

УДК 551.3
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4739
Шифр специальности ВАК: 1.6.1, 1.6.7
Научная статья

Влияние некоторых параметров на устойчивость склона

Н.А. Орлова✉

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, г. Москва

✉iderlit@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется необходимость рассмотрения расположения слабого слоя в массиве и морфометрических показателей, оказывающих основное влияние на устойчивость склона. Подобные исследования проводятся для определения условий, способных активизировать оползневой процесс, понять оползневой механизм – все это является основой для принятия решений по проведению противооползневых мероприятий. **Цель.** Оценить, как при различных углах наклона и толщине слабого слоя будет меняться устойчивость склона, и где вероятнее всего пройдет поверхность скольжения. **Методы.** Путем подбора наиболее опасных круглоцилиндрических поверхностей скольжения для условий плоской задачи установить зависимости толщины и угла наклона слоя в массиве с целью определения коэффициента устойчивости склона. Методом наименьших квадратов найдены линии регрессии. **Результаты и выводы.** Оползни формируются даже при небольшой мощности слабого слоя. При увеличении толщины и угла наклона слабого слоя в массиве создаются наилучшие условия для формирования оползней. Поверхность скольжения при заданной толщине слабого слоя (от 0,5 до 5 м) тяготеет к его середине. При горизонтальном положении слоев и при выходе легко размываемых грунтов у подножья массива склона под действием вышележащих пород происходит раздавливание или сжатие слабого слоя. При наклонном положении слабого слоя от 5° и больше круглоцилиндрическая поверхность тяготеет к его подошве. Формируется секущая наклонные слои поверхность скольжения или оползание грунтов по наслоению. Чем больше толщина слабого слоя, тем более вогнута поверхность скольжения. Выдавливание грунта может наблюдаться при выдвигании оползневых масс к подножью склона после смещения оползневого блока по криволинейной поверхности.

Ключевые слова: оползни, слабый слой, коэффициент устойчивости, линейная регрессия, поверхность скольжения, выдавливание, сжатие

Для цитирования: Орлова Н.А. Влияние некоторых параметров на устойчивость склона // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 29–35. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4739

UDC 551.3
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4739
Scientific paper

Impact of some parameters on slope stability

N.A. Orlova✉

Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russian Federation

✉iderlit@mail.ru

Abstract. Relevance. The necessity to consider a weak layer position in the slope array, its morphometric parameters, which have a major impact on the slope stability. The researches were carried out to determine the conditions that can activate the landslide process and establish a landslide mechanism. The study will make it possible to make a decision on landslide prevention measures. **Aim.** To assess how the slope stability will change at different angles of inclination and the weak layer thickness. **Methods.** Selecting the most dangerous circular cylindrical sliding surfaces for the conditions of a flat problem the author has determined the dependence of the thickness and angle of inclination of the layer in the array. Regression lines were found using the least squares method. **Results and conclusions.** Landslides are formed even at low power of a weak

layer. With an increase in the thickness and inclination angle of the weak layer in the array, there are the best conditions for the formation of landslides. The sliding surface, at a given thickness of a weak layer (from 0.5 to 5 m) tends to its middle. With the horizontal position of the layers, when easily eroded soils exit at the foot of the slope massif, crushing or compression of the weak layer occurs under the action of overlying rocks. When the weak layer is inclined to 5° or more, the circular cylindrical surface tends to the weak layer sole. A sliding surface cutting through the inclined layers or a landslide of soils along the layering is formed. The greater the thickness of the weak layer, the more concave the sliding surface is. Soil extrusion is observed when landslide masses are pushed to the foot of the slope after the landslide block displacement along a curved surface.

