

УДК 550.34.013.4:551.435.627
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-209-214

ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСЧЛЕНЕННОМ РЕЛЬЕФЕ

Г.А. Абдурахмонов, А.Е. Воробьев, К.А. Воробьев

Аннотация. Представлена процедура моделирования оползней, возникающих на территориально расчлененном рельефе. Актуальность наличия такой процедуры обусловлена длительной историей возникновения оползней, а также их практически повсеместным распространением (особенно – на нагорных территориях с расчлененным рельефом местности). Современное поведение горных склонов обычно является результатом различных и зачастую сложных гидромеханических факторов, которые зависят от их геометрии, характера, структуры, гранулометрии и гидромеханических свойств грунтов, граничных условий и исходного состояния исследуемого оползневоопасного склона. Многие проблемы устойчивости оползневоопасных горных склонов связаны с их геометрией, анизотропией геоматериалов, нелинейным поведением на месте напряжения, а также наличием нескольких одновременно взаимообусловленных процессов (например, порового давления, сейсмической нагрузки, разжижения геоматериала тела оползня и т. д.).

Ключевые слова: моделирование оползня; факторы; процедура; методики; алгоритмы; этапы.

АЙМАКТЫК ЖАКТАН БӨЛҮНГӨН РЕЛЬЕФТЕ БОЛГОН КӨЧКҮЛӨРДҮ МОДЕЛДӨӨНҮН ТАРТИБИ

Г.А. Абдурахмонов, А.Е. Воробьев, К.А. Воробьев

Аннотация. Бул макалада аймактык бөлүнгөн рельефте пайда болгон жер көчкүлөрдү моделдөөнүн жол-жобосу берилген. Мындай жол – жобонун болушунун актуалдуулугу жер көчкүлөрдүн пайда болушунун узак тарыхы, ошондой эле алардын дээрлик бардык жерде таралышы менен шартталган (өзгөчө-рельефи бөлүнгөн тоолуу аймактарда). Тоо капталдарынын учурдагы жүрүм-туруму, адатта, алардын геометриясына, мүнөзүнө, түзүлүшүнө, гранулометриясына жана топурактардын гидромеханикалык касиеттерине, чек ара шарттарына жана изилденүүчү жер көчкү коркунучунун баштапкы абалына жараша ар кандай жана көп учурда татаал гидромеханикалык факторлордун натыйжасы болуп саналат. Көчкү коркунучу бар тоо капталдарынын туруктуулугунун көптөгөн проблемалары алардын геометриясы, геоматериалдардын анизотропиясы, чыңалуу ордунда сызыктуу эмес жүрүм-туруму, ошондой эле бир эле учурда бир нече өз ара шартташкан процесстердин болушу менен байланышкан (мисалы: көзөнөктүк басым, сейсмикалык жүктөм, жер көчкүнүн денесинин геоматериалын суюлтуу ж.б.).

Түйүндүү сөздөр: жер көчкүнү моделдөө; факторлор; жол-жобосу; методикасы; алгоритмдер; этаптары.

PROCEDURE FOR MODELING LANDSLIDES THAT OCCUR ON TERRITORIAALLY DISSECTED TERRAIN

G.A. Abdurakhmonov, A.E. Vorobyov, K.A. Vorobyov

Abstract. The article presents a procedure for modeling landslides that occur on a territorially dissected terrain. The relevance of such a procedure is due to the long history of landslides, as well as their almost ubiquitous distribution (especially in mountainous areas with dissected terrain). The current behavior of mountain slopes is usually the result of various and often complex hydromechanical factors that depend on their geometry, nature, structure, granulometry and hydromechanical properties of soils, boundary conditions and the initial state of the landslide-prone slope under study. Many problems of stability of landslide-prone mountain slopes are associated with existing difficulties due to their geometry, anisotropy of geomaterials, their nonlinear behavior at the stress site, and as a result of the presence

of several simultaneously interdependent processes (for example, pore pressure, seismic load, liquefaction of the geomaterial of the landslide body, etc.).

Keywords: landslide modeling; factors; procedure; techniques; algorithms; stages.

Введение. Оползни представляют собой довольно сложные явления, сведения о которых известны примерно 2000 лет до нашей эры. Так, геологические данные подтверждают существование колоссального оползня, произошедшего на Желтой реке в Китае, примерно 1900 лет до нашей эры и приведшего к гибели более 100 тыс. человек. А в 373 году до нашей эры город Гелике в Греции был затоплен и разрушен в результате проявления подводного оползня. С момента наиболее раннего научного изучения оползней в 186 г. до н.э. в Китае, их возникновение и развитие было довольно хорошо документировано во всем мире. Например, Нихон Сёки (древняя хроника Японии) описывает многочисленные оползни и разрушения, связанные с землетрясением Хакухо 29 ноября 684 года нашей эры.

