

# ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 551.435.627:004.9+[528.481:624.131]  
DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-2-5-17

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ ПО МАТЕРИАЛАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

*Александра Андреевна Ислямова*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистрант кафедры космической и физической геодезии, тел. (983)230-19-46, e-mail: shatsaa@mail.ru

*Валерий Степанович Хорошилов*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)343-29-11, e-mail: khoroshilovvs@mail.ru

В статье рассматриваются возможности применения моделирования напряженно-деформированного состояния склонов для прогноза оползневой опасности, что имеет очень важное значение для успешной реализации всех последующих этапов проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Рассмотрены существующие подходы и методы, используемые в процессе решения поставленной задачи и определена принадлежность проводимого исследования к виду математического моделирования напряженно-деформированного состояния оползневого тела методом конечных элементов. Показано, что подбор конкретных математических выражений для всех последующих расчетов осуществляется в зависимости от конкретного типа оползня. Показаны механизмы деформации и разрушения склона под действием гравитационных сил с использованием данных геодезических наблюдений и инженерно-геологических изысканий. В результате выполненных исследований были произведены расчеты на нескольких моделях, иллюстрирующих поведение массива грунтов оползнеопасного склона. Получены картины напряжений для простого склона крутизной  $35^\circ$ , совпадающие с опубликованными ранее данными физического эксперимента для реального склона карьера.

**Ключевые слова:** оползень, геодезические наблюдения, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, оползневый склон, упругие свойства

### *Введение*

В настоящее время в связи с реализацией масштабных проектов строительства происходит активное освоение больших участков необжитых территорий, многие из которых располагаются в сложных геоморфологических условиях, в силу чего изучение протекающих экзогенных геологических процессов приобретает все большее значение. Склоновые процессы (развитие оползней, обвалов, лавин) относятся к одним из наиболее распро-

страненных в России опасных геологических явлений. Данное обстоятельство приводит к тому, что их раннее выявление на стадии изысканий имеет очень важное значение для успешной реализации всех последующих этапов проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений [1].

Реализация геодезического контроля в процессе наблюдений за деформационными процессами оползневых склонов показала его эффективность, так как его результаты являются объективным отражением в количественной

форме проявления сложной динамики поведения этих опасных по своей природе геологических процессов. По данным натурных геодезических наблюдений в совокупности с рядом дополнительных факторов возможно оценить динамику поведения оползня и рассчитать время активизации данного опасного природного явления на основе методов математического моделирования, а также построить математическую модель деформации поведения оползневого склона, которая в дальнейшем позволит выполнить прогнозирование как скорости перемещения, так и площади распространения оползневого перемещения грунтов.

На характер перемещений оползневого склона влияют многие воздействующие факторы, поэтому построение точной прогнозной модели на основании только геодезических данных является достаточно сложной задачей. Выходом из данной ситуации может служить применение дополнительных физико-механических методов моделирования, основанных на расчете устойчивости склонов путем построения картины напряжений в массиве оползневого тела для последующего изучения развития и протекания деформационных процессов. Подбор конкретных математических выражений для всех последующих расчетов осуществляется в зависимости от конкретного типа оползня, а также от предполагаемого механизма для описания последующего перемещения оползневых масс, а данное обстоятельство является прямым следствием сложного геологического строения и упругих свойств грунтов оползневого тела.

Обобщая вышесказанное, отметим, что использование геолого-физических методов моделирования в совокупности с геодезическими данными позволяет более обоснованно и детально охарактеризовать в количественной мере степень устойчивости оползневого склона при оценке опасности активизации оползневых процессов. В статье рассмотрены основы численного моделирования для описания протекающих физико-механических процессов в теле оползня и приведены результаты расчетов на некоторых моделях.

### ***Состояние вопроса и постановка задачи***

На сегодняшний день существует много разнообразных методик прогноза оползневой опасности, поэтому некоторые авторы анализируют проблему комплексно, путем аналитического сравнения различных подходов. Сводный анализ положений законодательных, нормативных и научных источников о мониторинге оползневых объектов представлен в работе [2]. Оценка многих существующих методов прогноза динамики поведения оползневых процессов приведена в [3], где предлагается математический анализ определения результативности метода по нескольким оценочным параметрам, взятым с определенным весом. Проблемы выявления и картографирования оползневых рисков отражены в работе [4], а ограничения существующих методов для оценивания в количественной мере степени устойчивости оползневого тела рассмотрены в [5].

В целом ряде публикаций предлагаются различные геодезические методы изучения деформационных процессов на склонах, которые можно объединить в несколько групп. Наиболее распространены классические геодезические наблюдения с определением координат нескольких точек на склоне [6, 7]. Наблюдения при этом проводятся циклами, что позволяет при повторных измерениях получить пространственные смещения контролируемых оползневых знаков, обращая при этом особое внимание на вертикальные перемещения [8].

Одним из подходов к изучению деформационных процессов является использование современных лазерно-сканирующих приборов [1]; среди предлагаемых модификаций – наземное [9] и воздушное [10] лазерное сканирование. Так, в одной из работ [11] авторами на основе практических данных проводится сравнение классической и лазерной технологии для изучения поведения оползней.

Обработка данных геодезического мониторинга в большинстве случаев проводится методами математической статистики. Возможности применения теории случайных

функций для анализа поведения оползневых процессов рассмотрены в [12]. По материалам этих исследований разработана методика корреляционного анализа для изучения оползневого процесса. Реализация математического моделирования, в основе которой лежит корреляционная теория случайных функций, представлена в работах Ю. П. Гуляева, О. Г. Павловской, В. С. Хорошилова [8, 13].

