

# ОПОЛЗНИ В СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ И ОЦЕНКА ИХ УСТОЙЧИВОСТИ

## ROCKSLIDES AND THEIR STABILITY ANALYSIS

### ЗЕРКАЛЬ О.В.

Заведующий лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., igzov@mail.ru

### ФОМЕНКО И.К.

Главный специалист по геотехнике ООО «Научно-производственный центр по инженерным изысканиям», д.г.-м.н., г. Москва, ifolga@gmail.com

### ZERKAL O.V.

Head of the Laboratory of Engineering Geodynamics and Substantiation of Engineering Protection of Territories, leading researcher of the Engineering and Ecological Geology Department, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, igzov@mail

### FOMENKO I.K.

Chief specialist in geotechnical engineering of the «Research and Production Center for Engineering Surveys» LLC, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, ifolga@gmail.com

### Ключевые слова:

оползни в скальных породах; типизация; зона основных деформаций; поверхность раздела; критерии прочности; оценка устойчивости.

### Keywords:

rockslides; classification; zone of the general sliding failure; discontinuity surface; criterion of the failure; slope stability analysis.

### Аннотация

**Оползни в скальных горных породах («скальные оползни») рассматриваются как самостоятельный класс оползневых процессов. На основе анализа геоструктурных особенностей скальных склонов, учета влияния физико-механических характеристик скальных грунтов выделено 3 типа, 11 подтипов и несколько разновидностей условий формирования зон основных деформаций скальных оползней на начальном этапе смещений. Рассмотрены несколько критериев прочности (Мора — Кулона, Хоека — Брауна и Бартон — Бандиса) и сформулированы основные подходы к схематизации скальных склонов при количественной оценке их устойчивости. На примере расчетов устойчивости скального склона показано влияние метода расчета на результаты анализа устойчивости склона.**

### Abstract

**The rockslides are considered as an independent group of the landslide. Was done the analysis of geostructural features for rock slopes and the influence of mechanical properties of the rock on stability of slopes. Three types, eleven subtypes and some variations of conditions of the rockslide formation were distinguished in the initial phase. Were considered the several strength criteria (by Mohr — Coulomb, Hoek — Brown and Barton — Bandis). Also were determined the basic approaches to the schematization of rock slopes in stability analysis. There was also discussed the influence of choice of calculation methods on the results of analysis of rock slope stability.**

### Введение

Оползни в скальных грунтах («скальные оползни») характеризуются наличием целого ряда специфических особенностей, принципов и закономерностей формирования и механизма смещения, а в отдельных случаях имеют существенные различия по сравнению с развитием оползней в толщах нелитифицированных или слаболитифицированных грунтов или сложно построенных массивах грунтов, для которых типично переслаивание дисперсных, связных, полускальных и скальных отложений. В настоящее время в действующих нормативных документах [19, 20, 21], регламентирующих изучение оползневых процессов, включая количественную оценку устойчивости склонов, практически полностью отсутствует учет особенностей развития скальных оползней, что существенно снижает качество получаемой инженерно-геологической информации для этого типа склоновых деформаций. Настоящая работа посвящена рассмотрению оползней, формирующихся в массивах скальных грунтов, и проведению количественной оценки устойчивости склонов, слагаемых скальными горными породами.

### Представления о систематизации скальных оползней

Одними из первых исследование скальных оползней начали европейские специалисты, изучавшие склоновые процессы в Альпийском регионе и предложившие первые типизации и классификации склоновых деформаций в скальных грунтах (А. Baltzer (1875), А. Heim (1882, 1932), А. Penck (1894), V. Pollack (1925) и др.). Первые отечественные исследования скальных оползней проводились И.В. Мушкетовым (1890), Д.И. Мушкетовым (1914), И.А. Преображенским (1920) в эпицентральных зонах сильных землетрясе-

ний (Верненского (1887), Кебинского (1910), Усойского (1911). К.И. Богдановичем, изучавшим оползни на Черноморском побережье Кавказа, в 1913 г. впервые предлагается отечественная классификация склоновых деформаций, учитывающая наличие плоскостей напластования и трещиноватость массива грунтов, а также принимающая во внимание ориентацию напластования и трещиноватости относительно склона [3].

