

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

*Кафедра компьютерной физики  
и метаматериалов на базе Саратовского филиала  
Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

**РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ  
УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЯ**

АВТОРЕФЕРАТ  
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ (БАКАЛАВРСКОЙ) РАБОТЫ  
студентки 4 курса 431 группы  
направления 03.03.02 «Физика» физического факультета  
Антиповой Ирины Валерьевны

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

О.А. Черкасова

---

20.05.2020

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Аникин

---

29.05.2020

Саратов 2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** данной работы заключается в том, что оползни являются смертоносным и опасным стихийным бедствием, наносящим ущерб жилым постройкам. От того анализ возможного начала движения и прогнозирование возможных последствий оползня является важным для населения живущего в оползневоопасной зоне. На территории Саратовской области имеется около 30 оползневоопасных зон, одним из которых является древний оползень Смирновского ущелья в районе Областной психиатрической больницы. В данном районе уже происходили оползни в 2002, 2003, 2007 годах и оползневое движение продолжается по сей день.

**Целью** данной работы является исследование устойчивости оползнеопасного участка склона Смирновского ущелья, расположенного напротив Областной психиатрической больницы, а также численное моделирование движения возможного оползня.

В процессе исследования были решены следующие основные **задачи**:

- 1) выполнен анализ отечественного опыта изучения оползневого процесса;
- 2) рассмотрены методы оценки устойчивости склона;
- 3) проведен расчет устойчивости для исследуемого склона;
- 4) проведено численное моделирование движения возможного оползня.

**Объектом исследования** данной работы является оползневой процесс на территории правого борта Смирновского ущелья Лысогорского массива площадью около 213 тыс.м<sup>2</sup>, расположенный в районе Областной психиатрической больницы (ОПБ). Объект расположен в зоне одного из самых древних и активных оползневых участков.

Протяженность исследуемой области вдоль Новоузенской улицы составляет 750м. В данной области имеется существенный перепад высот по всей площади исследуемой территории, который вдоль дороги Новоузенской улицы составляет около 39 метров и до 47 метров от дороги до корпусов ОПБ.

**Структура работы:** введение, глава 1 «Теоретические аспекты оползневых процессов»; глава 2 «Методы оценки устойчивости склонов»; глава 3 « Моделирование оползневого процесса; заключение; список использованных источников, приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Оползневый процесс можно определить как последовательность явлений или состояний оползневого тела, а оползневое явление – как фиксированное состояние оползневого тела. Под «состоянием» понимают структуру и свойства объекта в произвольный момент времени. Тогда явление и есть структура и свойства объекта в данный момент, а процесс есть изменение структуры и свойств объекта.

Причиной возникновения оползня в каком-либо участке склона или откоса является нарушение равновесия пород, вызванное: в результате выветривания (контакт литосферы с атмосферой); воздействием сейсмических толчков (контакт приповерхностной области литосферы с глубинными ее частями); увеличением крутизны склона в результате подмыва водой или ослаблением прочности пород при переувлажнении осадками и подземными водами (контакт литосферы с поверхностной гидросферой). Также причиной возникновения оползней в значительной степени является деятельность человека (антропогенный фактор) (контакт литосферы с техносферой).

Основные причины образования оползней условно можно разделить на три группы:

1) Изменение формы и высоты склона. К этой группе относится подрезка склона, вызванная как антропогенной деятельностью, так и природной, за счет подмыва склона постоянными водными потоками, морской абразией склона.

2) Изменение строения, состояния и свойств пород, слагающих склон. Эта группа объединяет процессы, изменяющие породы, их физико-механические свойства. Она включает в себя физическое и химическое выветривания, увлажнения пород атмосферными и подземными водами, суффозионные и карстовые процессы.

3) Дополнительные нагрузки на склон, такие как сейсмические, гидростатические, искусственные статическое или динамическое воздействие [2, 3].

Динамика оползневых процессов характеризуется определенными закономерностями их развития во времени. При этом следует упомянуть, что некоторые из них образуются быстро, внезапно и носят катастрофический характер, другие – медленно, с затухающей или прогрессирующей скоростью. При анализе каждого конкретного оползня можно восстановить его историю, эволюцию, состоящую из этапов, стадий и фаз.

В динамике формирования каждого оползня можно выделить три этапа:

1) Этап подготовки оползня. При этом, как правило, происходит постепенное уменьшение устойчивости масс горных пород.

