комплексе MIDAS GTS NX

Программный комплекс MIDAS GTS NX основан на использовании метода конечных элементов в условиях двумерной и трехмерной задач. Он позволяет моделировать условия площадки с учетом нелинейности материала и начальных напряжений в грунте.

В MIDAS GTS NX строится трехмерная конечно-элементная модель грунтового массива. Во всех случаях считается, что выходные сжимающие напряжения и усилия (включая поровое давление) имеют отрицательные значения, а растягивающие напряжения и усилия являются положительными [12].

Модель грунтового массива была создана авторами на основе цифровой матрицы рельефа (цифровой карты по результатам съемки местности) с использованием дополнительного программного модуля. С его помощью был построен 3D-контур поверхности земли исследуе-

мого участка. На основании материалов, полученных от ОАО «МОСГИПРОТРАНС» (карты фактического материала, инженерно-геологических разрезов, колонок горных выработок, результатов инклинометрических наблюдений), были построены граничные поверхности геологических тел и затем созданы объемные элементы грунтов. На присвоенный набор данных указывает цвет элемента в геометрической модели (рис. 8).

Грунты моделировались состоящими из объемных трехмерных элементов в соответствии с физико-механическими характеристиками, заданными в наборах данных по материалам в программном комплексе MIDAS GTS NX. В расчетах также использовалась упругопластическая модель Мора — Кулона. Она разбивалась на тетраэдральные и пирамидальные конечные элементы (см. рис. 8). Затем к массиву грунта прикладывалась статическая нагрузка от собственного веса и задавались граничные условия (рис. 9).

Созданная модель использовалась в линейно-статическом расчете для определения напряженно-деформированного состояния массива от собственного веса, после которого были проведены расчеты устойчивости оползневой склона в статических условиях методом снижения прочности (SRM) и с учетом сейсмического воздействия на основе динамического анализа.

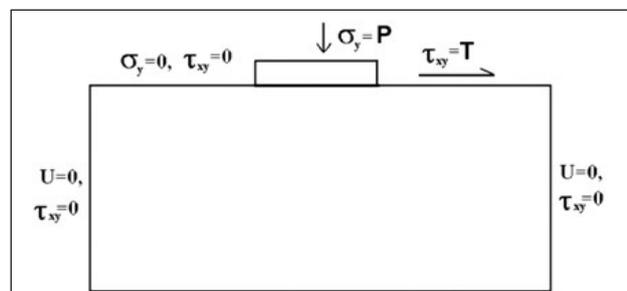


Рис. 6. Задание граничных условий в изучаемой области. Буквенные обозначения: σ_y — нормальное напряжение, τ_{xy} — касательное напряжение, U — горизонтальное перемещение, V — вертикальное перемещение, T — трение, $\sigma_y = P$ — напряжение от приложенной к поверхности нагрузки

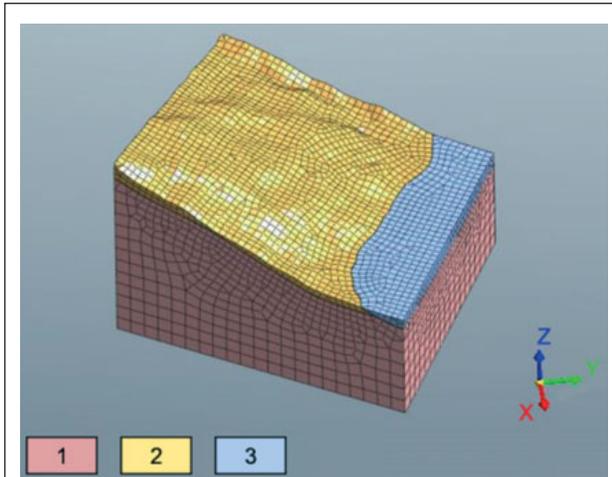


Рис. 8. Общий вид конечноэлементной расчетной модели оползневого склона. Условные обозначения: 1 — отложения терригенной формации юры (эстосадокской свиты); 2 — оползневые и элювиальные отложения; 3 — аллювиальные отложения; X, Y, Z — оси координат

