



ОБ ОЦЕНКЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

Д.Н. ГОРОБЦОВ^{1,*}, И.К. ФОМЕНКО¹, М.А. НОВГОРОВОДА¹, О.Н. СИРОТКИНА²

¹ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
1, Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании любых противооползневых мероприятий, при строительстве на неустойчивых склонах работы следует начинать с оценки степени их устойчивости. При использовании аналитических (традиционных) методов расчета такая оценка производится путем вычисления коэффициента устойчивости (K_s), который характеризуется отношением сил и/или моментов, удерживающих массив грунта на наклонной поверхности, к силам, сдвигающим этот массив.

Цель. В советской, а затем и российской практике для проектирования противооползневых мероприятий нередко требуется определять величину оползневого давления. Однако с внедрением в практику расчетов устойчивости склонов зарубежных методик и основанного на них программного обеспечения возник вопрос: возможно ли определение оползневого давления на его основе и какие существуют дополнительные подходы для расчетов и обоснования сооружений инженерной защиты на оползневых и оползнеопасных склонах?

Материалы и методы. Основным выводом выполненного исследования является нецелесообразность использования метода Г.М. Шахунянца и недопустимость использования методов предельного равновесия для расчета оползневого давления с целью проектирования сооружений инженерной защиты.

Результаты. Лучшим вариантом для расчета подобных задач является использование расширенного метода предельного равновесия. Однако данный подход в российской практике практически не используется. Как альтернативу можно рекомендовать основанный на методах предельного равновесия анализ дефицита удерживающих сил (в зарубежной терминологии — обратный анализ).

Ключевые слова: расчет устойчивости склонов, оползневое давление, метод Шахунянца, методы предельного равновесия, метод конечных элементов, расширенный метод предельного равновесия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарности: кафедра инженерной геологии МГРИ является участником Академического пакета Rscscience.

Для цитирования: Горобцов Д.Н., Фоменко И.К., Новгородова М.А., Сироткина О.Н. Об оценке оползневых давлений при расчетах устойчивости склонов. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(3):74—84. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-3-74-84>

Статья поступила в редакцию 07.03.2021

Принята к публикации 05.08.2022

Опубликована 17.10.2022

* Автор, ответственный за переписку

ESTIMATION OF LANDSLIDE PRESSURES IN SLOPE STABILITY CALCULATIONS

DENIS N. GOROBTSOV^{1,*}, IGOR K. FOMENKO¹, MARGARITA A. NOVGORODOVA¹, OLGA N. SIROTKINA²

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia*

ABSTRACT

Background. When developing anti-landslide measures during construction on unstable slopes, an assessment of the degree of their stability should be carried out first. When using analytical (conventional) [19] calculation methods, such an assessment is conducted by calculating the stability coefficient (K_s), which is characterised by the ratio of forces and/or moments holding the soil mass on an inclined surface to the forces shearing this mass.

Aim. Within the framework of Soviet and, further, Russian practice, anti-landslide measures are commonly developed based on determination of the magnitude of landslide pressures. However, with the introduction of foreign methodological approaches and respective software applications into the practice of slope stability calculations, the question arises whether these applications can be used for determining landslide pressures and what additional approaches exist for calculating and justifying engineering protection structures on landslide and landslide-prone slopes.

Materials and methods. The main conclusion of the study is the inexpediency of using the method proposed by G.M. Shakhunyants and the inadmissibility of using limit equilibrium methods to calculate landslide pressures when designing engineering protection structures.

Results. The best option for calculating such tasks is to use an extended method of marginal equilibrium. However, this approach is practically not used in Russian practice. Alternatively, we can recommend an analysis of the deficit of retaining forces based on the methods of marginal equilibrium (referred to as reverse analysis in foreign terminology).

Keywords: calculation of slope stability, landslide pressure, Shakhunyants method, ultimate equilibrium methods, finite element method, extended limit equilibrium method

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

Acknowledgments: The Department of Engineering Geology of the Moscow State Research Institute is a member of the Rocscience Academic Bungle.

For citation: Gorobtsov D.N., Fomenko I.K., Novgorodova M.A., Sirotkina O.N. Estimation of landslide pressures in slope stability calculations. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(3):74—84. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-3-74-84>

Manuscript received 07 March 2021

Accepted 05 August 2022

Published 17 October 2022

* Corresponding author

Активное освоение оползнеопасных территорий для строительства промышленных и гражданских зданий и сооружений предполагает проведение инженерных мероприятий, направленных на обеспечение их устойчивости. Разнообразие, сложность и многофакторность оползневой процесса делают

задачу разработки и внедрения передовых методик инженерной защиты архиважной. При проектировании любых противооползневых мероприятий, при строительстве на неустойчивых склонах работы следует начинать с оценки степени их устойчивости. При использовании аналитических

(традиционных) [15, 19, 20] методов расчета такая оценка производится путем вычисления коэффициента устойчивости (K_y), который характеризуется отношением сил и/или моментов, удерживающих массив грунта, к силам и/или моментам, сдвигающим этот массив. В советской, а затем и российской практике для проектирования противооползневых мероприятий нередко требуется определять величину оползневого давления. Однако с внедрением в практику расчетов устойчивости склонов зарубежных методик и основанного на них программного обеспечения возник вопрос: возможно ли определение оползневого давления на их основе и какие существуют дополнительные подходы для расчетов и обоснования сооружений инженерной защиты на оползневых и оползнеопасных склонах?