Оползни, как правило, представляют собой как региональную, так и локальную проблему. До сих пор оползни остаются одними из основных существующих стихийных бедствий, уносящие во всем мире жизни не менее 4600 человек в год (по другим экспертным оценкам – свыше 14 тыс. человек). Так, в период с 2007 по 2013 г. в 124 странах мира произошел 5741 оползень, в результате чего погибло более 20 500 человек. Кроме того, последствия оползней за последнее столетие оцениваются в сумму, не менее 1,7 млрд долл. США. По данным Министерства земли и ресурсов Китайской Народной Республики (<http://www.mlr.gov.cn/>), в 2015 г. в Китае произошло в общей сложности 8224 оползня. Эти оползни привели к 229 смертям, 58 человек пропали без вести и 138 получили ранения, а прямые экономические потери составили 2,49 млрд долл. США.

Современное состояние проблемы оползней. Поведение горных склонов обычно является результатом различных и зачастую сложных гидромеханических процессов, которые зависят от их геометрии, характера, структуры, гранулометрии и гидромеханических свойств грунтов, граничных условий и исходного состояния исследуемого оползневоопасного склона.

Любое изменение климатических факторов (как правило, интенсивности и продолжительности атмосферных осадков, а также температуры и влажности) значительным образом влияет на содержание воды в геомассе и режим порового давления воды на горном склоне, а следовательно, на величину напряженного состояния, что может привести к разрушению склона и образованию оползня.

При этом, мелкие (неглубокие) оползни, обычно вызванные дождями, затрагивают, как правило, поверхностные отложения небольшой мощности (менее 3–5 м) – они являются весьма распространенным явлением во всем мире.

Территориально оползни имеют четко выраженные тенденции. Так, горные и холмистые районы подвержены различным природным опасностям, включая неустойчивость склонов, представляющих наклонные участки поверхности литосферы, формирующиеся под действием различных рельефообразующих процессов [1]. В глобальном масштабе эти горные районы в настоящее время испытывают сокращение снежного покрова на низких высотах, отступление вверх ледников и деградацию вечной мерзлоты, которые происходят в результате глобального изменения климата Земли. Такие изменения климатических, экологических, метеорологических и геоморфологических условий в значительной степени влияют как на скорость, так и на размер и характеристики оползневых опасностей.

Также необходимо отметить, что оползни, как правило, являются вторичными экзогенными геологическими процессами [1], которые представляют собой движение приповерхностной геосистемы во времени, обусловленное её взаимодействием с внешней средой или между элементами самой литосистемы.

Под механизмом оползневого процесса исследователи понимают последовательность или совокупность промежуточных состояний и элементарных актов взаимодействия отдельных частей будущего оползня и его неподвижного ложа (зеркала скольжения), посредством которых горный склон переходит из одного (неустойчивого) состояния в другое (более устойчивое), и тем самым осуществляется

протекание оползневой процесса – перемещение геомассы. И если на первоначальные механизмы разрушения и перемещения геомассы оползня довольно сильно влияют геология и топография (расчлененный рельеф местности) [1], то затем происходит уже качественная трансформация механизма движения геомассы, обуславливающая существенные изменения её объема и изменения характеристик непосредственного движения.

Высокие скорости перемещения геомассы часто связаны с конститутивной нестабильностью скелета почвы горного склона, которая может вызывать переход её механической реакции от фрикционного типа к вязко жидкостному типу и, следовательно, вызывать оползни потокового типа [2].

Поэтому, одним из ключевых вопросов при исследовании и интерпретации оползней горных склонов, является определение роли минералогического состава и физико-механических свойств геомассы тела оползней, повышенная чувствительность оползневых геоматериалов к набуханию и оползанию, а также их гранулометрический состав.

Получение объективной оценки условий и возможностей возникновения сдвижения геомассы возможно, прежде всего, на основе моделирования характера оползней с учетом всех этих факторов,

Обсуждение полученных результатов. В последние десятилетия было предложено несколько процедур моделирования, служащих для оценки времени разрушения (*ToF*) горного склона и возникновения оползневых явлений [3]. Эти подходы, называемые в дальнейшем методами прогнозирования отказов, анализируют эволюцию происходящей оползневой деформации (рисунок 1) с течением времени (т. е. значение скорости деформации), и основаны на предположении, что в условиях постоянно-го напряжения и приложения нагрузки, оползневые геоматериалы неизбежно следуют механизму ползучести.