Keywords: landslides, weak layer, stability factor, linear regression, sliding surface, extrusion, compression

For citation: Orlova N.A. Impact of some parameters on slope stability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 29–35. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4739

Введение

В зарубежной и российской литературе рассматривается множество случаев, когда угол наклона глинистого слоя, подвергшегося смещению (далее – слабый слой), являлся основной причиной формирования оползней, отмеченных исследователями. Так, в районе Данидина, Новая Зеландия, в 1979 г. сошел крупный оползень, при изучении которого было установлено, что угол падения глинистого слабого слоя составлял 7° [1]. При землетрясении в Японии в 2004 г., в районе Ниигатаке Чуэцу, установлено, что оползень сошел в районе сильно выветрелого (до глин) слабого слоя с углом наклона $5\text{--}9^\circ$ песчаного туфа [2] и др. к поверхности скального основания. Е.П. Емельянова приводит пример оползней [3], сформированных при наклонных поверхностях ослабления в Волгограде, где каспийская терраса сохранилась в виде останцов небольшой ширины, уклон подошвы хвалыньских глин в пределах верхней части оползней достигает $5\text{--}10^\circ$, а местами и 15° . В Норвегии оползни приурочены к наклонным поверхностям кристаллических пород с углами наклона от 3 до 9° , развитие происходит по позднеледниковым отложениям. А.М. Демин [4] приводит примеры различного развития оползней в карьерах при разных углах наклона скального основания.

Несмотря на собранный материал при изучении оползней, анализу подвергались простые испытания на сдвиг, трехосное сжатие, очень немногие исследования сосредоточены на таких параметрах, как ориентация, местоположение и толщина слабого слоя, – факторы, оказывающие влияние на устойчивость склона. Выполненные расчеты известными математическими методами показали, что наличие и геометрия слабого слоя способны определить поверхность скольжения и дать представление о механизме оползневого процесса. В последнее время ведется достаточно много научных споров о механизме развития оползней: некоторые исследователи [5, 6] подвергают сомнению существование оползней выдавливания, установленных ранее [3, 4, 7–9], в зарубежной литературе

подобные оползни относят к сложным оползням [10]. При анализе положения слабого слоя можно выявить изменения, происходящие в нем, с целью уточнения механизма и деформаций в массиве склона, а также решить спор о характере положения поверхности скольжения [3, 5, 6, 11–13].

Устойчивость склонов зависит от различных параметров: рельефа, литологии массива, гидрогеологического и гидрологического режима, свойства грунтов и других [7, 14, 15]. Данные параметры характеризуются множеством неопределенностей, связанных как с неоднородностью толщи, так и с показателями физико-механических свойств. Распознавание механизма глубоких оползней затруднено их огромным разнообразием, но во многих случаях поверхность скольжения тяготеет к слабому слою. Интересным представляется работа [16], в которой проводилась оценка суффозионной опасности для жилого дома в г. Щелково Московской области, который подвергся деформации. Суффозия возникла в месте локального и неровного расположения глин оксфордского яруса юрской системы, подстилающей аллювиальные пески под домом.

Методика исследования

Однородные массивы горных пород в природе встречаются крайне редко, поэтому для разработки теории о влиянии угла наклона залегания слоев на устойчивость склона взяты три слоя с приближенными к известным в природном значении физико-механических свойств. Геологические и гидрогеологические условия массива, карст, подземные горные работы, нагрузка на склоны, трещиноватость, неравномерное залегание пластов и пр. – все это создает благоприятные условия для разрушения массива. Одной из важных и интересных задач является расчет поверхности скольжения, при которой проводится учет контактов слоев, трещиноватости, тектонических нарушений.

Расчеты устойчивости склона и локальной устойчивости его верхней части выполнялись с использованием программ, реализующих функцию

минимизации коэффициента устойчивости, т. е. поиск положения зоны смещения, при котором достигается минимальный коэффициент устойчивости. Программа предназначена для оценки общей и локальной устойчивости природных склонов, откосов или котлованов в условиях сложной геологической ситуации и широко используется как у нас в стране, так и за рубежом [15, 17, 18]. Расчет коэффициента устойчивости выполнялся по методу Г.М. Шахунянца. Применение данного метода расчета для оценки устойчивости склонов регламентируется рядом нормативных документов, в частности [19, 20]. Расчеты выполнялись с помощью программы GeoStab, которая сертифицирована на соответствие нормативным документам [20, 21].