Целью данного исследования являлось рассмотрение существующих методик оценки оползневых давлений и их сравнительный анализ.

Объекты и методы

1.1. Объект исследования

Сахалинскую область по количеству проявления оползневых процессов следует отнести к одному из наиболее проблемных регионов России. В настоящий момент изучение оползневых процессов на Сахалине происходит в связи с необходимостью безопасной эксплуатации нефте- и газопроводов [1, 4]. В частности, значительная часть трассы трубопроводной системы «Сахалин-2», расположенная в Макаровском районе Сахалинской области, поражена оползневыми процессами.

Изучаемый объект расположен на западном склоне водораздельного гребня, подмываемом правым притоком р. Лазовая. Наибольшая крутизна наблюдается на оползневых уступах склона и достигает 30° . Уступы чередуются с выровненными горизонтальными площадками. Склон сложен элювиально-делювиальными отложениями мощностью от 1,5 до 3 м, которые перекрывают аргиллитоподобные глины верхней подсвиты быковской свиты (K_{bk}^2) [18]. В обнажениях и оползневых бровках срыва аргиллитоподобные глины выветрены до дресвяно-щебенистого материала в глинистом заполнителе. В зоне взаимодействия с пластово-поровыми водами мезозойских пород, приуроченных к зонам ослабления, они преобразуются в голубовато-серые глины мягкопластичной консистенции, которые слагают основной деформируемый горизонт оползневых тел, развитых на участке.

Оползневые явления на участке исследований представлены блоковыми оползнями мощностью до 15 м. захватывающими, как правило, весь склон.

По морфологии оползневого тела — это циркуобразные либо фронтальные, вытянутые вдоль склона, с четко выраженными бровками срыва и оползневыми ступенями.

Боковая эрозия в русле притока р. Лазовая значительно увеличивает интенсивность оползневого процесса. При подмыве нижних частей склонов развитие оползней носит регрессивный характер, и, зародившись в подножии склонов, такие оползни со временем могут достигать гребней водораздела.

1.2. Методы исследования

Большинство из существующих методов расчета оползней было разработано для вычисления коэффициента устойчивости склона. Затем эти расчеты преобразовывались для определения так называемого оползневого давления, т.е. давления, передающегося от неустойчивых грунтовых масс оползневого склона. При этом для проектирования противооползневых удерживающих конструкций разработаны способы построения эпюры оползневого давления по протяженности оползня [12].

Из всех существующих в настоящее время методов расчета рассмотрим: аналитический метод Г.М. Шахунянца [23], методы предельного равновесия [6] и расширенный метод предельного равновесия [6].

Метод Г.М. Шахунянца представляет наибольший интерес из всех подходов к расчету устойчивости склонов, относящихся группе методов [15, 19, 20], основанных на сложении сил, действующих на границе отсеков. Это связано со следующими причинами: он является наиболее строгим, так как в нем удовлетворяется условие предельного равновесия для всего оползневого блока; он чрезвычайно популярен в отечественной практике расчетов устойчивости; расчет оползневых давлений составляет суть данного метода. В классической постановке при расчетах оползневого давления положение наиболее опасной поверхности скольжения принимается уже установленным.

При расчетах устойчивости склона или оползневого давления в рассматриваемом методе сползающий грунтовый блок членится вертикальными линиями на ряд сегментов. Обычно сегменты принимаются такими, чтобы без потери точности можно было в их пределах принимать поверхность за плоскость, а сдвиговые характеристики грунтов

в пределах каждого сегмента по его основанию были одинаковы.

Подробный алгоритм расчета приведен в работах [13, 16, 24].

На рисунке 1 показана расчетная схема с разделением массива на отдельные блоки.

Коэффициент устойчивости всего оползневого блока, рассчитанный по методу Шахунянца, составил 1,13.

1.3. Методы предельного равновесия

В отечественной практике расчетов устойчивости склонов существует ошибочное мнение [9, 10, 14], что на основе методов предельного равновесия возможно определить оползневое давление. Интересно отметить, что разработчики методов предельного равновесия вполне понимали нереалистичность расчетных значений сил, действующих на границе сегментов. Моргенштейн и Прайс (1978) [8] писали, что одно из применений «...коэффициента устойчивости заключается в измерении среднего напряжения при сдвиге, мобилизованного в склоне». Далее

они утверждали: «Это напряжение нельзя путать с фактически давлением». К сожалению, иногда, по мере внедрения методов в практику, эти основные моменты забывают.