Наряду с геодезическими наблюдениями оползнеопасных склонов предлагаются различные комплексы и методы регистрации развития процесса. Так, например, геоэкологический мониторинг [14] занимает в этом списке главенствующую роль, так как изучение опасных экзогенных процессов является одной из задач этой отрасли наук. Кроме того, прогнозирование поведения оползней опирается и на данные инженерно-геологических изысканий [15], изучающих состав грунтов. Хорошие результаты дает анализ неустойчивых состояний геофизическими методами, например, электроразведочными, в основе которых проявляются зависимости электрических свойств грунтового состава пород от изменения напряженно-деформированного состояния массива оползневого тела [16]. Активно используется и наблюдение сейсмических проявлений локальных тектонических процессов [17].

Одним из ключевых методов в изучении деформаций оползневых склонов является численное математическое моделирование [5, 18–20]. Многие авторы для моделирования устойчивости склонов привлекают в качестве исходных данных отдельные показатели физико-механических свойств пород [19], получаемые на основе применения геологических и геофизических методов исследования. Так, в работе [20] выполнен анализ нескольких вариантов применения моделей грунтов, отличающихся по исходным свойствам и расчетным схемам. По заданным входным параметрам, характеризующим геометрию и свойства оползневого склона, на основании метода конечных элементов в работе [18] представлены расчеты напряженно-деформированного состояния горных пород. Вероятностный подход к выявлению активизации оползневых процессов реализован в работе [5], в которой также представлены результаты анализа вы-

бора самого метода на последующие расчеты по анализу устойчивости изучаемого склона (методы Моргенштерна – Прайса, Бишопа, Янбу).

Другим подходом к моделированию оползневой ситуации является описание грунтов склона с использованием уравнений движения. Так, в работе [21] представлен расчет механико-математической модели движения масс по оползневому склону. Кроме того, нашел применение и гидродинамический подход, при котором тело оползня ведет себя как высоковязкая несжимаемая жидкость, движущаяся по наклонной поверхности; при этом оползень представляется в виде потока сглаженных частиц, а сам расчет осуществляется на основе системы уравнений Навье – Стокса [22].

Расчеты, представленные нами в данной статье, базируются на физико-математической модели гипопругой хрупкой среды, разработанной М. М. Немировичем-Данченко [23]. Им же предложен и соответствующий метод численного моделирования процесса разрушения твердых тел [24] по принципу реализации закона поведения гипопругих сред, предложенного К. Труселлом [25]; кроме того, предложена уникальная методика по разделению точек расчетной сетки на отдельные части при реализации метода численного моделирования. Данный метод позволяет решать пространственную задачу о деформировании и разрушении геологической среды, что как нельзя лучше подходит для описания процессов, происходящих при образовании оползней.

### ***Методы исследования***

Наиболее распространенным методом изучения деформаций оползневых склонов является численное моделирование, основанное на результатах математической обработки данных геодезических измерений. Обработка данных в большинстве случаев производится методами математической статистики, в частности, с использованием метода корреляционного анализа для выделения из всего массива данных статистически однородных групп перемещений. Такой подход позволяет с определенной вероятностью предсказать положение

оползневых реперов в каждый момент времени в процессе выявления активизации оползневых процессов [26]. Однако характер перемещений оползня обусловлен многими воздействующими факторами, поэтому прогнозная модель, построенная на основании только геодезических данных, является теоретической и обладает вероятностными свойствами, из-за чего страдает достоверность получаемых результатов. Выходом из данной ситуации может служить применение дополнительных физико-механических методов моделирования, что приводит к повышению точности прогноза устойчивости склона и позволяет дополнить картину опасности возникновения оползня с иной точки зрения, что, несомненно, идет на пользу при исследовании протекающих оползневых процессов. В этом случае моделирование нуждается в получении дополнительных входных данных, а именно, физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон. Также приветствуется и учет в модели дополнительных условий, которые могут повлиять на активизацию оползневых процессов. В качестве таких данных можно использовать эмпирическое определение прямых параметров устойчивости [6], среди которых:  $\nu$  – крутизна склона;  $\phi$  – угол внутреннего трения;  $c$  – удельное сцепление грунта;  $M$  – масса оползневого тела, связанная с объемом  $V$  и плотностью грунта  $\rho$ . Кроме того, возможно использование параметров упругости, таких как модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\sigma$ . Достаточно полное представление о характеристиках приведенных выше параметров можно получить в процессе лабораторных или полевых испытаний свойств грунтов.

По результатам выполненных инженерно-геодезических и геологических изысканий создается геомеханическая модель с целью последующего расчета устойчивости изучаемого оползневого склона. Обычно для характеристики каждого встреченного при разведке типа грунта используют способ осреднения физико-механических параметров, определяемых в полевых условиях или лабораторно, причем для достоверности необходимо не менее 6–10 значений, полученных из различных образцов грунта [20]. Дополнительно для данного изучаемого оползневого склона конструируется и геометрическая модель по результа-

там тщательного изучения инженерно-геологического разреза. Для последующих действий с целью формирования объемной формы тела оползня возникает необходимость получить сведения о так называемой поверхности или плоскости скольжения оползня (ПСО). Для успешного решения возникшей задачи достаточно успешно применяются различные измерительные технологии в процессе проведения запланированных заранее инженерно-геологических изысканий. При этом реализуемая точность в процессе нахождения высот характерных точек ПСО определяется величиной порядка 1 м. Для проведения всех необходимых расчетов с применением предварительно выбранной поверхности скольжения, как правило, ориентируются на рекомендации по выбору метода расчета, представленные в нормативных документах [27]. В большинстве случаев подобный выбор наиболее вероятной плоскости скольжения определяется или стратиграфическими границами оползневого тела, или принадлежностью к конкретным геологическим слоям, и в большинстве случаев, как правило, это основной деформируемый горизонт.