В дальнейшем за рубежом в составе наиболее широко используемых классификаций оползней склоновые процессы в скальных породах выделяются либо в отдельный вид (с обособлением нескольких типов) оползней (С.F.S. Sharpe (1938)), либо в самостоятельный класс склоновых деформаций (D.J. Varnes (1978) и D.M. Cruden & D.J. Varnes (1996), а также в составе актуализированной версии классификационной схемы D.J. Varnes (2012) [34]. В отечественных, наиболее часто применяемых классификациях оползневых процессов особенности развития склоновых деформаций в скальных массивах учитываются в неявной форме. Например, в классификации оползней Ф.П. Саваренского (1935), оказавшей значительное влияние на развитие оползневедения в нашей стране, выделены консеквентные оползни, к которым были отнесены, с одной стороны, смещения по напластованию или системе трещин, а с другой стороны, оползание нелитифицированных грунтов по существующей поверхности [18]. Сходный подход — совместное рассмотрение оползней в нелитифицированных грунтах и оползней, развивающихся в скальных образованиях, без учета особенностей последних и без выделения специфических типов склоновых деформаций при их типизации также характерен для работ С.Л. Иофина (1953), П.Н. Панюкова (1956), Г.Л. Фисенко (1956, 1965), М.Е. Певзнера (1978), рассматривающих проблемы устойчивости бортов карьеров.

Вместе с тем следует отметить, что в ряде более поздних отечественных классификаций оползней (классификации С.К. Абрамова (1940), Е.Е. Минервиной (1960), Н.И. Соколова (1961), В.И. Преснухина (1976) и др.) авторами, изучавшими территории с широким развитием оползней в горно-складчатых регионах, предлагалось рассмотрение скальных оползней в качестве отдельного вида склоновых деформаций, как правило, с выделением следующих типов:

- оползней соскальзывания/скольжения («контактных» оползней (по А.М. Дранникову и И.А. Клевцову) или «структурных» оползней (по И.В. Аникину и по Е.В. Трепетцову, считавшим, что «контактные» оползни присущи только для нелитифицированных толщ);
- оползней срезающих/сдвига («срезающих»/«скалывающих» оползней (по И.А. Клевцову и по И.В. Аникину), оползней среза (по В.С. Федоренко)).

Однако ни одна из указанных классификационных схем не получила широкого применения.

Наряду с этим роль структурно-тектонических особенностей, влияние трещиноватости и иных плоскостей разрушения при формировании «скальных оползней» в бортах карьеров отмечались при типизациях нарушений устойчивости бортов, предложенных А.М. Деминым и А.Я. Егоровым [7, 8]. Вместе с тем следует отметить, что, несмотря на более четкое понимание и более полный учет влияния на устойчивость склонов различного рода поверхностей ослабления (слоистости, тектониче-

ских нарушений), в действующих инструктивно-методических документах, регламентирующих работы по управлению устойчивостью бортов карьеров, по-прежнему превалирует подход, основанный на совместном рассмотрении оползней в нелитифицированных грунтах и оползней, развивающихся в скальных образованиях, без учета особенностей последних [13, 16].

Другим направлением инженерно-геологических работ, в рамках которого специалисты нередко сталкивались с особенностями развития оползневых процессов в скальных горных породах, является изучение оползней при гидротехническом строительстве. В различные годы к рассмотрению этой проблемы обращались Г.С. Золотарев, Е.В. Трепетцов, Е.Е. Минервина, И.А. Печеркин и многие другие. Непосредственно вопросы развития и оценки деформаций скальных склонов рассматривались в работах Э.Г. Газиева, В.И. Речицкого, Э.А. Фрейберга, разработавших, в частности, «Рекомендации по расчету устойчивости скальных откосов», в рамках которых была предложена схематизация вариантов нарушений устойчивости скальных откосов<sup>1</sup>. В составе схематизации было выделено 9 разновидностей нарушений устойчивости в зависимости от особенностей строения скальных массивов [5, 17]. Вместе с тем часть выделенных разновидностей с точки зрения механизма смещений не являются различными, то есть должны относиться к одному виду смещений (например, сдвиг по поверхности при наличии секущих (склон) трещин и сдвиг по поверхности при наличии крутопадающего в сторону склона напластования). При этом совершенно нельзя согласиться с утверждением, что развитие деформаций в скальных откосах «практически всегда происходит по существующим плоскостям ослабления» (с. 62, [4]).