Все методы предельного равновесия требуют итеративных техник для определения K_y . Они обязательно должны отвечать двум критериям, а именно:

- многоугольник сил в каждом сегменте должен быть замкнут (для соблюдения условия равновесия);
- коэффициент устойчивости склона равен K_y в каждом из сегментов потенциального оползневого тела.

Вышесказанное значит, что силы, действующие на границе сегментов, представляют не фактические силы, из которых складывается оползневое давление, они в процессе расчета перераспределяются таким образом, чтобы удовлетворять описанным выше критериям, обеспечивающим выполнение условия предельного равновесия. Достаточно просто можно убедиться, что метод Г.М. Шахунянца этим критериям не удовлетворяет.

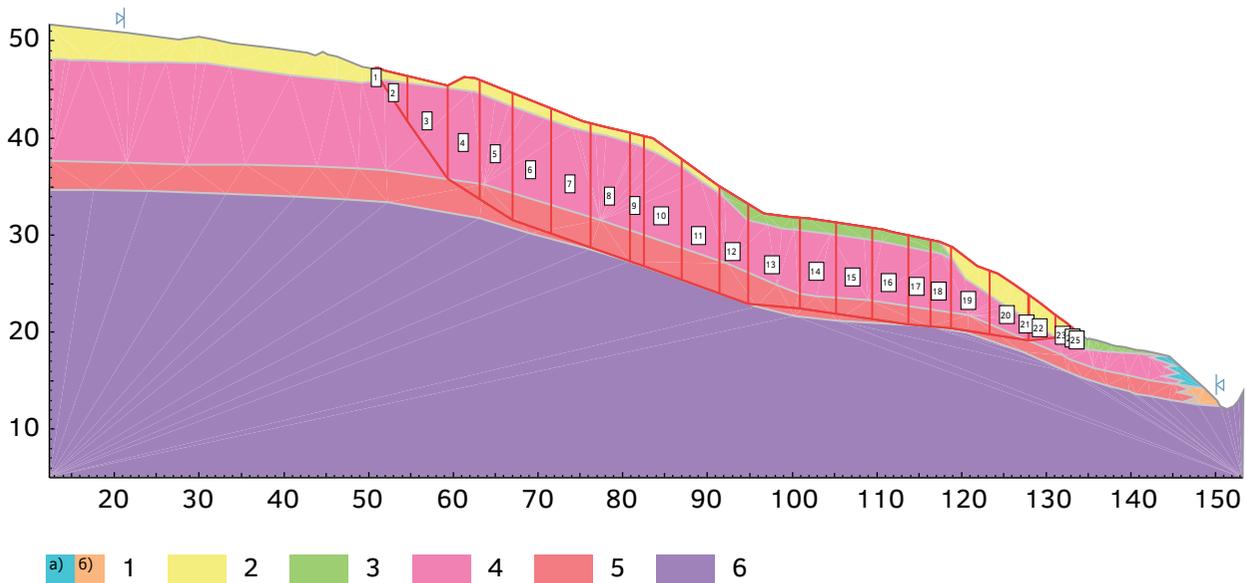


Рис. 1. Разделение рассматриваемого массива на расчетные блоки. 1 — аллювиальные отложения: а — голоценовые, б — палеоплейстоценовые; 2 — элювиально-делювиальные грунты (глина легкая тугопластичная); 3 — элювиально-делювиальные грунты (глина легкая твердая); 4 — переработанные до глин аргиллиты терригенной формации верхней подсвиты быковской свиты (глина легкая твердая); 5 — переработанные до глин аргиллиты терригенной формации верхней подсвиты быковской свиты (глина легкая текучепластичная); 6 — аргиллиты терригенной формации верхней подсвиты быковской свиты (аргиллит очень низкой прочности)

Fig. 1. Division of the considered array into calculated blocks. 1 — alluvial deposits: a — Holocene, b — Paleopleistocene; 2 — eluvial-deluvial soils (plastic clay); 3 — eluvial-deluvial soils (bass); 4, mudstones of the terrigenous formation of the upper subformation of the Bykovo Formation, processed to clays (bass); 5, mudstones of the terrigenous formation of the upper subformation of the Bykovo Formation, processed to clays (fluidplastic clay); 6 — mudstones of the terrigenous formation of the upper subformation of the Bykovo Formation (mudstone of very low strength)

Таким образом, применение методов предельного равновесия недопустимо для определения оползневого давления. Достаточно очевидно, что определение коэффициента устойчивости недостаточно для проектирования противооползневых сооружений (один и тот же K_y могут иметь и оползень-оплывина размером несколько кубических метров, и грандиозный оползень объемом в кубический километр). Означает ли это, что результаты, полученные на основе методов предельного равновесия, бесполезны для проектирования инженерной защиты? Ответ на поставленный вопрос — нет, не означает! Для разработки противооползневых мероприятий и оценки величины сдвигающей силы, которую надо компенсировать для обеспечения устойчивости склона с заданным K_y , в методах предельного равновесия применяется анализ дефицита удерживающих сил или, в зарубежной терминологии, — обратный анализ (данный подход не следует путать с термином «обратный анализ» в российской практике расчетов устойчивости склонов).