2) Этапу фактического образования оползня, как правило, предшествует сравнительно быстрая потеря устойчивости масс горных пород.

3) Этапу существования соответствует стабилизация оползня, а также восстановление устойчивости масс горных пород.

Оползни весьма разнообразны по размерам, строению, причинам образования и условиям, способствующим их возникновению и развитию, механизму, динамике процесса и т.д. На текущий момент имеется много различных подходов к классификации оползневых процессов. Это привело к тому, что в настоящее время нет единой общепризнанной классификации оползней. Только российскими учёными разработано более ста классификаций оползней. Одни из них более детальны, учитывающие несколько характерных признаков, другие менее детальны, построенные на учёте одного или малого числа признаков. Большое число классификаций оползней отражает, с одной стороны, сложность оползневых процессов, а с другой состояние развития науки об оползнях, которое показывает, что накопление фактов продолжается, а соответствующих теоретических обобщений делается пока недостаточно.

В СНГ, наиболее широкой известностью пользуются классификации оползней А.П. Павлова, Ф.П. Саваренского, Н.Н. Маслова, А.М. Дранникова, И.В. Попова, Г.С. Золотарева, В.Л. Ломтадзе, Г.Л. Фисенко, М.К. Рзаевой, К.А. Гулакяна и В.В. Кюнтцеля, Е.П. Емельяновой, Н.Ф. Петрова и др. В странах Западной Европы и США наиболее популярны классификации оползней К. Терцаги, С. Шарпа, Д. Варнеса. В инженерной геологии наиболее широко используется генетическая классификация процессов, разработанная А.И. Шеко.

Для практических целей все известные оползни, образующиеся на естественных склонах, разделены на три группы:

- 1) В однородных связных породах (в глинах, суглинках, лессах, глинистых мергелях и т. п.).
- 2) В связных породах, залегающих в виде пластов с хорошо выраженными поверхностями напластования.
- 3) В связных породах, залегающих в чередовании с пластами и линзами водоносного песка.

Каждая из этих групп объединяет собою несколько видов оползней, отличающихся друг от друга как по структуре оползневых склонов, по характеру оползневых процессов, так и по механизму их развития [1, 2].

В пределах Саратовской области наиболее активными районами развития оползней являются Вольский, Саратовский, Красноармейский и Хвалынский. На сегодняшний день территория области насчитывает порядка 30 выявленных оползней. Из них 19 имеют объем то 1 до 10 тысяч кубометров, 6 – от 10 до 40 тысяч кубометров и один – около 300 тысяч кубометров.

Оползни на территории Саратова расположены преимущественно в области Лысогорского, Соколовогорского и Увекского массивов. На карте оползневой опасности можно выделить две системы оползней. Одну образуют оползни, протянувшиеся цепью вдоль побережья Волги, другую – оползни, развитые по склонам Лысогорского плато и примыкающих к нему возвышенностей. Оползни обеих систем расположены у побережья Волги и замыкают полукольцо приподнятых участков, ограничивающих Приволжскую котловину, где располагается центральная часть города. В районе Увекской и Соколовой гор обе системы пересекаются, образуя «узлы» из разнообразных многочисленных оползней. Широко развиты в пределах города и овражные оползни. Крупные оползни систематически вызывают серьезные разрушения жилых строений и коммуникаций [7].

Основной особенностью оползневых процессов в пределах городских территорий заключается в том, что их активация зачастую вызвана антропогенными факторами. К таким факторам следует отнести неправильное расположение и прорывы водонесущих коммуникаций, бесконтрольное создание запредельной механической нагрузки на потенциально опасные оползневые склоны, воздействие на уже сползшие и зарождающиеся оползневые тела и др.

В настоящее время существует достаточно много различных методов, основанных на предельном равновесии. Это связано со статической неопределенностью задачи. Различия между методами заключаются в том, какие приняты допущения, как производится учет сил действующих на границе сегментов и как задается взаимоотношение между сдвиговыми и нормальными силами, действующими на их границе.

В 1977 году в Саскатчеванском университете Д. Френдлундом была разработана общая формулировка предельного равновесия. Она основывается на системе уравнений для расчёта коэффициента устойчивости, одно из которых удовлетворяет условию равновесия сил, а другое моментов сил.