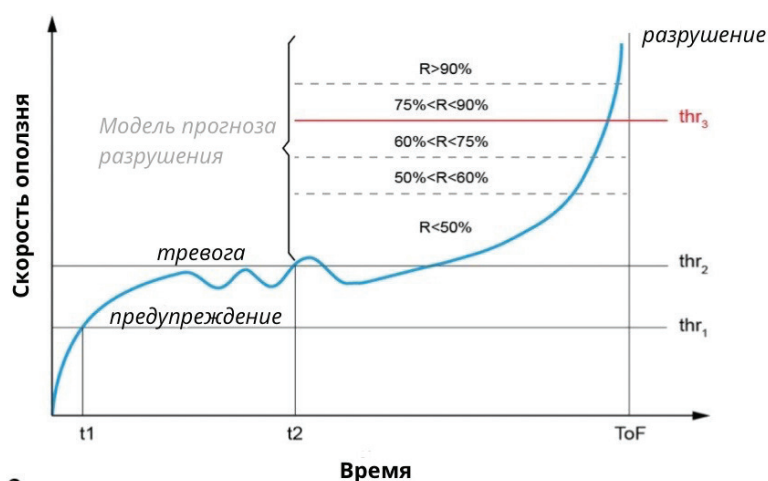


Рисунок 1 – Схематическое изображение изменения во времени скорости оползня перед событием разрушения, с учетом поведения геоматериалов в условиях ползучести

Многие проблемы устойчивости оползневоопасных горных склонов связаны с существующими сложностями, связанными с их геометрией, анизотропией геоматериалов, их нелинейному поведению на месте напряжения, а также вследствие наличия нескольких одновременно взаимообусловленных процессов (например, порового давления, сейсмической нагрузки, разжижения геоматериала тела оползня и т. д.).

Таблица 1 – Характеристика численных методов анализа

Анализ, метод	Критический вклад, параметры	Преимущества	Ограничения
Континуум моделирование (например, качество отдельных элементов)	Геометрия исследуемого склона; факторные критерии (например, упругость, пластика, ползучесть) и т. д.); характеристики грунтовых вод, прочностных свойств геомассы	Допускает деформацию и разрушение геоматериала. Может моделировать сложное поведение и механизмы. Возможность использования 3D моделирования. Может моделировать влияние грунтовых вод и порового давления. Существует возможность оценить влияние изменений параметров на неустойчивость склона. Последние достижения в области компьютерного оборудования позволяют решать сложные модели на ПК. Может включать ползучесть, деформацию. Может включать динамический анализ	Пользователи должны быть хорошо обучены, иметь определенный опыт моделирования. Необходимо учитывать ограничения модели/программного обеспечения (например, граничные аффекты, соотношения сторон сетки, симметрия, ограничения аппаратной памяти и т. д.). Доступность входных данных в целом плохая. Требуемые входные параметры регулярно не измеряются. Существует неспособность моделировать эффекты скальных пород с большим количеством трещин. Довольно сложно выполнить анализ чувствительности из-за ограниченного времени выполнения
Дисконтинуум моделирование (например, дискретный элемент)	Репрезентативный склон и разрыв геометрии; конститутивные критерии; жесткость разрыва и прочность на сдвиг; грунтовые воды, характеристики на месте, стрессовое состояние	Допускает деформацию блоков и их перемещение относительно друг друга. Может моделировать сложное поведение и механизмы (комбинированный материал и поведение при разрывах в сочетании с гидромеханическим и динамическим анализом). Способен оценить влияние изменений параметров на неустойчивость	Пользователь должен соблюдать надлежащую практику моделирования. Общие ограничения, аналогичные перечисленным выше. Необходимо помнить об эффекте масштаба. Необходимо смоделировать репрезентативную геометрию несплошностей (расстояние, постоянство, и т. д.). Ограниченные данные о оползнях
Гибридный/связанный Моделирование	Перечисленные выше параметры для автономной модели	Совмещенные модели конечных элементов, способные моделировать распространение и фрагментацию слоистых сред	Сложные задачи требуют значительного объема памяти ПК. Сравнительно небольшой практический опыт использования. Требуется постоянной калибровки и ограничений

Численное моделирование стало стандартным инструментом изучения и прогнозирования катастроф и событий [4], связанных с оползнями и другими явлениями, описываемыми уравнениями сплошной среды.

Численные методы анализа, используемые для оценки устойчивости горных склонов, можно условно разделить на три основных блока [5]: континуальное, дискретное и гибридное моделирование, имеющих различные достоинства и недостатки (таблица 1).

При этом континуальное моделирование (включающее методы конечных разностей и методов конечных элементов) лучше всего подходит для научного анализа оползневоопасных горных склонов [5], состоящих из массивных неповрежденных горных пород.

Двумерный конечно-разностный метод включает в себя совместное гидромеханическое и динамическое моделирование. При этом двумерные коды континуума предполагают определенные условия плоской деформации, которые часто недопустимы для неоднородных склонов горных пород, как правило, обладающих различной структурой, литологией и топографией.