Обратный анализ использует уравнения предельного равновесия. Однако, вместо того чтобы рассчитывать коэффициент устойчивости (величина K_y задается заранее), определяется сила, необходимая для достижения указанного коэффициента устойчивости. На первом этапе для каждой потенциальной поверхности скольжения с K_y меньшим заданного уровня определяется величина удерживающей силы, необходимая для достижения заданного коэффициента устойчивости. На втором этапе определяется поверхность скольжения, для которой требуется максимальная

удерживающая сила. Определение положения такой поверхности скольжения и величины максимальной удерживающей силы являются результатами обратного анализа, которые могут быть использованы для проектирования противооползневых сооружений.

На рисунке 2 приведен результат обратного анализа для исследуемого склона, выполненный методом Ямбу [5]. Анализ выполненного расчета показывает, что рассчитанный K_y склона — 1,1. Для достижения заданного $K_y = 1,2$ необходимо увеличить удерживающие силы на 412 кН.

Коэффициент устойчивости всего оползневого блока, рассчитанный по методу Ямбу, составил 1,10.

1.4. Расширенный метод предельного равновесия [6]

Методы предельного равновесия основаны на принципе статики, т.е. комбинации моментов, вертикальных и горизонтальных сил. Однако они имеют ряд существенных недостатков, главными из которых являются следующие:

- методы предельного равновесия статически не определены и для решения системы уравнений требуются дополнительные допущения [22];
- они не удовлетворяют критерию неразрывности напряжений и деформаций [15].

Существенным фактором, влияющим на развитие оползней, является напряженно-деформированное состояние склона [9, 11, 15, 17, 21]. В настоящее время существуют две группы методов, которые используют результаты конечно-элементного анализа для определения

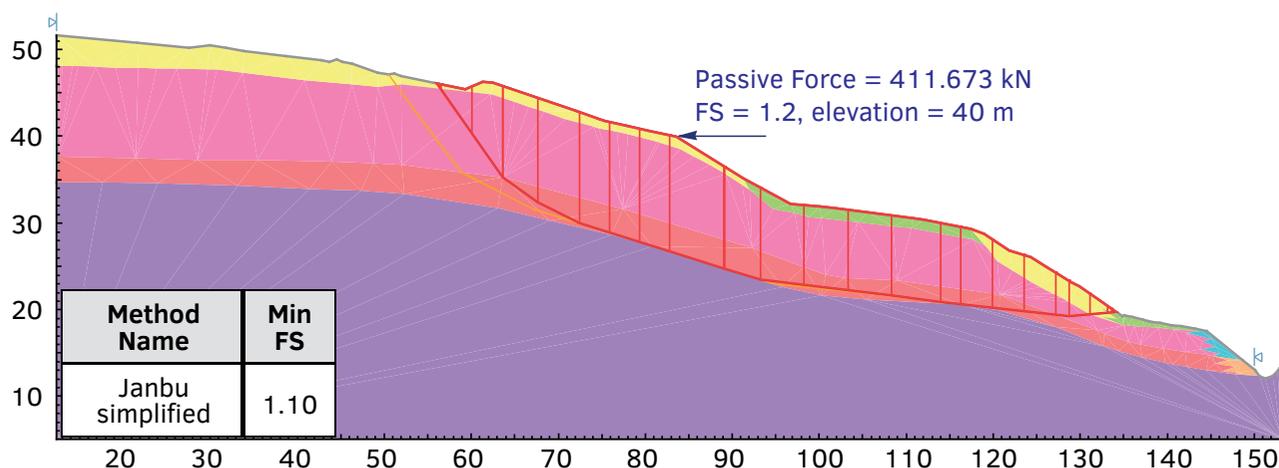


Рис. 2. Расчет устойчивости и обратный анализ (на заданный $K_u = 1.2$) методом Ямбу. Условные обозначения см. на рисунке 1

Fig. 2. Calculation of stability and reverse analysis (for a given $K_u = 1.2$) by the Janbu method

напряженно-деформированного состояния с последующим расчетом коэффициента устойчивости склонов. К первой группе относится расширенный метод предельного равновесия [7]. В нем на основе линейного упругого анализа осуществляется расчет напряженного состояния склона. Ко второй группе относится упруго-пластичный анализ снижения прочности (Strength Reduction method) [3]. Следует заметить, что оба метода (как на основе упругой модели, так и на основе упруго-пластичной модели) дают близкие результаты [2]. В данном исследовании был использован расширенный метод предельного равновесия.

В 1969 г. Kulhawy сформулировал подход, позволяющий объединить методы предельного анализа и метод конечных элементов, и назвал его «Расширенный метод предельного равновесия». Процедура анализа следующая:

На первом этапе, необходимо определить распределение напряжений в склоне методом конечных элементов.

На втором этапе значения напряжений, рассчитанные методом конечных элементов, импортируются в традиционный расчет по методу предельного равновесия. Напряжения σ_x , σ_y и τ_{xy} известны для каждого узла конечно-элементной сетки, с помощью этой информации можно просчитать значения силы сдвига в средней точке основания для каждого сегмента. Принципиальная схема представлена на рисунке 3.