Методы предельного равновесия основаны на предельной схеме удерживающих и сдвигающих усилий, действующих на склон. Коэффициент устойчивости в этом случае может быть определен как отношение удерживающих моментов к сдвигающим (формула (1)) или как отношение удерживающих сил к сдвигающим (формула (2)):

$$\frac{M_{уд}}{M_{сдв}} = K_y \quad (1)$$

$$\frac{F_{уд}}{F_{сдв}} = K_y \quad (2)$$

Стоит отметить, что методы предельного равновесия основаны на принципе статики, т.е. комбинации моментов, вертикальных и горизонтальных сил. В данных методах ничего не говорится о деформации и смещениях, поэтому они не удовлетворяют вопросам совместности смещений.

Удерживающие и сдвигающие силы в развитии оползневого процесса являются собой положительные и отрицательные обратные связи соответственно. Роль отрицательной обратной связи выполняют удерживающие силы, а положительной – сдвигающие. И задачей прогноза развития оползневого процесса является установление их величины и соотношения [8, 9, 10].

Разработка математической модели конкретного процесса обычно осуществляется по следующим основным этапам:

1) Построение модели (выбор сценария, или механизма, процесса и его описание с применением физических законов, получение и решение уравнений с применением численных или аналитических методов, разработка алгоритма модели в среде программирования).

2) Апробация модели (реализация модели для процессов с заранее известными параметрами, ее верификация и калибровка).

3) Применение модели для прогноза процессов.

Каждая модель может применяться для анализа неограниченного количества геологических процессов с различной степенью точности [5, 11].

В качестве объекта изучения и моделирования оползневого процесса была выбрана территория правого борта Смирновского ущелья Лысогорского массива площадью около 213 тыс.м<sup>2</sup>, расположенная в районе Областной психиатрической больницы (ОПБ). Объект расположен в зоне одного из самых древних и активных оползневых участков.

Протяженность исследуемой области вдоль Новоузенской улицы составляет 750м. В данной области имеется существенный перепад высот по всей площади исследуемой территории, который вдоль дороги Новоузенской улицы составляет около 39 метров и до 47 метров от дороги до корпусов ОПБ.

Для более точного учета рельефа, исследуемая площадь была условно поделена на участки (блоки) шириной 25 метров и протяженностью от 210,38 до 340,57 метров, зависящей от угла склона. Каждый блок был разделен на 4-7 отсеков, в зависимости от количества перепадов угла склона. Внутри каждого отсека угол склона считался постоянным. Таким образом, весь склон был поделен на 30 блоков.

Опасность оползневых движений в данной области заключается в том, что на территории выбранного объекта моделирования расположены одно- и двухэтажные жилые застройки с садами и огородами, небольшие лесные посадки, грунтовые дороги, воздушные газопроводы, гаражи, опоры линии электропередачи. Также на выбранной территории расположена сама ОПБ, представленная малоэтажными застройками корпусов больницы.

Для рассматриваемой области характерны оползни, которые затрагивают только поверхностные слои склона ввиду строения грунта. Поверхностные оползни – это оползни, у которых поверхность смещения (считая по нормали к поверхности склона) находится на глубине менее 1 метра, а также когда мощность оползня сравнительно мала (менее 10%) по сравнению с его шириной. Оползень такого вида ведет себя как твердое тело, а его движение описывается законами гравитации и трения.

В данной работе рассмотрено быстрое движение (смещение) оползня. Смещение происходит в тот момент, когда нарушается устойчивость склона, то есть коэффициент устойчивости становится меньше 1, из чего следует, что силы движения увеличиваются по сравнению с силами сопротивления.

Для данной модели коэффициент устойчивости рассчитывается по упрощенному методу Янбу:

$$K_y = \frac{\sum[(c \cdot \beta + N \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot \operatorname{seca}]}{\sum W \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sum \Delta E} \quad (3)$$

де  $c$  – величина сцепления грунта;  $\beta$  - длина основания отсека;  $N$  – сила реакции опоры отсека;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $\alpha$  - угол наклона основания отсека;  $W$  – вес отсека;  $\Delta E$  – разность горизонтальных удерживающих и сдвигающих горизонтальных сил, действующих на границах отсека.

Метод Н. Янбу считается консервативным, следовательно, занижает устойчивость и может применяться для проверки устойчивости относительно состояния предельного равновесия ( $K_y = 1$ ).