После построения модели склона с заданной дневной поверхностью и ПСО переходят к расчетам. И здесь одним из важнейших этапов на стадии теоретических исследований является процесс подбора под существующие условия необходимых математических выражений, отражающих наиболее адекватно деформационные процессы деформирования и разрушения грунтов. Одним из наиболее применяемых способов установления подобной зависимости может быть использование известных математических моделей между возникающими напряжениями в грунтах и последующими деформациями (модель поведения грунта) и моделью, характеризующей определенные условия для перехода исследуемых грунтов массива оползневого тела в так называемое предельное состояние, именуемое критерием прочности [5]. В случае оползневых склонов, имеющих неоднородный состав грунтов, используются, в основном, два варианта расчетов с использованием численных методов, известных как метод предельного равновесия и метод конечных элементов. В основу первого положено решение системы диф-

ференциальных уравнений, первое из которых отражает известное из раздела физики условие общего равновесия моментов; а второе – описывает известное условие равновесия действующих сил. Принцип использования для расчетов метода конечных элементов заключается в аппроксимации исследуемой функции набором кусочных элементарных функций, определенных на ограниченных подобластях [28]. Что касается конкретных расчетных формул, то в последнее десятилетие в механике сред широко используется закон Гука, представленный в дифференциальной форме и отражающий зависимость мгновенных значений напряжений и деформаций в окрестности расчетной точки. В этом случае вся система уравнений тогда описывает мгновенное поведение бесконечно малой частицы среды, а сама среда называется гипотупругой [23].

Из классической теории упругости известно, что отдельные элементарные объемы, располагающиеся рядом, испытывают совместные деформации, т. е. изменения в конкретной ячейке ограничиваются окружающими ячейками и трансформируют их. Однако в процессе оползнеобразования происходит разрушение среды, и чтобы учесть данное обстоятельство при моделировании, необходимо задать условие хрупкости среды, которое заключается в разделении соседних частиц друг от друга и разобщении их движения. С этой целью используется конечно-разностный метод описания среды вместо динамических уравнений общего вида. Принцип заключается в том, чтобы задать отдельные координаты для вершин прямоугольной элементарной ячейки, даже если они совпадают у соседних ячеек (например, как в сплошном теле) [24]. Соответственно, вершины, изначально находящиеся в одной точке, связаны между собой и двигаются совместно до тех пор, пока разрывающее напряжение в какой-либо точке не достигнет критического значения. Если данный критерий выполняется, то связь между вершинами разрушается, и ячейки начинают перемещаться независимо друг от друга. Математически это выражается в построении граничных условий на полученных в результате потери связи свободных поверхностях и в раздельном расчете скоростей и перемещений для точек, относящихся к раз-

ным краям образованной трещины. Математическая модель, заданная подобным образом, имеет конечные расчетные объемы, напряжения и деформации и способна к разрушению. В механике такими характеристиками обладает так называемая гипотупругая хрупкая среда, с помощью которой довольно точно решаются многие геолого-механические задачи; в том числе, она позволяет рассчитывать напряженное состояние оползнеопасного склона и прогнозировать местоположение трещин отрыва оползня.

### *Расчеты на моделях*

Вполне очевидно, что одним из основных факторов, влияющих на изменение напряженно-деформированного состояния оползневого склона, является его форма. В случае, когда его форма является выпуклой, подобный склон характеризуется четко очерченной верхней бровкой, которая возникает, если вещество склона плохо растекается и может поддерживать большой угол (большая вязкость) наклона, или при низкой плотности грунтов, пологой нижней поверхности и небольшой толщине слоя [21]. Подобное формирование поверхности тела оползня является вполне естественным с точки зрения возникающей опасности оползня на склоне.

В качестве первой расчетной задачи было решено построить картину распределения напряжений в простой модели с разным углом падения склона. Конкретная геометрия и значения углов склона (15, 25 и 35°) взяты из работы [29], где авторами на установках физического моделирования методом фотоупругости были построены и выявлены границы максимальных касательных напряжений (рис. 1).

Из полученной в процессе расчетов картины напряжений следует, что при достаточно большой крутизне склона, помимо максимума на угловой точке поверхности скольжения, появляется и дополнительная область концентрации напряжений ниже по склону. Появление данного локального максимума на наклонной поверхности приводит к нарушению статически равновесной системы и является определенным фактором возникновения потенциальной неустойчивости оползневого склона.

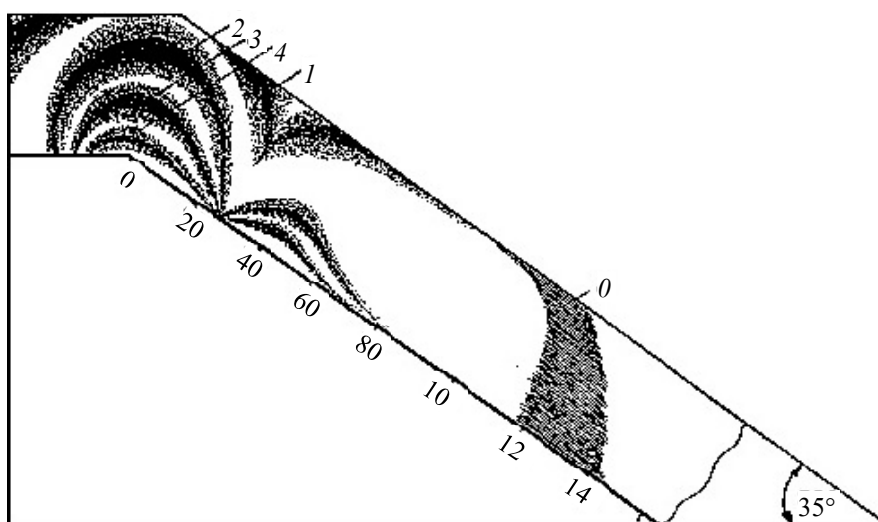


Рис. 1. Выявленные границы максимальных касательных напряжений на оползневом склоне с уклоном  $35^\circ$  [29]:

1, 2, 3, 4 – порядок полос; 0 – изотропная область

Для выполнения аналогичного расчета с использованием численного метода рассматриваемая форма склона была представлена в цифровом виде. Были заданы следующие параметры, соответствующие описанному выше физическому эксперименту: мощность покровных отложений на склоне не превышает 24,5 м; общая длина модели – 250 м; длина верхней горизонтальной поверхности – 70 м; число расчетных ячеек –  $250 \times 31$ . В качестве значений упругих свойств, необходимых для расчета, были взяты наиболее характерные параметры для покровных грунтов: модуль Юнга  $E = 5$  МПа, плотность  $\rho = 1500$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона  $\sigma = 0,32$ . Расчет был выполнен в рамках модели гипотупругой среды; полученный результат для угла склона в  $35^\circ$  представлен на рис. 2.