Коэффициент устойчивости рассчитывается по следующей формуле [7]:

$$K_y = \Sigma Sr / \Sigma Sm,$$

где Sr — прочность грунтов на сдвиг; Sm — мобилизованная сдвигающая сила.

Наиболее существенным преимуществом расширенного метода предельного равновесия в сравнении с традиционными [11, 15, 19] методами расчета является тот факт, что он является статически определенным и не нуждается в каких-либо дополнительных допущениях. Следствием этого является тот факт, что, в отличие от методов предельного равновесия, K_y в сегментах, на которые разбито потенциальное оползневое тело, не является постоянной величиной, что, в свою очередь делает возможным построение эпюры оползневых давлений вдоль поверхности скольжения.

На рисунке 4 приведены результаты расчета устойчивости исследуемого склона расширенным методом предельного равновесия.

Коэффициент устойчивости всего оползневого блока, рассчитанный по расширенному методу предельного равновесия, — 1,08, что достаточно хорошо согласуется с результатом, полученным методами Ямбу (K_y — 1,1) и Шахунянца (K_y — 1,13).

Результаты и обсуждение

Целью данного исследования являлось рассмотрение существующих методик оценки оползневых

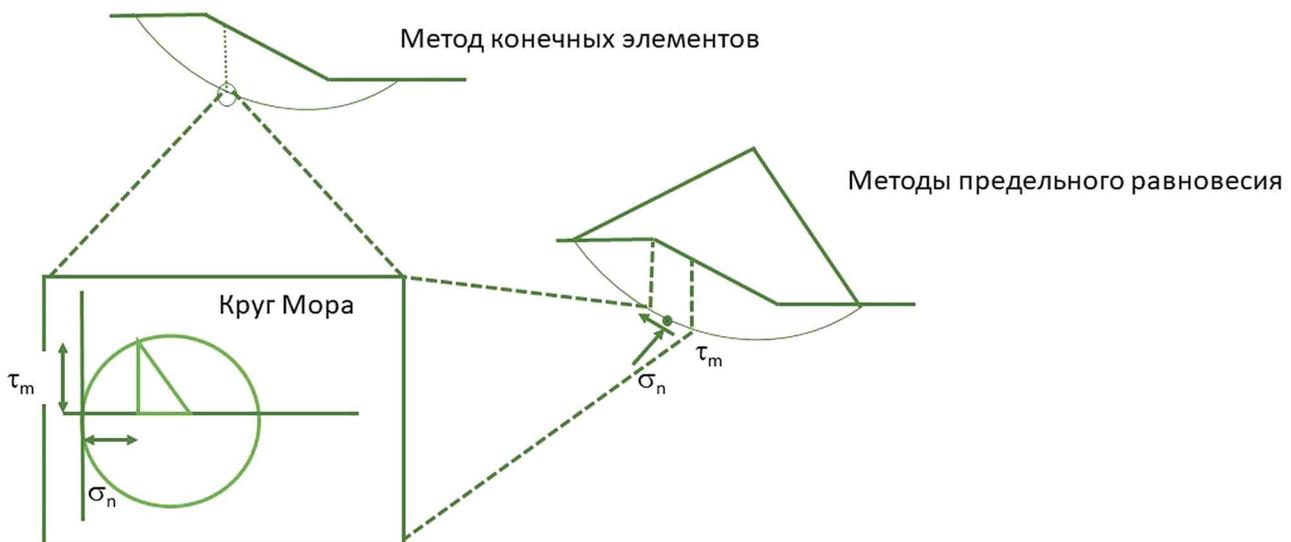


Рис. 3. Принципиальная схема метода Kulhawy. Напряжения «импортируются» из анализа методом конечных элементов в метод предельного равновесия

Fig. 3. Schematic diagram of the Kulhawy method. Stresses are “imported” from finite element analysis to the limit equilibrium method