В то же время необходимо указать, что в настоящее время, несмотря на наличие научных представлений (теоретически обоснованных и эмпирически подтвержденных) об особенностях развития оползневых деформаций в скальных массивах, они так и не нашли своего отражения ни в общей классификации склоновых процессов (по механизму смещения пород)<sup>2</sup>, ни в требова-

<sup>1</sup> Схематизация вариантов нарушений устойчивости скальных откосов, представленная в «Рекомендациях по расчету устойчивости скальных откосов» (1986), несколько ранее (немного в более полном виде) была опубликована в «Руководстве по проектированию противооползневых и противообвальных защитных сооружений. Проектирование противообвальных защитных сооружений» (1984), подготовленном специалистами ВНИИТрансстроя. Позднее в неизменном виде рассматриваемая схематизация включается в состав СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм».

<sup>2</sup> Классификация склоновых процессов (по механизму смещения пород), а также ряд других классификаций показателей оползней, содержащиеся в СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов», наследуются без изменений из СН 519-79 «Инструкции по проектированию и строительству противооползневых и противообвальных защитных сооружений». Таким образом, можно констатировать, что уровень представлений, изложенных в действующих нормативных документах, регламентирующих изыскания на оползневых и оползнеопасных склонах, соответствует 70–80-м годам прошлого столетия.

ниях к выполнению количественных оценок устойчивости, содержащихся в СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов».

### **Особенности формирования скальных оползней и их типизация**

На развитие скальных оползней существенное влияние оказывают существующие в массиве пород неоднородности (в виде различного типа поверхностей раздела) и условия формирования зоны основных деформаций.

Встречающиеся в природных условиях поверхности раздела в скальных массивах, с известной степенью идеализации, независимо от геометрии этих поверхностей, можно отнести к двум группам: сплошные и прерывистые. Сплошные поверхности раздела (поверхности напластования, трещины различного генезиса, сланцеватость) могут иметь различный характер соприкасающихся плоскостей/стенок (ровные или неровные, гладкие или шероховатые, волнистые или ступенчатые, то есть имеющие или не имеющие линейные или точечные скальные контакты), могут быть открытыми, содержать заполнитель или быть частично закрытыми. Прерывистые поверхности раздела отличаются от сплошных поверхностей раздела наличием скальных «целиков» (мостиков) между линейно вытянутыми неоднородностями (открытыми или содержащими заполнитель). Наличие различного рода поверхностей раздела, выступающих зонами концентрации напряжений, существенно влияет на характер напряженно-деформированного состояния массива скальных грунтов, во многих случаях предопределяя механизм развития гравитационных склоновых деформаций.

Исходя из геоструктурных особенностей склонов<sup>3</sup>, слагаемых скальными образованиями, а также учитывая влияние физико-механических характеристик скальных грунтов, можно выделить (основываясь на обобщении ранее опубликованных материалов (см. список использованной литературы) и на результатах работ авторов) несколько типов условий формирования зоны основных деформаций скальных оползней, предопределяющих механизм смещения скальных оползней на начальном этапе<sup>4</sup> их развития (рис. 1).

**Тип I:** имеются поверхности раздела (напластование, трещины, сланцеватость) различной ориентировки (преимущественно «по склону» и вдоль склона), участвующие в формировании зоны основных деформаций, отчленяя скальный массив:

<sup>3</sup> На данном этапе в анализ геоструктурных особенностей скальных склонов не включено рассмотрение влияния складчатых структур (замки складок, ундуляция шарниров складок) на формирование зон оползневых деформаций, что предполагается выполнить на последующих этапах исследований.

<sup>4</sup> Предложенная типизация не включает рассмотрение последующих трансформаций оползающих скальных массивов при смещении с образованием обвалов, каменных лавин различного типа и других видов склоновых деформаций.

**I.1.** зона отрыва и зона скольжения (единственная или множественная, прямолинейная (разновидность **I.1.a**) или сложной формы, в том числе наследующая складчатость (разновидность **I.1.b**) полностью приурочены к существующим сплошным поверхностям раздела (типично для оползней скольжения);

**I.2.** зона отрыва полностью приурочена к существующим сплошным поверхностям раздела, зона скольжения тяготеет к прерывистой поверхности раздела, полностью формируясь по ней (типично для оползней сдвига);

**I.3.** зона основных деформаций тяготеет к прерывистой поверхности раздела, полностью формируясь по ней (типично для оползней скальвания);

**I.4.** зона отрыва и зоны скольжения (две или множество (рис. 2) полностью приурочены к существующим сплошным поверхностям раздела (типично для клиновидных оползней скольжения).