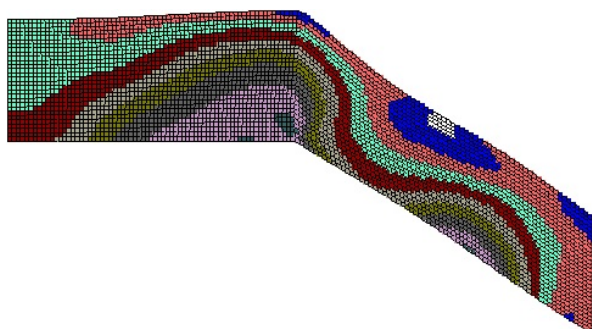


Рис. 2. Построенные изолинии, характерные для максимальных касательных напряжений в верхней части склона

Детальный анализ рис. 2 позволил выделить в поле максимальных касательных напряжений две ярко выраженные точки: первая соотносится с углом нижней поверхности склона модели; а вторая – смещена вдоль по склону, что отражает ранее полученные результаты в процессе поведенного физического моделирования. Кроме того, под действием силы тяжести, заданной в расчетной системе уравнений, произошло уплотнение массива и небольшое изменение формы дневной поверхности.

Далее для прогноза развития оползневого движения было задано условие скольжения, а именно, было принято, что сила сцепления тела оползня с нижележащими породами равна нулю. Результаты выполненных расчетов для картины напряжений в границах расчетной области представлены на рис. 3.

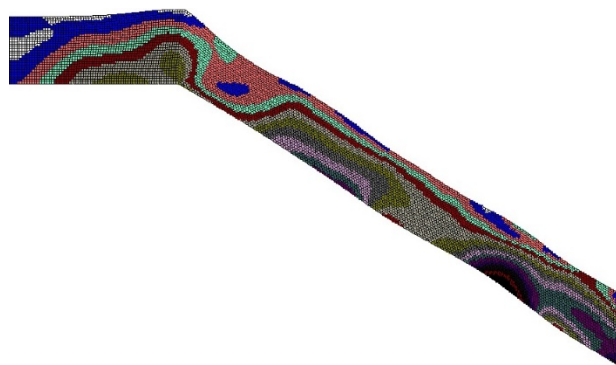


Рис. 3. Напряжения в теле оползня со свободной поверхностью скольжения

Можно утверждать, что при переходе к неустойчивому состоянию (возникновении ПСО) меняется поле напряжений, т. е. зона концентрации напряжений перемещается к нижнему правому краю модели и достигает максимума практически у подножия склона. Также заметно, что при развитии процесса присутствуют деформации склона, которые в реальных условиях и обнаруживаются при геодезических наблюдениях. Наиболее характерным является тот факт, что наблюдается явное проседание дневной поверхности на расстоянии от бровки на величину порядка толщины слоя, т. е. в области формирования зоны растягивающих напряжений, что при достижении критического значения может привести к возникновению деформационных трещин.

Рассмотрим более подробно реализацию механизма образования трещины при численном моделировании. В качестве модели используем однородный образец модельного материала, к верхней и нижней поверхности которого приложено растягивающее напряжение (рис. 4, а), а на боковых гранях – ставится условие свободной поверхности.

Рассмотрим более подробно реализацию механизма образования трещины при численном моделировании. В качестве модели используем однородный образец модельного материала, к верхней и нижней поверхности которого приложено растягивающее напряжение (рис. 4, а), а на боковых гранях – ставится условие свободной поверхности.

В определенный момент времени разрывающее напряжение в какой-либо точке тела достигает предела и выполняется критерий разрушения, а связь между расчетными ячейками рвется (рис. 4, б). Образуется трещина отрыва, изначально перпендикулярная к приложенной растягивающей силе. После первоначального момента образования трещины ее края приходят в движение и отдаляются друг от друга. Следует отметить, что при этом в пространстве, окружающем вершину разрыва, резко увеличиваются напряжения. Установившиеся в окрестностях трещины напряжения изображены на рис. 5, где каждая ячейка расчетной сетки закрашена оттенком серого цвета в соответствии с величиной максимального главного напряжения. Дальнейший рост нагрузки приводит к продолжению процесса разрушения связей, которые могут происходить в различных направлениях.

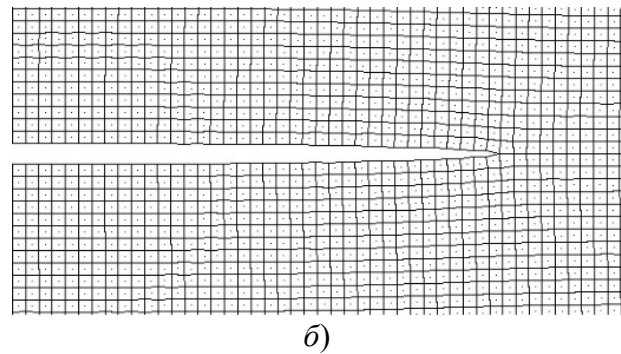
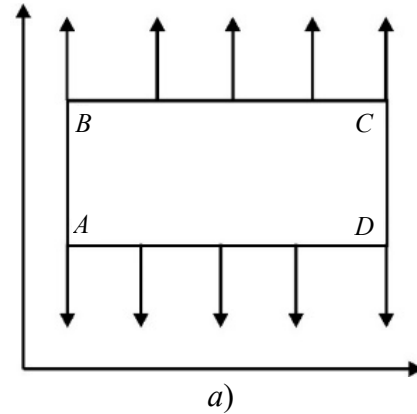