Исходя из данных рельефа местности и размера моделируемого отсека каждого блока, а также состава и плотности грунта рассчитывались  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $W$ ,  $N$ ,  $\varphi$ .

Также для расчета коэффициента устойчивости необходимо рассчитать значения сцепления  $c$ . В рассматриваемой модели поверхность скольжения имеет круглоцилиндрическую форму. Для расчета значений сцепления в данном случае используется формула

$$c = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{1}{F(\alpha, \beta, \varphi, \lambda)} \quad (4)$$

где  $c$  – сцепление;  $\rho$  – плотность оползневых масс;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – высота откоса;  $F(\alpha, \beta, \varphi, \lambda)$  – сила трения.

Причем  $\varphi = 0$ , так как расчет приходится на одно значение сцепления на одной высоте.

Для моделирования и анализа движения оползневого тела необходимо также построить график значений скорости разрушения этого оползневого тела массы  $m$ . Формулу для скорости можно вывести из уравнения сохранения энергетического баланса:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot \Delta h - c \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \quad (5)$$

где  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$  – кинетическая энергия;  $m \cdot g \cdot \Delta h$  – потенциальная энергия;  $c \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha}$  – учет работы силы трения.

В этом уравнении  $\Delta h$  – вертикальная составляющая смещения оползня,  $v$  – скорость (равная нулю при  $\Delta h = 0$ ),  $A$  – площадь контакта. Принимая, что масса  $m$  оползня выражается формулой:

$$m = \rho \cdot A \cdot \delta \quad (6)$$

где  $\delta$  – мощность;  $\rho$  – плотность материала оползня (равная  $1900 \text{ кг/м}^3$  для суглинистых пород).

Получим:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \delta \cdot v^2 = \rho \cdot A \cdot \delta \cdot g \cdot \Delta h - c \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \quad (7)$$

Тогда:

$$v^2 = 2 \cdot \left( g - \frac{c}{\delta \cdot \rho \cdot \sin \alpha} \right) \cdot \Delta h \quad (8)$$

Это уравнение показывает, что при  $\alpha = const$ , возникший оползень продолжает смещаться с нарастающей скоростью. Оползень остановится, когда достигнет более пологого участка поверхности скольжения ( $\Delta h \rightarrow 0 \Rightarrow v \rightarrow 0$ ) [13].

По полученным данным было рассчитано по упрощенному методу Янбу (формула (3)) значение коэффициента устойчивости. Среднее значение для всего склона  $K_y = 1,1023$ . Исходя из полученных данных, можно прийти к выводу, что рассматриваемая область находится в устойчивом состоянии. Однако если на данную область будет оказано внешнее воздействие, нарушающее устойчивость склона, то это приведет к активации оползневого процесса и движению масс вниз по склону.

Анализируя значения величин суммарного перепада высоты, полученных при исследовании рельефа местности для каждого блока, для данной модели был выбран шаг вертикального смещения в 1 метр. В зависимости от этого шага рассчитывались значения скорости разрушения оползневого тела для каждого блока по формуле (8).

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе исследуется участок склона Смирновского ущелья г. Саратова, расположенный напротив Областной психиатрической больницы, параллельно движению ул. Новоузенской площадью 213 тыс. м<sup>2</sup>. Данная территория расположена в зоне одного из самых древних и активных оползневых участков Саратовской области, где уже происходил оползень, относящийся по классификации к оползню скольжения в 2002 г. Тогда оползень сравнительного небольшого объема дошел до ворот больницы, не нанеся серьезного ущерба.

Расчеты коэффициента устойчивости данного участка склона проводились по упрощенному методу Янбу. Модель плоскости скольжения для расчетов принята круглоцилиндрическая. Дополнительно, для вычисления объема, участвующего в оползневом процессе было принято допущение о глубине залегания грунта, вовлекаемого в движение не более 1 метра. Форма оползневого цирка в данной модели выбиралась лодкообразная, с симметричным сужением у поверхности. Средний расчетный коэффициент устойчивости по упрощенному методу Янбу равен 1,1023. Различие коэффициента устойчивости для различных участков склона не более 0,0002.