Модель для расчета изменений коэффициента устойчивости строилась для оползневого тела со следующими литологическими слоями: подстилающим известняком, глиной, способной к деформациям (слабый слой), и перекрывающим суглинком. При проведении расчетов менялся угол наклона и толщина глинистого слоя. Для определения влияния угла наклона на устойчивость склона принималась потенциальная поверхность склона, исходя из часто встречающихся углов откоса, при которых, вероятней, всего происходят деформации, – 35° [22]. Физико-механические свойства для жесткого слоя приняты исходя из данных, полученных для каменноугольных известняков НПО «НОЭК» в 2000–2001 гг., угол внутреннего трения – 40° , удельное сцепление – 500 кПа. Для глины (слабого слоя) приняты средние значения, полученные при проведении лабораторных исследований для глины оксфорда, вскрытых на территории г. Москвы в пределах оползневых участков, выполненных лабораторией ИГЭ РАН (для «Геоцентр-Москва») в 2008 г. и «Фундаментпроект» в 2004 г.: угол внутреннего трения – 10° , сцепление – 36 кПа. Для перекрывающих моренных суглинков, взятых в модели, угол внутреннего трения – 35° , сцепление – 42 кПа. Конфигурация склона построена таким образом, что слабый слой имеет выход в подошве склона на поверхность.

Рассматривалось изменение коэффициента устойчивости при изменении угла наклона поверхности жесткого основания и вместе с ним слабого слоя от 0 до 25° . Также толщина слабого слоя была рассмотрена в диапазоне от 0,5 до 5 м. Высота склона принята 25 м. – средняя высота большинства оползневых участков, расположенных на территории г. Москвы из 15 наблюдаемых.

Результаты и обсуждение

В результате выполненных расчетов для углов наклона 0, 5, 10, 15, 20, 25° были получены значения коэффициента устойчивости, отображенные на графиках (рис. 1, 2).

Из графика следует, по мере увеличения угла слабого слоя происходит резкое снижение коэффициента устойчивости, при угле наклона выше 10° значения близки друг другу.

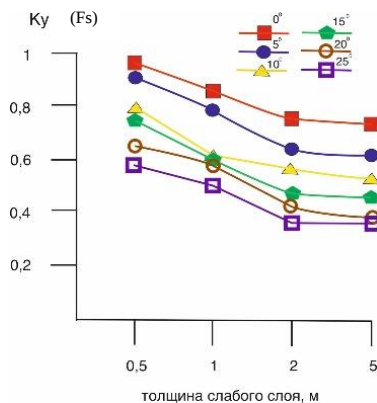


Рис. 1. График зависимости толщины слабого слоя от угла наклона и коэффициент устойчивости (K_y)
Fig. 1. Graph of the dependence of the thickness of the weak layer on the inclination angle and the stability factor (F_s)

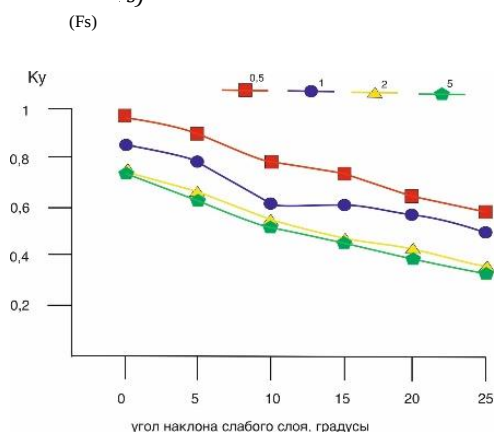


Рис. 2. График зависимости угла наклона слабого слоя от разной толщины и коэффициент устойчивости (K_y)
Fig. 2. Graph of the dependence of the weak layer inclination angle on different thicknesses and the stability factor (F_s)

Графики на рис. 1, 2 показывают различные зависимости угла наклона от толщины слабого слоя и изменение коэффициента устойчивости склона. Становится очевидно, что изменение наклона и толщины слоя приводит к изменению устойчивости. Даже при незначительной толщине склон теряет устойчивость в случае, если угол наклона слабого слоя изменяется. Существует угол излома, продемонстрированный на рис. 1, при котором при толщине 1 м заметно резкое изменение коэффициента устойчивости почти для всех графиков, после которого K_y почти не изменяется.