**Особые разновидности типа I:** имеются поверхности раздела (напластование, трещины, сланцеватость) различной ориентировки, однако превалирующее влияние на формирование склоновых деформаций оказывают физико-механические характеристики скальных грунтов:

**I.5.** изгиб торцов пластов у поверхности склона (по Г.С. Золотареву (1983), формирующаяся зона отрыва полностью приурочена к существующим поверхностям раздела, ориентированным преимущественно вдоль склона);

**I.6.** изгиб и выпирание пластов при поступательном скольжении (в средней или нижней части склона), формирующаяся зона скольжения полностью приурочена к существующим поверхностям раздела, деформации в зоне выпора не связаны с основными поверхностями раздела (ориентировка зон внутренних сдвигов не совпадает с ориентировкой зон основных деформаций).

**Тип II:** имеющиеся поверхности раздела (напластование, трещины, сланцеватость) различной ориентировки не играют ведущей роли в образовании оползневых массивов, в формировании зоны основных деформаций участвуют только частично:

**II.1.** зона отрыва полностью приурочена к существующим сплошным поверхностям раздела, ориентированным как «по склону» или вдоль склона (разновидность **II.1.a**), так и «в склон» (разновидность **II.1.b**), имея линейный характер, зона скольжения (единственная) формируется вне существующих поверхностей раздела, имея круглоцилиндрический характер (типично для оползней скальвания);

**II.2.** имеются поверхности раздела, зона отрыва скального оползня формируется вне существующих поверхностей раздела, зона скольжения частично приурочена к существующей прерывистой поверхности раздела, а частично формируется вне ее (типично для оползней скальвания).

**Тип III:** четко выраженные поверхности раздела (напластование, трещины, сланцеватость) в склоновом массиве отсутствуют:

**III.1.** формируется зона основных деформаций, полностью имеющая круглоцилиндрический характер (типично для оползней скальвания);

**III.2.** формирование зоны основных деформаций, имеющей преимущественно линейно-ломанный харак-

тер, что связано с образованием «призмы Прандтля» (при развитии незагужающих деформаций в зоне предельного состояния грунтов и образовании зоны внутренних сдвигов, ориентировка которых не совпадает с ориентировкой зон основных деформаций) (типично для комплексных оползней).

**Особые разновидности типа III:** четко выраженные поверхности раздела (напластование, трещины, сланцеватость) в склоновом массиве полностью отсутствуют, существенное влияние на формирование склоновых деформаций оказывают физико-механические характеристики скальных грунтов:

**III.3a.** формируется зона основных деформаций, имеющая преимущественно круглоцилиндрический характер, осложненная «призмой Прандтля» вследствие залегания в нижней части оползневого массива более прочных разностей скальных пород (типично для комплексных оползней);

**III.3b.** формируется зона основных деформаций, имеющая преимущественно круглоцилиндрический характер, образуются многочисленные зоны внутренних сдвигов (с образованием серии «призм Прандтля»), ориентировка которых не совпадает с ориентировкой зон основных деформаций (типично для комплексных оползней).

Многообразие геоструктурных особенностей скальных склонов, влияющих на формирование склоновых деформаций, разнообразие сочетаний разностей

скальных грунтов существенно затрудняет количественную оценку устойчивости склонов, сложенных скальными горными породами, что требует строгого обоснования расчетных схем. При этом каждая расчетная схема соответствует конкретно типу развития деформаций в массиве.

**Схематизация скальных склонов при оценке их устойчивости**

В настоящее время в зависимости от соотношения и вида поверхностей раздела, отчленяющих тело скального оползня, формирующихся зон основных деформаций различают несколько основных групп расчетных схем количественной оценки устойчивости склонов, сложенных скальными горными породами (рис. 3):

- с явно выраженной плоскостью скольжения, совпадающей с простираем склона;
- с двумя плоскостями скольжения, падающими навстречу друг другу и вниз по склону, когда смещение оползневого блока происходит в направлении, совпадающем с их линией пересечения, типа «клин»;
- с изгибом торцов пластов;
- с круглоцилиндрической поверхностью скольжения.

Рассмотрим более детально «классические» группы склоновых деформаций, обусловленные скольжением горных пород по одной или нескольким плоско-