Рис. 4. Возникновение трещины отрыва:  
а) геометрия модели растяжения образца;  
б) фрагмент расчетной сетки в момент образования трещины

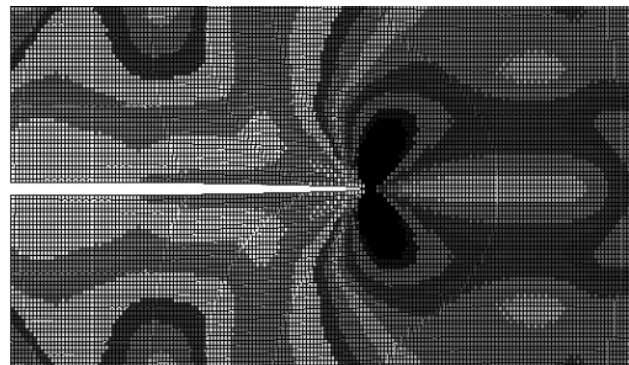


Рис. 5. Картина значений напряжений при наличии трещины отрыва

Рассмотренный механизм достаточно хорошо иллюстрирует идею образования оползня. По сути, активный оползень можно представить в виде непрерывной череды трещин отрыва в верхних частях склона и сдвиговых трещин на подошве оползня. Если интерпретировать сам процесс сползания для активного оползня как таковой, то его можно представить в виде явления последователь-

ного чередования зацепов за подстилающую поверхность частиц вышележащей массы грунтов, а в дальнейшем – последующего соскальзывания этих зацепов. Этот процесс формирует зеркало скольжения, т. е. определенный слой грунта, иногда даже достаточно очень тонкий, и в то же время имеющий такое свойство, как пониженное сопротивление сдвигу. Таким свойством обладают определенные грунты, поэтому далее на реальном примере рассмотрим влияние грунтового состава склона на наличие напряженного состояния склона и возможную оползневую опасность.

В качестве примера был выбран склон, для которого производился расчет касательных напряжений, и который является бортом карьера разрабатываемого угольного разреза в Кемеровской области. За основу для описания строения склона был использован утвержденный геологический разрез по профилю (рис. 6), а грунтовый состав приведен в описании рисунка. Каждому типу грунта был задан набор присущих породе характеристик, определенных в лаборатории из проб геологического материала (подробнее в [30]), в том числе учитывался атмосферный воздух, нужный для расчета явлений на дневной поверхности.

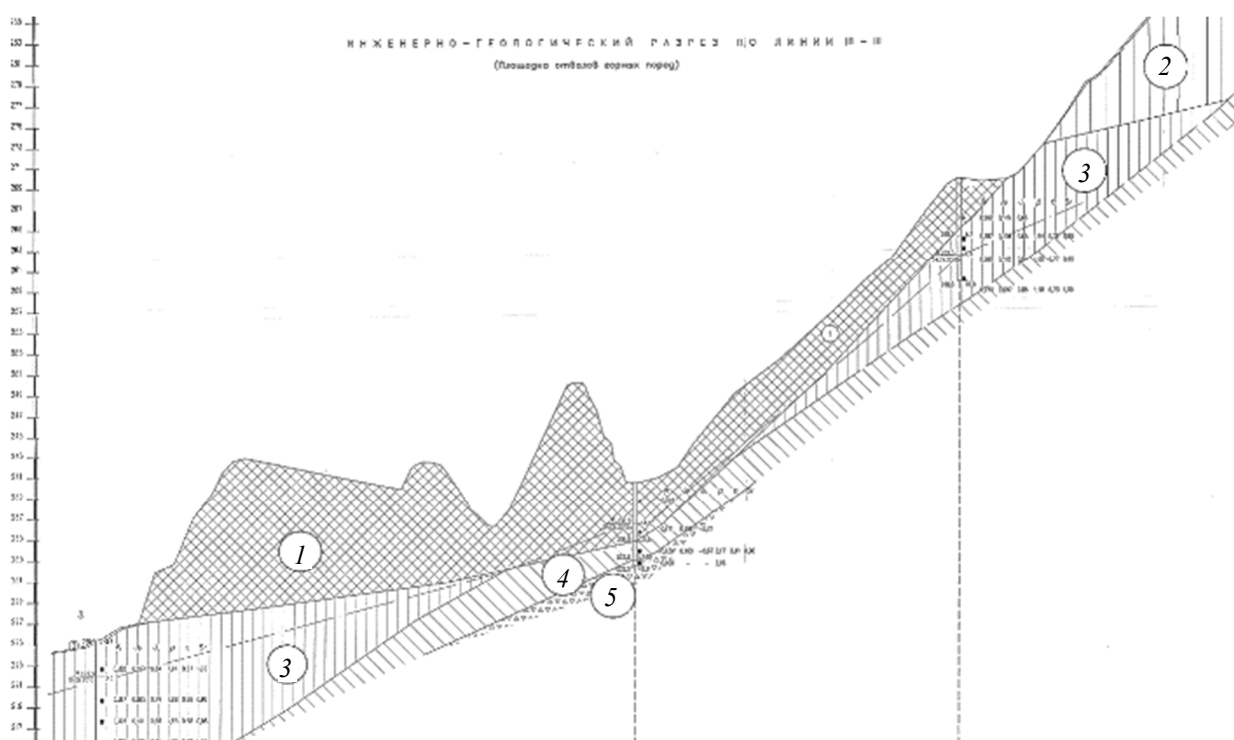


Рис. 6. Инженерно-геологический разрез борта карьера:

1 – насыпной грунт; 2 – суглинок полутвердый; 3 – суглинок текучепластичный; 4 – суглинок твердый; 5 – полускальный грунт, выветрелый до щебня. Штриховой линией обозначен уровень грунтовых вод

Опасность подобного сочетания в расположении грунтов (см. рис. 6) заключается в наличии слоя текучепластичного суглинка, насыщенного водой и лежащего на более твердом основании. Сверху слой перекрывается и прерывается насыпным грунтом с весьма сложным строением поверхности. Совокупность этих факторов может привести к подвижкам верхнего слоя разреза, которым

должно предшествовать напряженное состояние склона. После построения модели был запущен расчет механических параметров, влияющих на напряженное состояние склона. Ниже показана картина, на которой для исследуемого склона карьера выявлены поля максимальных касательных напряжений.