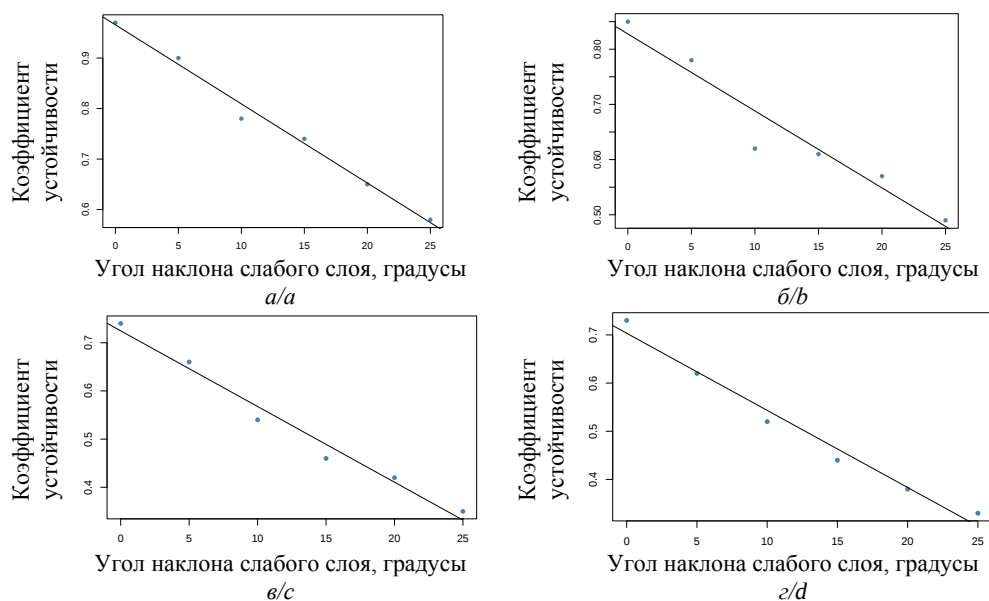


Рис. 3. Расчет линейной регрессии для зависимости K_u от угла наклона для толщины слабого слоя: а) 0,5, б) 1,0, в) 2,0, г) 5,0 м

Fig. 3. Calculation of linear regression for F_s dependence on inclination angle for the weak layer thickness of: а) 0.5, б) 1.0, в) 2.0, г) 5.0 m

На рис. 2 излом произошел при угле наклона 10° и толщине 1 м. Также обращает внимание, что в данной точке углы наклона 10, 15, 20° имеют близкие значения K_u . Наиболее ровные и плавные снижения K_u происходят при толщине слабого слоя от 2 и более метров, таким образом, становится очевидно, что чем толщина слабого слоя больше, тем ближе значения K_u при разных углах наклона друг к другу. При этом поверхность скольжения при наклонном положении слабого слоя от 5° тяготеет к подошве, т. е. к контакту слоев, от 0 до 5° – к середине слоя.

Таким образом, когда $0,5 \text{ м} < d < 2 \text{ м}$, K_u имеет большую скорость снижения. Кроме того, при $d > 2 \text{ м}$ K_u практически не меняется. Скорее всего, при некотором увеличении толщины слабого слоя он становится контролирующим фактором устойчивости, поскольку K_u и сами разрушения имеют зависимость от прочности слабого слоя.

Методом наименьших квадратов были высчитаны полученные результаты. Данный метод можно использовать для нахождения линии регрессии, которая наилучшим образом соответствует набору полученных данных для определения связи угла наклона, толщины слабого слоя и K_u .

В результате получается формула вида $y = a \cdot x + b$, которая даёт приблизительное значение коэффициента устойчивости (y) в зависимости от угла наклона тонкого слоя (x). Ниже представлены формулы, полученные для каждой исследуемой толщины слабого слоя:

- для толщины слабого слоя 0,5 м: $\text{коэф} = 0,9657143 + (-0,0156571) \cdot \alpha$;

- для толщины слабого слоя 1 м: $\text{коэф} = 0,827619 + (-0,013943) \cdot \alpha$;
 - для толщины слабого слоя 2 м: $\text{коэф} = 0,724762 + (-0,015714) \cdot \alpha$;
 - для толщины слабого слоя 5 м: $\text{коэф} = 0,703333 + (-0,016000) \cdot \alpha$,
- где α – угол наклона слабого слоя.