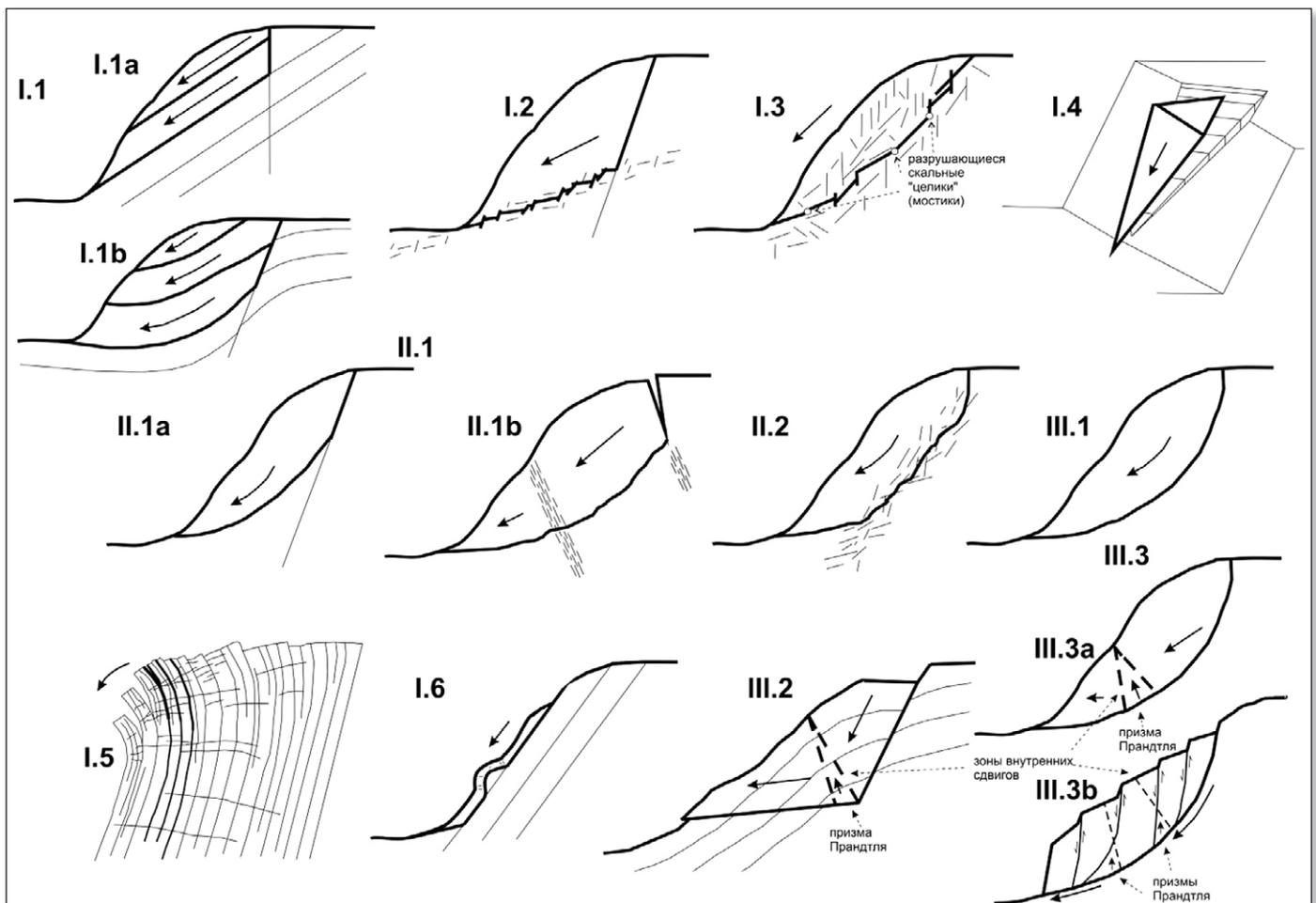
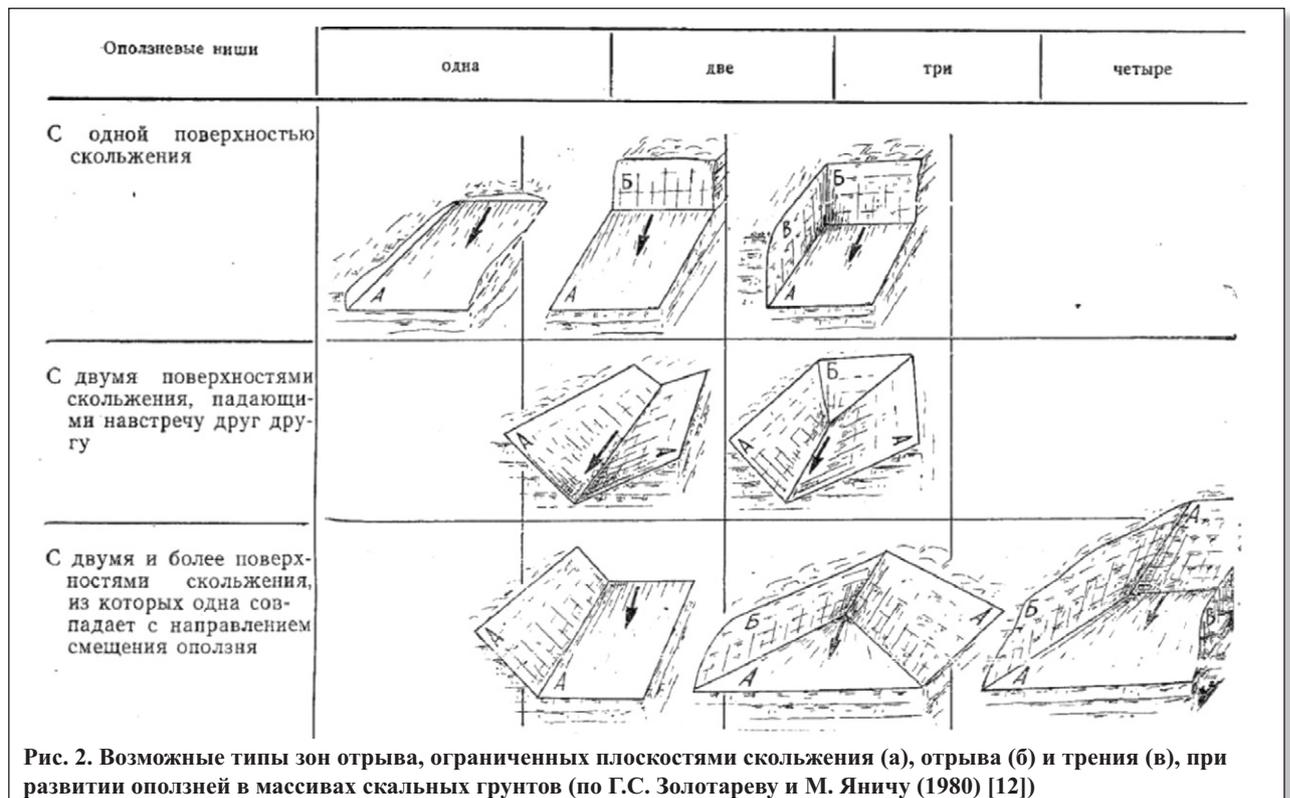