Как видно из картины напряжений (рис. 7), наиболее неустойчивыми являются две зоны



склона, раскрашенные красно-желтым цветом; одна расположена внизу в области крутой части склона, подпираемая холмообразным выступом насыпного грунта, который не дает ей прийти в движение. Другая оползнеопасная зона расположена в левой части раз-

реза и сложена достаточно большим объемом насыпного грунта, лежащим на текучепластичном суглинке, поэтому ее напряженное состояние распространяется на некоторую глубину и может привести к подвижке большой массы породы.

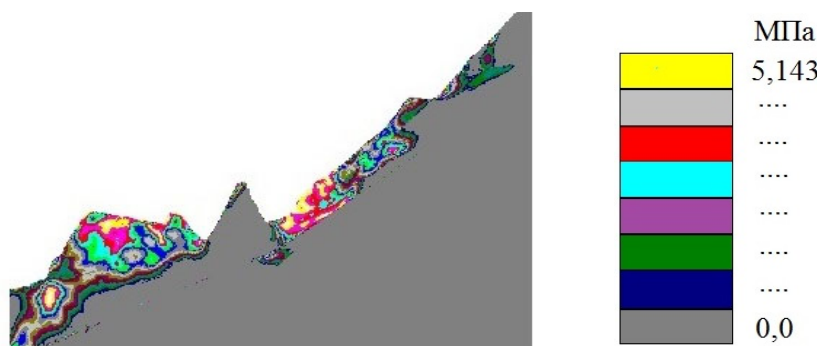


Рис. 7. Выявленное поле максимальных касательных напряжений для склона карьера

В массиве склона существуют касательные напряжения, достигающие 2–5 МПа, что в процессе расчета не привело к запуску механизма разрушения связей, описанного ранее. Однако такие напряжения близки к критичным и даже при небольших ухудшениях условий (например, изменение влажности или объема техногенного грунта) могут достичь состояния образования трещин отрыва на склоне. Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что оползневый массив может оказаться достаточно неустойчивым при наличии определенных дополнительных условий, например, таких как рост обводненности для большей части массива грунтов, или сейсмическое воздействие произвольного генезиса, или антропогенные изменения формы склона.

### Заключение

Анализ современного состояния проблемы мониторинга склонов и прогноза поведения оползней, выполненный на первом этапе работы по информации из источников, показал актуальность выполняемого исследования. Были рассмотрены существующие подходы и методы, используемые в процессе решения поставленной задачи, и определена принадлежность проводимого исследования к виду математического моделирования напряженно-

формированного состояния оползневого тела методом конечных элементов с привлечением геодезических и геологических данных.

В результате выполненных исследований были произведены расчеты на нескольких моделях, иллюстрирующих поведение массива грунтов оползнеопасного склона. Получены картины напряжений для простого склона крутизной 35°, совпадающие с опубликованными ранее данными физического эксперимента и для реального склона карьера. Кроме того, математически был задан и описан механизм появления деформационных трещин, предшествующих оползню. По смоделированному напряженному состоянию борта карьера были выявлены зоны, больше всего подверженные вероятности образования оползня. Выявлена предположительная причина вероятности образования оползня, заключающаяся в наличии такого неустойчивого типа грунта, как текучепластичный суглинок, который располагается ниже под насыпным грунтом карьера. На основании полученных данных можно выполнить профилактические работы по укреплению вышеуказанных зон и не производить работ, ведущих к увеличению нагрузки.

Таким образом, моделирование и прогноз деформаций оползнеопасных склонов позволяет вовремя предусмотреть мероприятия по инженерной защите сооружений и не допу-