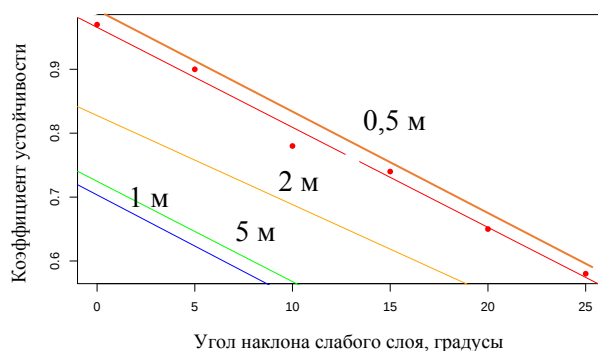


Рис. 4. Зависимость значений K_u от толщины слоя при разных углах наклона

Fig. 4. Dependence of F_s values on the thickness of the layer at different inclination angles

При расчете линейной зависимости установлено, что при толщине слабого слоя от 2 м и выше с увеличением угла наклона происходит последовательное снижение коэффициента устойчивости. Деформации в средней части слабого слоя приводят к раздавливанию слоя, при этом при увеличении толщины выдавливание из-под более прочных перекрыва-

ющих пород происходит в момент скашивания оползневого блока, его смещения вниз по склону. В этом случае происходит сжатие грунта и выдавливание [3, 8, 9, 12, 22], что заметно по валам у подножья склона, получившим распространение в г. Москве, Томске, Симеиз, Нижнем Новгороде, Саратове, Ульяновске и др. С увеличением толщины слабого слоя поверхность скольжения становится более вогнутой, при горизонтальном залегании или незначительном угле наклона (до 5°) слоев она тяготеет к середине слоя, при угле наклона более 5° – к подошве, где она или пересекает наклонные пласты, или происходит скольжение по напластованию. При любом положении слабого слоя вышележащие породы сжимают [22, 23, 24] легко деформируемый слой. Чем больше угол наклона и толщина слоя, тем больше валов выдавливания формирует сжимаемая толща, что подтверждается наблюдениями [4]. При дальнейшем смещении оползня вниз по склону, когда раздавливаемый (или сжимаемый) слой опускается ниже подошвы склона, формируется вал выдавливания у подножья склона, который со временем размывается водами реки или моря.