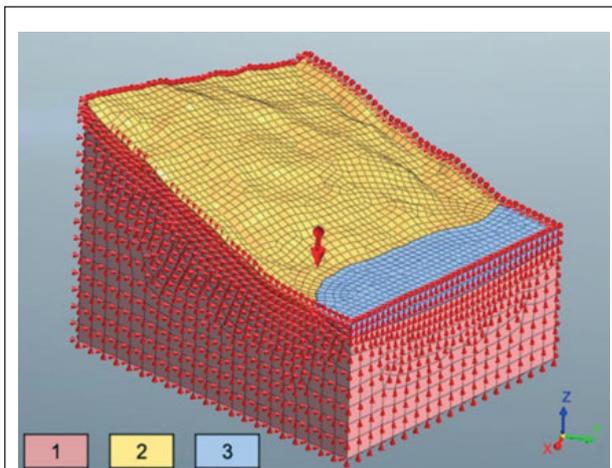


Рис. 9. Конечноэлементная расчетная модель оползневого склона с заданными нагрузкой от собственного веса и граничными условиями. Условные обозначения: см. рис. 8

Результаты расчетов устойчивости склона в программном комплексе PLAXIS 2D AE

Анализ устойчивости рассматриваемого оползневого склона в двухмерной постановке в программе PLAXIS 2D AE (рис. 10) показал, что для *статических условий* коэффициент устойчивости K_s равен 1,107. Отсюда можно сделать вывод, что этот склон находится в неустойчивом состоянии при заданных расчетных параметрах, так как нормативное значение K_s , характеризующее минимально допустимый запас удерживающих усилий по отношению к действующим на призму обрушения сдвигающим воздействиям, составляет 1,15 для обычных природных условий [7].

Результаты оценки устойчивости оползневого склона с учетом *сейсмического воздействия* интенсивностью 9 баллов показали, что поверхность предполагаемого смещения характеризуется коэффициентом устойчивости меньше единицы ($K_s=0,970$). Это указывает на то, что на исследуемом участке при сейсмическом событии возможны потеря устойчивости склона

и активизация оползневых процессов, так как нормативное значение K_s , характеризующее минимально допустимый запас удерживающих усилий при сейсмическом воздействии, составляет 1,04 [7]. При этом предполагаемая поверхность смещения находится в элювиальных отложениях и формирует в нижней части откоса оползневое тело протяженностью 120 м по линии падения склона, захватывающее всю мощность четвертичных отложений на данном участке (около 30 м).

Результаты расчетов устойчивости склона в программном комплексе MIDAS GTS NX

По результатам количественной оценки устойчивости оползневого склона в трехмерной постановке в программе MIDAS GTS NX (рис. 11) коэффициент устойчивости K_u для *статических условий*, полученный методом уменьшения прочности, равен 1,313. Этот результат говорит о том, что склон находится в устойчивом состоянии. При этом область, выделенная на рис. 11 зеленым цветом, оконтуривает район возможного развития оползневых процессов. В нижней части склона наблюдается оползневое тело (красно-желтые тона на рис. 11), которое в плане имеет размеры 80×60 м. Предполагаемая поверхность смещения этого оползня находится в элювиальных отложениях. Построенные сечения (рис. 12) показывают, что отрыв и смещение оползневых тел происходят по вогнутой криволинейной поверхности внутри грунтового массива, которая пересекает слои разного литологического состава. Наибольшая глубина захвата четвертичных отложений на данном участке — 30 м.

Расчет устойчивости оползневого склона с учетом *сейсмического воздействия* на основе динамического анализа показал, что поверхность предполагаемого смещения характеризуется низким коэффициентом устойчивости ($K_s < 1$). Максимальные значения перемещений грунта соответствуют наибольшим смещениям в направлении оси Y (по направлению падения склона). Они показаны красным цветом на рис. 13. Эта область располагается в нижней части склона и несет непосредственную угрозу объектам инфраструктуры, расположенным у подножия хребта.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования нижней части оползневого склона хребта Аибга в трехмерной постановке позволяют выделить потенциально неустойчивые области, которые совпадают с границами распространения существующих оползневых массивов. На полученных схемах перемещений выделяется область, характеризующаяся как наиболее неустойчивая (красный цвет на рис. 11–13). Построенное сечение этой области будет характеризоваться наименьшим коэффициентом устойчивости.

Коэффициент устойчивости K_s , полученный при расчете в программном комплексе MIDAS GTS NX в трехмерной постановке, превышает значение K_s , полученное при двухмерном расчете в программном комплексе PLAXIS 2D AE (табл. 2), поскольку учитывает геометрию всего склона и характеризует его устойчивость в целом.