Скорость возможного оползня рассчитывалась из уравнения сохранения энергетического баланса для каждого исследуемого блока. При этом за начальный момент брался момент отрыва оползневого тела. Исходя из рассчитанных данных график скорости движения оползня имеет криволинейную форму. Постепенный рост, чередуется спадами скорости, которым соответствует падение крутизны участка склона, характеризуемые 3-5 локальными максимумами на графике. Рост прекращается при приближении к

более пологому участку склона (угол склона менее  $5-6^\circ$ ) с последующим резким падением скорости движения оползня. Максимальная скорость оползня для некоторых участков достигает значений 22-23 м/с. Также на исследуемом склоне, имеются области, где на пути возрастания скорости оползня имеются жилые постройки, это участки по правую сторону от ОПБ. На таких участках имеется повышенная опасность разрушения, в случае оползня.

В результате работы а) создана математическая модель для расчёта устойчивости оползневого склона; б) рассчитан коэффициент устойчивости оползневого склона по методу Янбу (среднее значение равно  $1,1023 \pm 0,0002$ ); рассчитано изменение скорости для каждого участка оползневого склона.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Симонян В.В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами / В.В. Симонян. – М.: МГСУ, 2011. – 172 с.
2. Малдыбаев У.А. Исследование факторов активизации оползневых процессов в природных условиях Кыргызстана: магистерская диссертация: 01.03.2017 / НИ ТПУ. – М., 2017. – 162 с.
3. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов / Е.П. Емельянова. – М.: Недра. – 1972. – 310 с.
4. Инженерная геология России: в 2 т./ под ред. В.Т. Трофимов – 2-е изд. исп. – М.: КДУ, 2013. – 815 с.
5. Михайлов В.О. Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов / В.О. Михайлов // Инженерная геология. – 2011. – Вып. №3, –С. 26-33.
6. Зуска А.В. Кинематическая модель оползневых склонов / А.В. Зуска. – Д.: НГУ, 2014. – 140 с.
7. Мингалиева И.И. Современное функциональное использование оползневых территорий в Саратове. Часть 1. Потенциальная оползневая опасность. / И.И. Мингалиева, А.С. Шишнёв // Экология. – 2012. – Вып. №3, –С. 40-46.
8. ОДМ 218.2.006-2010 Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог. – М.: Стандартиформ, 2010. – 116 с.

9. Буфеев Ф.К. Моделирование оползней скольжения, приуроченных к склонам исторических природно-технических систем, сложенных техногенными грунтами: диссертация кандидата геолого-минералогических наук: / МГРИ-РГГРУ. – М., 2017. – 162 с.
10. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг. – М.: КДУ, 2007. – 327 с.
11. Михайлов В.О. Математическое моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней / В.О. Михайлов, С.С. Черноморец. – М.: МГУ, 2011. – 131 с.
12. Мингалиева И.И. Современное функциональное использование оползневых территорий в Саратове. Часть 2. Действующие оползни. / И.И. Мингалиева, А.С. Шишнёв // Экология. – 2012. – Вып. №3, – С. 46-57.
13. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф / А.Е. Шейдеггер. – М.: Недра. – 1981. – 232 с.
14. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 80с.
15. Кузьмин В.В., Тимофеев Е.А., Чуносков Д.В. Оценка риска на территории г. Саратова вследствие проявления оползневых процессов. / В.В. Кузьмин, Е.А. Тимофеев, Д.В. Чуносков // Вестник Саратовского госагроуниверситета. – 2010. – Вып. №2. – С. 23-27.
16. Рогозин И.С. Оползни Саратовского Поволжья. / И.С. Рогозин, Г.В. Дунаева. – М.: АН СССР, 1962. – 163 с.
17. Лотоцкий Г.И. Опасные процессы современного геоморфогенеза в саратовском Поволжье. / Г.И. Лотоцкий, В.Н. Зайонц. // Известия Саратовского университета – 2007. – Вып. №2. – С. 14-16.
18. Данилов В.А. Комплексное применение технологии ГИС и наземного лазерного сканирования для исследования оползневых тел (на примере оползня в Октябрьском ущелье города Саратова). / В.А. Данилов, А.В. Федоров, В.А. Морозова. // Известия Саратовского университета – 2019. – Вып. №3. – С. 160-167.
19. Черноморец С.С., Михайлов В.О. Численное моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней с применением трехмерной дискретной модели / С.С. Черноморец, В.О. Михайлов. // ГеоРиск – 2012. – Вып. №1. – С. 16-28.
20. Емельянова Е.П. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней / Е.П. Емельянова. – М.: Недра, 1971. – 106 с.