Заключение

На основании полученных вычислений показано, что оба параметра: угол наклона и толщина слабого слоя, являются важными факторами, влияющими на устойчивость склона. Тем не менее в природе известны случаи, когда при незначительной толщине слабого слоя, например, в известняках, происходит формирование крупных блоковых оползней. При увеличении толщины слабого слоя K_u изменяется от незначительного снижения к резкому возрастанию и обратно к медленному снижению, возможно, этот интервал ускорения может быть изменен с увеличением высоты склона, что требует дополнительных исследований. Выдавливание слабого слоя может происходить только в начальном интервале формирования оползневого тела, в основном наблюдается раздавливание (сжатие) слоя при сохранении залегания вышерасположенных пластов [3, 11, 12, 23, 25]. При значительной мощности толщины слабого слоя образуется все более вогнутая поверхность скольжения, при этом неважно, в какую сторону происходит падение пласта: в сторону плато или вниз по склону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Study on a failed dip slope with a thin sandy layer in 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake / J. Deng, H. Kameya, Y. Miyashita, J. Kuwano, R. Kuwano, J. Koseki // *Engineering Geology*. – 2011. – Vol. 123 (4). – P. 302–314.
2. Hancox G.T. The 1979 Abbotsford Landslide, Dunedin, New Zealand: a retrospective look at its nature and causes // *Landslides*. – 2008. – Vol. 5 (2). – P. 177–188.
3. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. – М.: Недра, 1972. – 308 с.
4. Демин А.М., Шушкина О.И. Напряженное состояние и устойчивость отвалов на карьерах. – М.: Недра, 1979. – 187 с.
5. Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Гвоздева И.П. Оползни проседания как региональная особенность областей развития лессовых пород // *Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии*. – М., 2024. – Вып. 25. – С. 216–220.
6. Кропоткин М.П. Существуют ли оползни выдавливания? // *Инженерная геология*. – 2016. – № 2. – С. 28–41.
7. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на европейской части СССР и его региональный прогноз. – М.: Недра, 1980. – 213 с.
8. Паречкая М.Н. Особенности инженерно-геологических свойств юрских глин и оползни выдавливания Подмосковья // *Тр. ВСЕГИНГЕО*. – 1971. – Вып. 40. – С. 82–87.
9. Тихвинский Д.А. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. – М.: Наука, 1988. – 144 с.
10. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // Turner A.K., Shuster R.L. *Landslides: investigation and mitigation: transportation research board*. – Washington, D.C.: US National Research Council, 1996. – Spec. Rep. No. 247. – P. 36–75.
11. Постоев Г.П. Особенности механизма формирования предельного состояния оползневого массива и смещения оползневого блока // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2019. – № 2. – С. 13–20.
12. Постоев Г.П. Общие закономерности подготовки разрушительных деформаций в грунтовом массиве // *Сборник Сергеевские чтения, геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии*. – М., 2020. – С. 249–254.
13. Brew D.A. Mechanics of a small landslide block, Watener Lizum, Austria // *Bull. Geol. Soc. Of America*. – 1962. – Vol. 73. – № 10. – P. 1277–1280.
14. Калинин Э.В. Оценка степени и дефицита устойчивости оползней // *Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: Труды Международной научной конференции / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева*. – М., 2021. – С. 113–118.
15. Leulalem S., Tarrun K., Matebie M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review // *Landslides*. – 2020. – Vol. 18. DOI: doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0.
16. Земской Г.В. Анализ структуры массива горных пород для оценки суффозионной опасности // *Сборник Сергеевские чтения*. – М.: ГЕОС, 2003. – Вып. 5. – С. 94–98.
17. Cala M., Flisiak J. Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. In *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics // Proc. of the 2nd International FIAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*. – Ecully-Lyon, France, October 2001. – P. 113–114.
18. Dawson E.M., Roth W.H., Slope stability analysis by strength reduction // *Geotechnique*. – 1999. – Vol. 49 (6). – P. 835–840.

19. СП 11-105-97 ч. II Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. – М.: Госстрой России, 2002. – 88 с.
20. СП 116.13330.2016. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. – М.: Минстрой России, 2013. – 62 с.
21. СП 50-101-2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2004. – 138 с.
22. Ислямова А.А., Хорошилов В.С. Моделирование перемещений оползневых склонов по материалам геодезических наблюдений и инженерно-геологических изысканий // Вестник СГУГИТ. – 2021. – № 2. – С. 5–17.
23. Постоев Г.П. Особенности механизма формирования предельного состояния оползневого массива и смещения оползневого блока // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. – № 2. – С. 13–20.
24. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Закон Кулона–Мора и изменение напряженно-деформированного состояния оползнеопасного массива // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 4. – С. 16–25.
25. Landslide mechanism and stability of an open-pit slope: The Manglai open-pit coal mine / Tao Chen, Jisen Shu, Liu Han, S.V. Gerson // Geohazards and Georisk. – 2023. – P. 1–20. DOI: doi.org/10.3389/feart.2022.1038499

Информация об авторе

Надежда Александровна Орлова, младший научный сотрудник, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., 13/2. iderlit@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4882-7990>