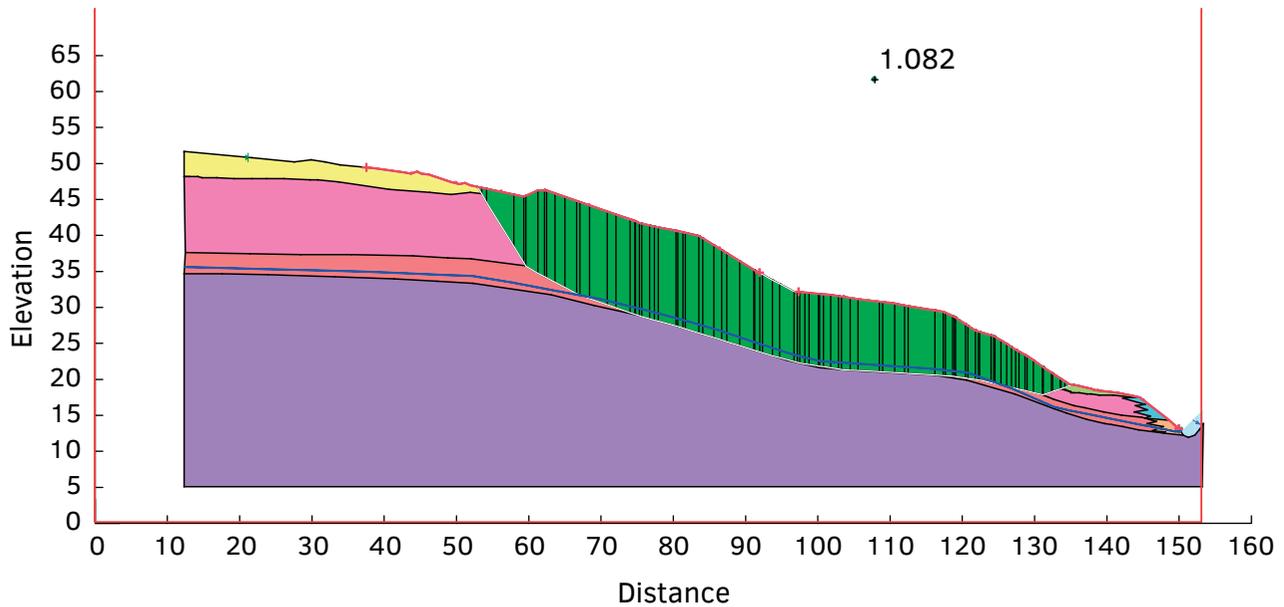


Рис. 4. Результат расчета устойчивости расширенным методом предельного равновесия. Условные обозначения см. на рисунке 1

Fig. 4. The result of stability calculation by the extended limit equilibrium method

давлений и их сравнительный анализ. По этой причине наибольший интерес представляет сравнение данных по оползневым давлениям, полученных расширенным методом предельного равновесия и методом Шахунянца. Графики распределения

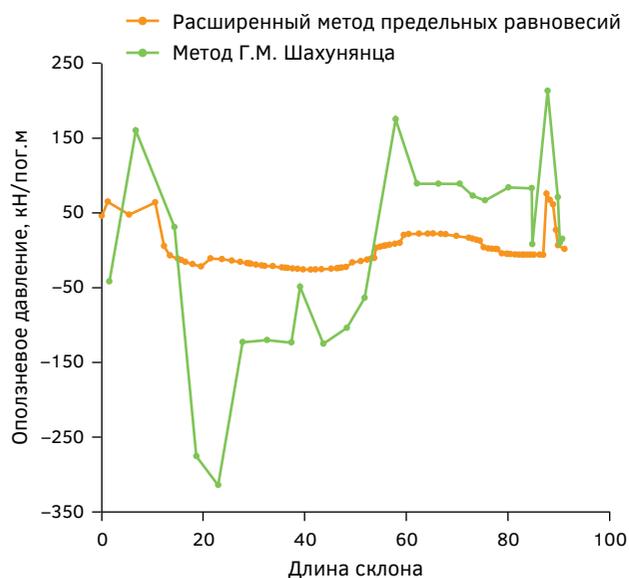


Рис. 5. График распределения оползневое давления вдоль поверхности скольжения

Fig. 5. Graph of the distribution of landslide pressure along the sliding surface

оползневого давления вдоль поверхности скольжения, полученные данными методами, приведены на рисунке 5.

Анализ графиков оползневое давления показывает, что общая тенденция изменения оползневое давления вдоль поверхности скольжения в обоих методах достаточно близкая. Так же хорошо согласуются устойчивые и неустойчивые части потенциального оползневое тела. Однако абсолютные величины оползневое давления имеют большой разброс, при этом метод Г.М. Шахунянца дает, как правило, существенно завышенные значения. В таблице 1 приведено различие, рассчитанное в процентах от среднего между критическими точками, полученными методом Г.М. Шахунянца и расширенным методом предельного равновесия. Из таблицы видно, что различие может достигать 185%.

Заключение

На сегодняшний день в российской практике оценки устойчивости склонов наиболее распространенными подходами для расчета оползневое давления, рекомендованными к использованию [12, 14, 16], являются метод Г.М. Шахунянца и методы предельного равновесия. Основным выводом выполненного исследования является нецелесообразность использования метода Г.М. Шахунянца и недопустимость использования методов

Таблица 1. Различие в оползневых давлениях, полученных методом Г.М. Шахунянца и расширенным методом предельного равновесия

Table 1. The difference in landslide pressures obtained by the method of G.M. Shakhunyants and the extended method of limit equilibrium

Точки	Метод Шахунянца	Расширенный метод предельных равновесий	Различие в %
1	-42	65	43
2	160	64	86
3	31	-15	70
4	-275	-18	175
5	-314	-12	185
6	-120	-15	156
7	-48	-25	63
8	-63	-12	136
9	175	10	178
10	84	-5	178
11	7	-6	15
12	213	75	96
13	9	1	160

предельного равновесия для расчета оползневого давления с целью проектирования сооружений инженерной защиты.