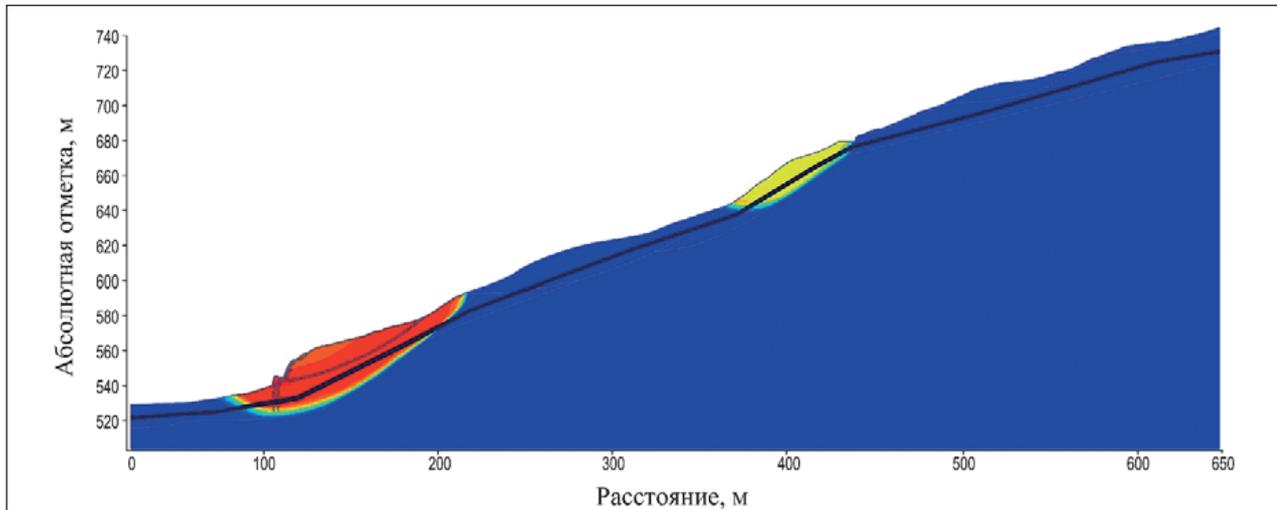


Рис. 10. Результаты расчета устойчивости исследуемого склона по линии разреза 1–1 (см. рис. 2, 3) с использованием двухмерной конечноэлементной модели в программном комплексе PLAXIS 2D AE. Самый темный синий цвет соответствует нулевым смещениям (деформациям) грунта, т.е. устойчивой части массива. Остальные тона и цвета соответствуют ненулевым деформациям. Изменения цвета и тона в ряду «синий → зеленый → желтый → красный» соответствуют увеличению смещений. Полученное изображение отражает наиболее вероятные положения поверхностей скольжения возможных оползней

Поверхности смещения на сечениях трехмерной модели (см. рис. 12) и на схеме, полученной по результатам двухмерного расчета (см. рис. 10), подобны друг другу и захватывают всю мощность четвертичных отложений (около 30 м) на исследуемом участке.

Заключение

Кроме решения морфологических задач (связанных с изучением состава, состояния, строения, свойств грунтов и их инженерно-геологических условий) исключительную важность имеет ретроспективный анализ, помогающий установить историю развития скло-

на и корректно решить поставленные задачи (ответить на вопрос о времени оползневых событий, прояснить природу возникновения оползней, о которой до настоящего времени нет единого мнения). Данный методический прием обычно незаслуженно отбрасывается в геологической практике, но остается определяющим для обоснованного выбора методов инженерной защиты от склоновых процессов.

По механизму смещения оползневые массивы на исследованном участке северного склона хребта Аибга являются инсеквентными оползнями сдвига. Смещение оползневых масс ориентировано преимущественно в северном направлении по вогнутой криволинейной поверхности с глубиной захвата до 30 м.

Расчеты устойчивости северного склона хребта Аибга в районе поселка Эсто-Садок на территории Ад-