Методы разрыва рассматривают скальный склон как прерывистую горную массу, исследуя его как совокупность жестких или деформируемых блоков. Научный анализ такого склона включает в себя раскрытие/закрытие разрывов массивов горной породы, а также их скольжение, контролируемое главным образом имеющейся жесткостью на сдвиг.

Методика моделирования оползней [6] базируется на использовании алгоритмов оптимизации, которые можно разделить на детерминированные алгоритмы и стохастические алгоритмы.

Процедура разработки модели оползня включает в себя следующие этапы:

1. Стратегия наблюдения за полевыми явлениями [7]. Численное моделирование оползней начинается с натурных исследований для выявления реальных количественных характеристик оползня и его поведения, изменяющихся в зависимости от климатических факторов, а также геологических, гидрогеологических и геомеханических параметров территории его проявления.

Первоначальным этапом в любом анализе устойчивости оползневоопасных горных склонов должна стать детальная оценка литологии, структуры и гранулометрический состав горной массы.

Почвы и горные породы, входящие в тело оползня, представляют собой геоматериалы с пустотами, которые могут быть заполнены воздухом, водой и другими жидкостями. Таким образом, они являются многофазными геоматериалами, демонстрирующими геомеханическое поведение, определяемое связью между всеми их фазами [8]. Величина порового давления жидкостей, заполняющих пустоты геомассы, играет первостепенную роль в поведении структуры тела оползня, и резкое изменение его значения может вызвать возникновение условий разрушения горного склона, приводящих к возникновению оползней.

2. Построение теоретических моделей с применением физических законов в уравнениях, а также с помощью строгого расчета для создания теоретического обоснования поведения геомассы тела оползня.

3. Если теоретическое поведение формирует геометрию оползня, которая соответствующим образом реагирует на реальные явления (полевые данные), тогда для измерения его параметров целесообразно использовать специальные математические уравнения.

4. Введение в анализ дополнительных факторов (например, наночастиц [9]), без которых не получается объективно объяснить наблюдаемые в некоторых случаях высокие скорости и значительный выбег геомассы оползня.

5. Разработка описания механизма обрушения горного склона со всеми полученными результатами в целом, чтобы получить дальнейшие результаты по смягчению последствий от оползней.

Заключение. Разработана методика моделирования оползней, возникающих на территориально расчлененном рельефе, новым элементом которой является введение такого фактора, как наночастицы, обуславливающие повышенную скорость перемещения и значительный выбег геомассы оползней.

***Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00444, <https://rscf.ru/project/23-27-00444/>, 2023 г. (руководитель – д-р техн. наук, проф. А.Е. Воробьев).**

Поступила: 16.01.2025; рецензирована: 30.01.2025; принята: 31.01.2025.

Литература

1. Буфеев Ф.К. Моделирование оползней скольжения, приуроченных к склонам исторических природно-технических систем, сложенных техногенными грунтами: дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Ф.К. Буфеев. М., 2016. 147 с.
2. Sorbino Giuseppe. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides / Giuseppe Sorbino, Marco Valerio Nicotera // Engineering Geology. 2013. 165. Pp. 105–132.
3. Manconi A. Landslide early warning based on failure forecast models: the example of the Mt. de La Saxe rockslide, northern Italy / A. Manconi and D. Giordan // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. 15. Pp. 1639–1644. DOI:10.5194/nhess-15-1639-2015.
4. Danilov Alexander. A unified approach for computing tsunamis, waves, floods, and landslides / Alexander Danilov, Kirill Nikitin, Maxim Olshanskii, Kirill Terekhov and Yuri Vassilevski // Lecture Notes in Computational Science and Engineering. 2015. 103. Pp. 643–650. DOI:10.1007/978-3-319-10705-9_63.
5. Doug Stead. Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis – applications and limitations / Stead Doug // LANDSLIDES – Causes, Impacts and Countermeasures. Davos, Switzerland, 2001. Pp. 615–624.
6. Воробьев А.Е. Научно-методические основы концепции геомеханического мониторинга / А.Е. Воробьев, А.С. Корниенко // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений // Сб. науч. трудов. Вып. 16. Донецк: «Норд-Пресс», 2010. С. 20–22.
7. Воробьев А.Е. Разработка методов стабилизации оползней на основе выявления и обоснования механизма их движения с участием наночастиц / А.Е. Воробьев, М.З. Мадаева, К.А. Воробьев. М.: Изд-во «Спутник+», 2024. 189 с.
8. Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies. Grant Agreement N 226479. 2011. 73 p.
9. Воробьев А.Е. Наноматериалы и нанотехнологии: особенности протекания физико-химических процессов / А.Е. Воробьев, К.А. Воробьев. Lambert Academic Publishing. Mauritius. 2018. 104 с.