Лучшим вариантом для расчета подобных задач является использование расширенного метода предельного равновесия. Однако данный

подход в российской практике практически не используется. Как альтернативу можно рекомендовать основанный на методах предельного равновесия анализ дефицита удерживающих сил (в зарубежной терминологии — обратный анализ).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fomenko I.K., Gorobtsov D.N., Pendin V.V., Nikulina M.E.* The reasons of landslides activation at sakhalin island (on the example of landslide exploration at the river lazovaya). In Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. 2018. Vol. 1. P. 797—803.
2. *Fredlund D.G., Fredlund M.D.* Keynote Lecture: Developments in Landslide Analysis // In: Duc Long P., Dung N. (eds) Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol 62. Pp. 47—54. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_101
3. *Griffith D.V., Lane P.A.* Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique. 1999. Vol. 49. No. 3. P. 387—403.
4. *Hearn G., Wise D., Hart Andrew B., O'Donnell N.* Assessing the potential for future first-time slope failures to impact the oil and gas pipeline corridor through the Makarov Mountains, Sakhalin Island, Russia // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2012. Vol. 45. No. 1. P. 79—88.
5. *Janbu N.* Application of composite slip surface for stability analysis//Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. Stockholm, Sweden. Balkema, Rotterdam. 1954. P. 43—49.
6. *Krahn J.* Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1. Calgary, Alberta: GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.
7. *Kulhawy F.* Finite element analysis of the behavior of embankments. Ph.D., thesis, University of California, Berkeley, 1969.
8. *Morgenstern N.R., Price V.E.* The analysis of the stability of general slip surface // Geotechnique. 1965. Vol. 15. P. 70—93.
9. *Бабаханов Б.С.* Определение величины оползневого давления на основе анализа напряженного состояния грунтового массива: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.02. Волгоград, 2013. 175 с.
10. Расчет устойчивости откосов и проектирование противооползневых сооружений / А.Н. Богомолов, С.В. Кузнецова, В.Н. Синяков, М.А. Шубин, В.П. Дыба, Г.М. Скибин, Ю.И. Олянский, О.А. Богомолова, А.Н. Ушаков // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2012. Вып. 8 (24), с. 1—21. Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.

11. Богомолов А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь: Изд-во ППИ, 1996. 150 с.
12. Гинзбург Л.К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1986. 134 с.
13. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. М., 1979.
14. ОДМ 218.2.006-2010. Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог. <http://gostrf.com/normadata/1/4293807/4293807223.pdf>
15. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
16. Предложения по расчету устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок. М., 1966.
17. Саинов М.П. Влияние напряженного состояния склона из однородного грунта на его устойчивость // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 111—116.
18. Сергеев К.Ф. Новые данные о характере взаимоотношений толщ позднемезозойских и кайнозойских отложений восточных склонов Западно-Сахалинских гор (Макаровский район, о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 1984. № 1. С. 99—103.
19. Сироткина О.Н., Фоменко И.К., Горобцов Д.Н. О классификации математических методов оценки локальной оползневой опасности // Сб. научн. тр. по мат-лам II междунар. научн. конф. «НАУКА РОССИИ: ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ». Т. 2. НИЦ Л-Журнал Екатеринбург, 2017. С. 50—55.
20. Фоменко И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 44—53.
21. Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Комплексная методика расчета устойчивости склонов // Сб. научн. тр. по мат-лам междунар. науч.-практич. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований». 2011. Т. 31. С. 88—96.
22. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов. М.: Стройиздат, 1988. 240 с.
23. Шахуняц Г.М. Земляное полотно железных дорог. М., Трансжелдориздат, 1953.
24. Шахуняц Г.М. Земляное полотно железных дорог: Вопросы проектирования и расчета: Учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта М.: Трансжелдориздат, 1953. 828 с.