Поступила в редакцию: 20.06.2024

Поступила после рецензирования: 10.09.2024

Принята к публикации: 08.04.2025

REFERENCES

1. Deng J., Kameya H., Miyashita Y., Kuwano J., Kuwano R., Koseki J. Study on a failed dip slope with a thin sandy layer in 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake. *Engineering Geology*, 2011, vol. 123 (4), pp. 302–314.
2. Hancox G.T. The 1979 Abbotsford Landslide, Dunedin, New Zealand: a retrospective look at its nature and causes. *Landslides*, 2008, vol. 5 (2), pp. 177–188.
3. Yemelyanova E.P. *Main regularities of landslide process*. Moscow, Nedra Publ., 1972. 308 p. (In Russ.)
4. Demin A.M., Shushkina O.I. *Stress state and stability of dumps in quarries*. Moscow, Nedra Publ., 1979. 187 p. (In Russ.)
5. Barykina O.S., Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Landslides of subsidence as a regional feature of the areas of development of loess rocks. *Collection, Sergeyev readings*, 2024, Iss. 25, pp. 216–220. (In Russ.)
6. Kropotkin M.P. Are there landslides of extrusion? *Engineering geology*, 2016, no. 2, pp. 28–41. (In Russ.)
7. Kyuntsel V.V. *Regularities of the landslide process in the European part of the USSR and its regional forecast*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 213 p. (In Russ.)
8. Paretskaya M.N. *Specifics of engineering geological properties of Jurassic clays and landslides of Moscow region*. Moscow, Work VSEGINGEO, 1971. Iss. 40, pp. 82–87. (In Russ.)
9. Tikhvinsky D.A. *Assessment and forecast of the stability of landslide slopes*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 144 p. (In Russ.)
10. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes. Turner A.K., Shuster R.L. *Landslides: investigation and mitigation: transportation research board*. Washington, D.C., US National Research Council, 1996. Spec. Rep. No. 247, pp. 36–75.
11. Postoev G.P. Features of the mechanism of formation of the limiting state of the landslide array and displacement of the landslide block. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2019, no. 2, pp. 13–20. (In Russ.)
12. Postoev G.P. General patterns of preparation of destructive deformations in a soil massif. *Collection of Sergeyev readings: geoecological aspects of the implementation of the national project "Ecology". The dialogue of generations. Materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Moscow, 2020. Vol. 14, pp. 249–254. (In Russ.)
13. Brew D.A. Mechanics of a small landslide block, Watener Lizum, Austria. *Bull. Geol. Soc. of America*, 1962, vol. 73, no. 10, pp. 1277–1280.
14. Kalinin E.V. Assessment of the degree and deficit of landslide stability. *New ideas and theoretical aspects of engineering geology. Proceedings of the International Scientific Conference*. Eds. V.T. Trofimov, V.A. Korolev. Moscow, 2021. pp. 113–118. (In Russ.)
15. Leulalem S., Tarrun K., Matebie M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. *Landslides*, 2020, vol. 18. DOI: doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0.
16. Zemskoy G.V. Analysis of the rock mass structure to assess the suffusion hazard. *Collection of Sergeyev readings*, 2003, Iss. 5, pp. 94–98. (In Russ.)
17. Cala M., Flisiak J. Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. In *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics. Proc. of the 2nd International FIAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*. Ecully-Lyon, France, October 2001. pp. 113–114.
18. Dawson E.M., Roth W.H., Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique*, 1999, vol. 49 (6), pp. 835–840.
19. СП. 11-105-97. *Engineering geological site investigations for construction*. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2002. 88 p. (In Russ.)
20. СП 116.13330.2016. *Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic principles*. Moscow, Minstroy of Russia Publ., 2013. 62 p. (In Russ.)

21. SP 50-101-2004. *Design and construction of soil bases and foundations for buildings and structures*. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 138 p. (In Russ.)
22. Islyamova A.A., Khoroshilov V.S. Modeling the movements of landslide slopes based on geodetic observations and geotechnical surveys. *Bulletin of SGUGIT*, 2021, no. 2, pp. 5–17. (In Russ.)
23. Postoev G.P. Features of the mechanism of formation of the limiting state of the landslide array and displacement of the landslide block. *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2019, no. 2, pp. 13–20. (In Russ.)
24. Postoev G.P., Kazeev A.I., Kuchukov M.M. Behavior of soils and dissipative geological structures during the formation of a landslide block. *Soil science*, 2022, no 2. (19), pp. 58–64. (In Russ.)
25. Tao Chen, Jisen Shu, Liu Han, Gerson S.V. Landslide mechanism and stability of an open-pit slope: The Manglai open-pit coal mine. *Geohazards and Georisk*, 2023, pp. 1–20. DOI: doi.org/10.3389/feart.2022.1038499

Information about the author

Nadezhda A. Orlova, Junior Research, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, 13/2, Ulansky lane, Moscow, 101000, Russian Federation. iderlit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4882-7990>

Received: 20.06.2024

Revised: 10.09.2024

Accepted: 08.04.2025