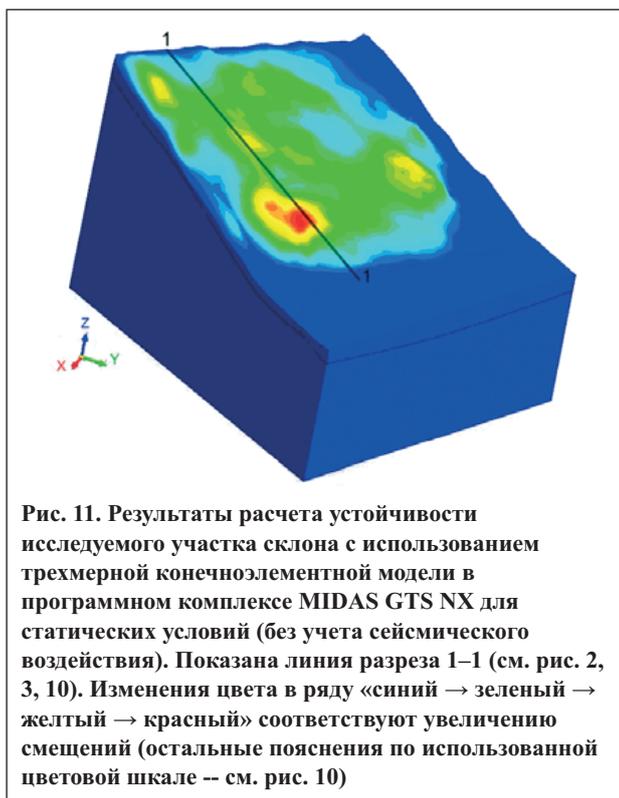


Рис. 11. Результаты расчета устойчивости исследуемого участка склона с использованием трехмерной конечноэлементной модели в программном комплексе MIDAS GTS NX для статических условий (без учета сейсмического воздействия). Показана линия разреза 1–1 (см. рис. 2, 3, 10). Изменения цвета в ряду «синий → зеленый → желтый → красный» соответствуют увеличению смещений (остальные пояснения по использованной цветовой шкале – см. рис. 10)

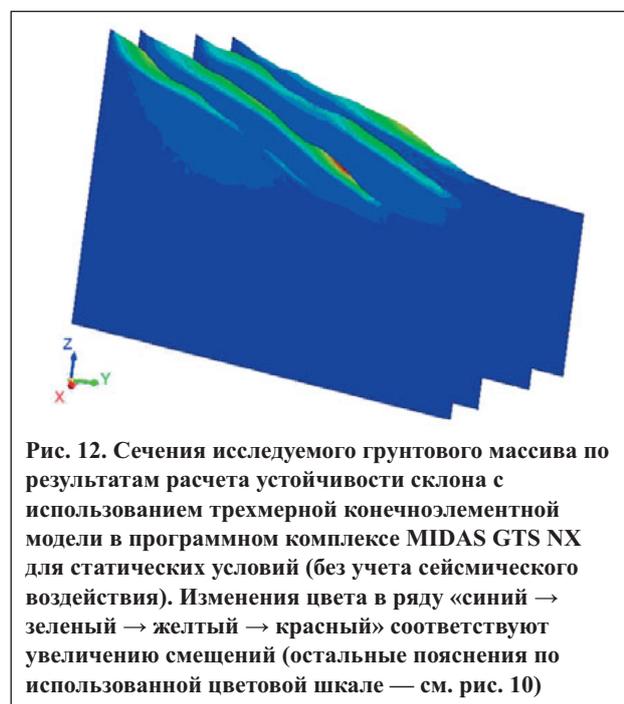


Рис. 12. Сечения исследуемого грунтового массива по результатам расчета устойчивости склона с использованием трехмерной конечноэлементной модели в программном комплексе MIDAS GTS NX для статических условий (без учета сейсмического воздействия). Изменения цвета в ряду «синий → зеленый → желтый → красный» соответствуют увеличению смещений (остальные пояснения по использованной цветовой шкале — см. рис. 10)

Таблица 2

Сопоставление результатов расчета коэффициента устойчивости (K_s) северного склона хребта Аибга в программных комплексах PLAXIS 2D AE и MIDAS GTS NX		
Вариант расчета	K_s при расчете в программе	
	PLAXIS 2D AE	MIDAS GTS NX 3D
В статических условиях	1,107	1,313
С учетом сейсмического воздействия	0,970	<1

лерского района города Сочи Краснодарского края подтвердили предположение о наличии потенциально неустойчивого участка в нижней части этого склона на рассмотренном участке.

Результаты количественной оценки устойчивости в трехмерной постановке для статических условий показали, что склон находится в устойчивом состоянии и только при сейсмическом событии становится неустойчивым, при этом наиболее неустойчивой становится его нижняя часть.

Анализ результатов количественной оценки устойчивости в двухмерной постановке показал, что в статических условиях при заданных расчетных параметрах оползневый склон находится в неустойчивом состоянии, а при 9-балльном сейсмическом воздействии могут образоваться оползни, что оставляет вопрос инженерной защиты сооружений на рассматриваемом участке открытым.