REFERENCES

1. Fomenko I.K., Gorobtsov D.N., Pendin V.V., Nikulina M.E. The reasons of landslides activation at sakhalin island (on the example of landslide exploration at the river lazovaya). In Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. 2018. Vol. 1. P. 797—803.
2. Fredlund D.G., Fredlund M.D. Keynote Lecture: Developments in Landslide Analysis // In: Duc Long P., Dung N. (eds) Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol 62. Pp. 47—54. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_101
3. Griffith D.V., Lane P.A. Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique. 1999. Vol. 49. No. 3. P. 387—403.
4. Hearn G., Wise D., Hart Andrew B., O'Donnell N. Assessing the potential for future first-time slope failures to impact the oil and gas pipeline corridor through the Makarov Mountains, Sakhalin Island, Russia // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2012. Vol. 45. No. 1. P. 79—88.
5. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis//Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. Stockholm, Sweden. Balkema, Rotterdam. 1954. P. 43—49.
6. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1. Calgary, Alberta: GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.
7. Kulhawy F. Finite element analysis of the behavior of embankments. Ph.D., thesis, University of California, Berkeley, 1969.
8. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surface // Geotechnique. 1965. Vol. 15. P. 70—93.
9. Babakhanov B.S. Determination of the magnitude of landslide pressure based on the analysis of the stress state of the soil massif: dissertation ... Candidate of technical sciences: 05.23.02. Volgograd, 2013. 175 p.
10. Bogomolov A.N., Kuznetsova S.V., Sinyakov V.N., Shubin M.A., Dyba V.P., Skibin G.M., Olyansky Yu.I., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. Calculation of stability of slopes and design of anti-landslide structures. Internet Bulletin VolgGASU. Ser: Builds. Computer science. 2012. Iss. 8(24). Pp.1—21.
11. Bogomolov A.N. Calculation of the bearing capacity of the foundations of structures and the stability of soil massifs in the elastoplastic setting. Perm: Publishing house PPI, 1996.150 p.
12. Ginzburg L.K. Recommendations for the choice of methods for calculating the slope stability coefficient and landslide pressure. Moscow: Central Bureau of Scientific and Technical Information, 1986.134 p.
13. Ginzburg L.K. Anti-landslide holding structures Moscow, 1979.
14. ОДМ 218.2.006-2010 Recommendations for calculating the stability of landslide-prone slopes (slopes) and determining landslide pressures on engineering structures of highways. <http://gostrf.com/normadata/1/4293807/4293807223.pdf>
15. Pendin V.V., Fomenko I.K. Methodology of assessment and forecast of landslide hazard. Moscow: LЕНАНД, 2015. 320 p.

16. Proposals for calculating the stability of slopes of high embankments and deep excavations. Moscow, 1966.
17. Sainov M.P. Influence of the stress state of a slope from a homogeneous soil on its stability. Vestnik MGSU. 2012 No. 12. P. 111—116.
18. Sergeev K.F. New data on the nature of the relationship between the strata of the Late Mesozoic and Cenozoic sediments of the eastern slopes of the West Sakhalin mountains (Makarovsky region, Sakhalin Island) // Tikhookeanskaya geologiya. 1984. No. 1. P. 99—103.
19. Sirotkina O.N., Fomenko I.K., Gorobtsov D.N. On the classification of mathematical methods for assessing local landslide hazard // Collection of scientific papers based on the materials of the II international scientific conference "SCIENCE OF RUSSIA: GOALS AND OBJECTIVES". 2017. T. 2. P. 50—55.
20. Fomenko I.K. Modern trends in the calculations of slope stability // Engineering Geology. 2012. No. 6. P. 44—53.
21. Fomenko I.K., Sirotkina O.N. Complex method of calculating the stability of slopes // Collection of scientific papers based on the materials of the international scientific-practical conference "Modern directions of theoretical and applied research". 2011. T. 31. P. 88—96.
22. Huang Ya.H. Stability of earthen slopes. Moscow: Stroyizdat, 1988. 240 p.
23. Shakhunyants G.M. Subgrade of railways. Moscow: Transzheldorizdat, 1953.
24. Shakhunyants G.M. Subgrade of railways: Issues of design and calculation: Textbook. manual for universities railway transport. Moscow: Transzheldorizdat, 1953. 828 p.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Горобцов Д.Н. — поставил цель и задачи исследования и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Фоменко И.К. — получил данные для анализа; проанализировал результаты исследования и подготовил данные и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Новгородова М.А. — участвовала в написании и редактировании текста статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Сироткина О.Н. — выполнила работы по систематизации материала, участвовала в написании и редактировании текста статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Denis N. Gorobtsov — sets the goal and objectives of the study and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Igor K. Fomenko — received data for analysis; reviewed the results of the study and prepared the data and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Margarita A. Novgorodova — participated in writing and editing the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Olga N. Sirotkina — performed work on the systematization of the material, participated in writing and editing the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Горобцов Денис Николаевич* — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе. 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия тел.: +7 (925) 664-59-28
e-mail: dngorobtsov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Denis N. Gorobtsov* — Cand. Sci. (Geol-Min.), head of Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia tel.: +7 (925) 664-59-28
e-mail: dngorobtsov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ / HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Фоменко Игорь Константинович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе. 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия тел.: +7 (495) 461-37-77, доб. 21-31
e-mail: fomenkoik@mgru.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2318-6015>

Новгородова Маргарита Алексеевна — преподаватель кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе. 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия тел.: +7 (909) 639-17-27
e-mail: marga_97@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Сироткина Ольга Николаевна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник кафедры динамической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. 1, Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия тел.: +7 (495) 939-25-51
e-mail: onsirotkina@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8171-1960>

Igor K. Fomenko — Dr. of Sci. (Geol.-Min.), Prof., Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia tel.: +7 (495) 461-37-77, ext. 21-31
e-mail: fomenkoik@mgru.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2318-6015>

Margarita A. Novgorodova — teacher Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia tel.: +7 (909) 639-17-27
e-mail: marga_97@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Olga N. Sirotkina — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Senior Researcher, Department of Dynamic Geology, Faculty of Geology, Moscow State University. 1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia tel.: +7 (495) 939-25-51
e-mail: onsirotkina@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8171-1960>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author