стить разрушений, связанных с оползневой деятельностью. Подобные расчеты по моделированию и прогнозу оползневой опасности могут применяться как в регионах с типичными геоморфологическими, гидрологическими и климатическими условиями, так и при строительстве инженерных сооружений в городах, на месторождениях (при открытом способе разработки) и в пределах линейных транспортных объектов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В., Погосян А. Г. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // Инженерные изыскания. – 2015. – № 2. – С. 30–36.
2. Маций С. И., Безуглова Е. В. Геотехнический мониторинг транспортных сооружений на участках активного развития оползневых смещений грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 4. – С. 36–40.
3. Симонян В. В., Николаева Г. А. Сравнительный анализ численных критериев результативности методов оценки опасных оползневых процессов // Научное обозрение. – 2017. – № 20. – С. 150.
4. Свалова В. Б. Анализ и оценка риска оползневых процессов на урбанизированных территориях // Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 4. – С. 22–29.
5. Зеркаль О. В., Фоменко И. К. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов // Инженерная геология. – 2016. – № 1. – С. 16–21.
6. Симонян В. В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами : монография. – М. : МГСУ, 2011. – 172 с.
7. Колесатова О. С. Совершенствование методики маркшейдерских наблюдений за деформируемыми участками бортов карьеров (на примере Камаганского месторождения) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № S2-4. – С. 23–32.
8. Павловская О. Г., Хорошилов В. С., Носков М. Ф. Методика выделения однородных оползневых зон по результатам геодезических наблюдений вертикальных перемещений осадочных реперов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 5. – С. 31–34.
9. Овсяченко Н. И., Акопов Д. Н. Лазерное сканирование и мониторинг оползневых склонов // Инженерные изыскания. – 2012. – № 2. – С. 40–45.
10. Кузин А. А., Санникова А. П. Методика оценки оползневой опасности при освоении территорий на основе геоинформационных систем по геодезическим данным // Геодезия и картография. – 2016. – № 4. – С. 43–50.
11. Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В. Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений // Инженерные изыскания. – 2014. – № 3. – С. 16–24.
12. Симонян В. В. Обоснование точности и разработка методов математико-статистического анализа геодезических наблюдений за смещениями оползней : дис. канд. техн. наук. – М. : Государственный университет по землеустройству, 2008. – 182 с.
13. Васильев Е. А., Гуляев Ю. П., Павловская О. Г. О повышении эффективности геодезических исследований динамики оползневых склонов // Геодезия и картография. – 2010. – № 9. – С. 6–9.
14. Лазарев В. М. Разработка комплексной системы геодезического обеспечения геомониторинга геоэкологической безопасности на оползнеопасных территориях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 4. – С. 65–72.
15. Конюшков В. В. Инженерная защита территорий от склоновых процессов с учетом природных условий и техногенных воздействий // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 2. – С. 137–142.
16. Угненко Е. Б., Тимченко О. Н. Анализ существующих методов исследования напряженно-деформированного состояния пород оползневого склона // Автомобильный транспорт. – 2010. – № 26. – С. 119–122.
17. Овсяченко Н. И., Акопов Д. Н. Лазерное сканирование и мониторинг оползневых склонов // Инженерные изыскания. – 2012. – № 2. – С. 40–45.
18. Кожугулов К. Ч., Нифадьев В. И., Усманов С. Ф. Прогнозирование устойчивости откосов и склонов на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4, № 3. – С. 54–59.

19. Долинов А. Л., Шевченко А. Е. Моделирование оползневых процессов для обеспечения безопасности промышленных объектов // Научные исследования и инновации. – 2013. – Т. 7, № 1–4. – С. 45–52.
20. Маций С. И., Лейер Д. В., Безуглова Е. В. Мониторинг и моделирование оползневых процессов на примере города Сочи // Строительство и архитектура. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 54–61.
21. Свалова В. Б. Оценка и снижение риска оползневых процессов урбанизированных и горнопромышленных территорий // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов. – 2016. – С. 348–355.
22. Авербух Е. Л. и др. Моделирование и визуализация результатов моделирования трансформации оползней вблизи гидротехнических сооружений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 1. – С. 5–9.
23. Немирович-Данченко М. М. Модель гипоупругой хрупкой среды: применение к расчету деформирования и разрушения горных пород // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 2. – С. 107–114.
24. Немирович-Данченко М. М. Модель гипоупругой хрупкой среды и ее применение в сейсмике : автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. – Новосибирск : Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН, 2004. – 32 с.
25. Truesdell C. Hypo-elastic shear // Journal of Applied Physics. – 1956. – Vol. 27, No. 5. – P. 441–447.
26. Павловская О. Г., Хорошилов В. С. Статистические исследования оползневых процессов по результатам геодезических наблюдений // Вестник СГУГиТ. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 15–19.
27. ОДМ 218.2.006–2010. Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог. – М., 2011. – 115 с.
28. Richtmyer R. D., Morton K. W. Difference methods for initial-value problems. – New York : Wiley-Intersci, 1967. – 405 p.
29. Айтматов И. Т., Кожоголов К. Ч., Никольская О. В. Геомеханика оползнеопасных склонов. – Бишкек : Илим, 1999. – 208 с.
30. Ислямова А. А., Немирович-Данченко М. М. Расчет напряженного состояния в теле гравитационного оползня // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 3. – С. 215–220.

Получено 26.11.2020

© А. А. Ислямова, В. С. Хорошилов, 2021

## **SIMULATION OF DISPLACEMENT OF LANDSLIDES ON THE MATERIALS OF GEODESIC OBSERVATIONS AND ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS**

*Alexandra A. Islyamova*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (983)230-19-46, e-mail: shatsaa@mail.ru

*Valery S. Khoroshilov*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)343-29-11, e-mail: khoroshilovvs@mail.ru

The article discusses the possibilities of applying modeling of the stress-strain state of slopes to predict landslide hazard, which is very important for the successful implementation of all subsequent stages of design, construction and operation of engineering structures. The article considers the existing approaches and methods used in the process of solving the problem, and determines the study as the type of mathematical modeling of the stress-strain state of a landslide body by the finite element method. It is shown that the selection of specific mathematical expressions for all subsequent calculations is carried out depending on the specific type

of landslide. The mechanisms of deformation and destruction of the slope under the action of gravitational forces are shown using the data of geodetic observations and engineering-geological surveys. As a result of the studies performed, calculations were made on several models illustrating the behavior of the soil mass of a landslide-prone slope. Stress patterns were obtained for a simple slope with a steepness of 35°, which coincide with the previously published data of the physical experiment for the real open pit slope.