Составленная авторами карта-схема оползней северного склона хребта Аибга (см. рис. 2) учитывает последовательность развития оползней в прошлом, но не дает окончательных однозначных ответов о времени их формирования и о ранжировании вызвавших их факторов по степени важности. Проведение радиоуглеродного датирования оползневых отложений на исследуемой территории поможет ответить на эти вопросы и прояснить природу возникновения этих оползней, о которой пока нет единого мнения.

Результаты анализа активности оползневых процессов на северном склоне хребта Аибга показали, что не-

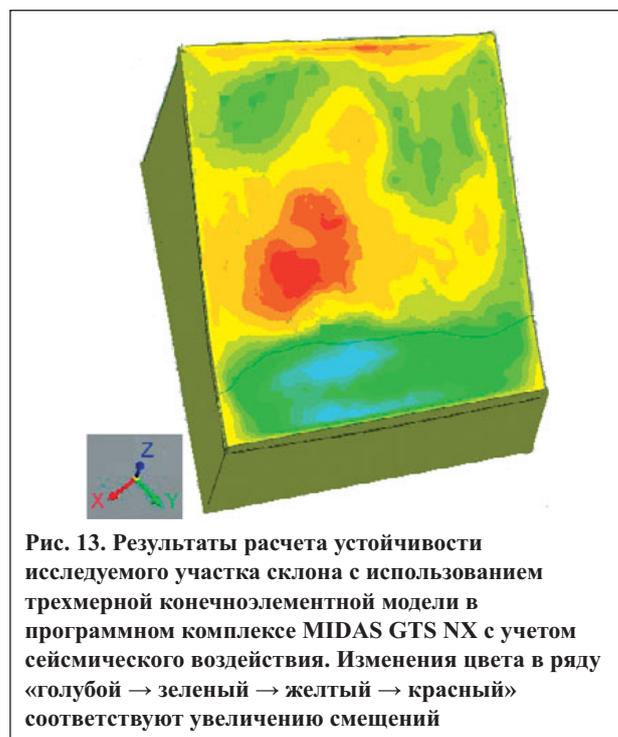


Рис. 13. Результаты расчета устойчивости исследуемого участка склона с использованием трехмерной конечноэлементной модели в программном комплексе MIDAS GTS NX с учетом сейсмического воздействия. Изменения цвета в ряду «голубой → зеленый → желтый → красный» соответствуют увеличению смещений

обходимо усилить противооползневые мероприятия на рассматриваемом участке.

В плане дальнейших исследований на участках северного склона хребта Аибга с достаточно сложными инженерно-геологическими условиями и высокой степенью активности оползневых процессов особенно актуальным представляется вопрос датировки оползневых отложений, которая позволит воссоздать историю развития склона, дать корректный количественный прогноз в отношении оползневой ситуации и на этой основе максимально надежно доработать мероприятия по инженерной защите. ❖

Авторы выражают большую благодарность начальнику отдела инженерных изысканий ОАО «Мосгипротранс» М.Л. Васильеву, главному геологу этого отдела С.В. Кузину и остальным их сотрудникам за предоставленные материалы изысканий прошлых лет по объекту исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов А.В. Оценка устойчивости оползневых склонов на основе трехмерного моделирования // Инженерная геология. 2013. № 6. С. 46–55.
2. Геология СССР. Том 9. Северный Кавказ. М.: Недра, 1968. 760 с.
3. Инженерная геология СССР. Том 8. М.: Изд-во МГУ, 1978. 366 с.
4. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование. М.: Изд-во МГУ, 2006. 36 с.
5. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968.
6. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 2. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2000.
7. СП 116.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 23-01-99). Инженерная защита территорий зданий и сооружений от опасных геологических процессов. М.: Минрегион России, 2012.
8. Фоменко И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 44–53.
9. Фоменко И.К., Захаров В.С., Самаркин-Джарский К.Г., Сироткина О.Н. Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов (на примере Краснодарского геодинамического полигона) // Геориск. 2009. № 4. С. 50–55.
10. Brinkgreve R.B.J., Bakker H.L. Non-linear finite element analysis of safety factors, Rotterdam, 1991.
11. Kalatehjari R., Ali N. A review of three-dimensional slope stability analyses based on limit equilibrium method // Electronic journal of differential equations. 2013. № 18. P. 119–134.
12. MIDAS GTS NX. User's manual. 2014.
13. PLAXIS 2D AE. User's manual. 2014.
14. Stark T.D. Three-dimensional slope stability methods in geotechnical practice // Proceedings of the 51-t Annual Geotechnical Engineering Conference. Minneapolis — St. Paul, Minnesota, USA: University of Minnesota, 2003.