**Keywords:** landslide, geodetic observations, mathematical modeling, stress-strain state, landslide slope, elastic properties

## REFERENCES

1. Baborykin, M. Yu., Zhidilyaeva, E. V., & Pogosyan, A. G. (2015). Identification of hazardous geological processes during engineering-geological surveys on the basis of digital relief models. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 2, 30–36 [in Russian].
2. Matsiy, S. I., & Bezuglova, E. V. (2017). Geotechnical monitoring of transport structures in areas of active development of landslide soil displacements. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Foundations, Foundations and Soil Mechanics]*, 4, 36–40 [in Russian].
3. Simonyan, V. V., & Nikolaeva, G. A. (2017). Comparative analysis of numerical criteria for the effectiveness of methods for assessing hazardous landslide processes. *Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]*, 20, P. 150 [in Russian].
4. Svalova, V. B. (2017). Analysis and assessment of the risk of landslide processes in urbanized territories. *Monitoring. Nauka i tekhnologii [Monitoring. Science and Technology]*, 4, 22–29 [in Russian].
5. Zerkal, O. V., & Fomenko, I. K. (2016). Influence of various factors on the results of probabilistic analysis of activation of landslide processes. *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]*, 1, 16–21 [in Russian].
6. Simonyan, V. V. (2011). *Izuchenie opolznevnykh protsessov geodezicheskimi metodami [Study of landslide processes by geodetic methods]*. Moscow: MGSU Publ., 172 p. [in Russian].
7. Kolesatova, O. S. (2014). Improving the technique of mine surveying observations of deforming areas of the sides of open pits (on the example of the Kamagan deposit). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Information and Analytical Bulletin]*, S2-4, 23–32 [in Russian].
8. Pavlovskaya, O. G., Khoroshilov, V. S., & Noskov, M. F. (2012). Methods for identifying homogeneous landslide zones based on the results of geodetic observations of vertical displacements of sedimentary benchmarks. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5, 31–34 [in Russian].
9. Ovsyuchenko, N. I., & Akopov, D. N. (2012). Laser scanning and monitoring of landslide slopes. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 2, 40–45 [in Russian].
10. Kuzin, A. A., & Sannikova, A. P. (2016). Methodology for assessing landslide hazard in the development of territories on the basis of geoinformation systems based on geodetic data. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 4, 43–50 [in Russian].
11. Baborykin, M. Yu., & Zhidilyaeva, E. V. (2014). Monitoring of landslides using laser scanning and geodetic observations. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 3, 16–24 [in Russian].
12. Simonyan, V. V. (2008). Substantiation of accuracy and development of methods of mathematical and statistical analysis of geodetic observations for displacements of landslides. *Candidate's thesis*. Moscow: State University of Land Management Publ., 182 p. [in Russian].
13. Vasiliev, E. A., Gulyaev, Yu. P., & Pavlovskaya, O. G. (2010). On increasing the efficiency of geodetic studies of the dynamics of landslide slopes. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 9, 6–9 [in Russian].
14. Lazarev, V. M. (2012). Development of an integrated system of geodetic support for geomonitoring of geoeological safety in landslide-prone territories. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 65–72 [in Russian].
15. Konyushkov, V. V. (2017). Engineering protection of territories from slope processes taking into account natural conditions and technogenic impacts. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2, 137–142 [in Russian].
16. Ugnenko, E. B., & Timchenko, O. N. (2010). Analysis of existing methods for studying the stress-strain state of landslide slope rocks. *Avtomobilnyy transport [Automobile Transport]*, 26, 119–122 [in Russian].

17. Ovsyuchenko, N. I., & Akopov, D. N. (2012). Laser scanning and monitoring of landslide slopes. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 2, 40–45 [in Russian].
18. Kozhogulov, K. Ch., Nifadiev, V. I., & Usmanov, S. F. (2017). Predicting the stability of slopes and slopes on the basis of numerical modeling of the stress-strain state of rocks. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk [Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences]*, 4(3), 54–59 [in Russian].
19. Dolinov, A. L., & Shevchenko, A. E. (2013). Modeling landslide processes to ensure the safety of industrial facilities. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii [Scientific Research and Innovations]*, 7(1-4), 45–52 [in Russian].
20. Matsiy, S. I., Leyer, D. V., & Bezuglova, E. V. (2013). Monitoring and modeling of landslide processes on the example of the city of Sochi. *Stroitelstvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 1(1), 54–61 [in Russian].
21. Svalova, V. B. (2016). Assessment and reduction of the risk of landslide processes in urbanized and mining areas. *Ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost gornopromyshlennykh regionov [Ecological and Technosphere Safety of Mining Regions]*, pp. 348–355 [in Russian].
22. Averbukh, E. L., & et al. (2011). Modeling and visualization of the results of modeling the transformation of landslides near hydraulic structures. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii [Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology]*, 1, 5–9 [in Russian].
23. Nemirovich-Danchenko, M. M. (1998). Model of a hypoelastic brittle medium: application to the calculation of deformation and fracture of rocks. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*, 1(2), 107–114 [in Russian].
24. Nemirovich-Danchenko, M. M. (2004). Model of a hypoelastic brittle medium and its application in seismic. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Novosibirsk: Joint Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy SB RAS, 32 p. [in Russian].
25. Truesdell, C. (1956). Hypo-elastic shear. *Journal of Applied Physics*, 27(5), 441–447.
26. Pavlovskaya, O. G., & Khoroshilov, V. S. (2011). Statistical studies of landslide processes based on the results of geodetic observations. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 3(16), 15–19 [in Russian].
27. Industry road guidance document. (2011). ODM 218.2.006-2010. Recommendations for calculating the stability of landslide slopes (slopes) and determining landslide pressures on engineering structures of highways. Moscow, 115 p. [in Russian].
28. Richtmyer, R. D., & Morton, K. W. (1967). *Difference methods for initial-value problems*. New York: Wiley-Intersci, 405 p.
29. Aitmatov, I. T., Kozhogulov, K. Ch., & Nikolskaya, O. V. (1999). *Geomekhanika opolzneopasnykh sklonov [Geomechanics of landslide-prone slopes]*. Bishkek: Ilim Publ., 208 p. [in Russian].
30. Islyamova, A. A., & Nemirovich-Danchenko, M. M. (2017). Calculation of the stress state in the body of a gravitational landslide. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 3. Subsoil Use. Mining Engineering. Directions and Technologies of Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Economy. Geoecology]* (pp. 215–220). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

Received 26.11.2020

© A. A. Islyamova, V. S. Khoroshilov, 2021