Рис. 1. Типы, подтипы и разновидности условий формирования зон основных деформаций скальных оползней на начальном этапе смещений (пояснения в тексте)



стям, ориентированным «по склону», оставив за рамками выполняемого анализа деформации, связанные с изгибом торцов пластов, характеризующихся ориентировкой поверхностей «в склон» и специфическими особенностями механизма смещения.

Смещение скального оползня по одной или нескольким плоскостям скольжения может происходить как в виде монолитного блока, так и в состоянии значительной раздробленности. В том случае, когда смещение происходит по одной поверхности скольжения, сползающее тело целиком опирается на эту поверхность. Если смещение происходит по нескольким плоскостям скольжения, то вес оползня распределяется по всем поверхностям пропорционально их площадям с учетом их уклонов.

**Скальные оползни с явно выраженной плоскостью скольжения, совпадающей с простиранием склона** (рис. 3, а). Формирование оползней рассматриваемого типа чаще всего происходит на склонах, сложенных моноклинально залегающими породами с хорошо выраженными трещинами напластования или сланцеватостью. Поверхность скольжения образуется по существующим сплошным поверхностям раздела (напластование, трещины, сланцеватость), крутопадающим в сторону склона. При этом отчленение оползающего блока происходит по трещинам отдельности, бокового отпора или по субвертикальным тектоническим трещинам. Реже оползни с одной плоскостью скольжения образуются в неслоистых массивах, когда плоскость скольжения обусловлена наличием прерывистых поверхностей раздела, падающих в сторону склона и ориентированных в плане вдоль или диагонально к простиранию склона. Скальные оползни с одной плоскостью скольжения зачастую имеют небольшие и средние размеры — от десятков-сотен до первых тысяч кубических метров. Вместе с тем на высоких склонах с однородным мо-

ноклиальным строением скальные оползни с одной плоскостью скольжения могут приобретать крупномасштабный характер.

К необходимым условиям развития рассматриваемого типа оползней относятся следующие [15]:

- разница между углом падения поверхности раздела, по которой формируется плоскость скольжения, и углом падения склона должна составлять не менее  $20\text{--}25^\circ$ , при этом простирание поверхности раздела (напластование, трещины, сланцеватость) и простирание склона также должны отличаться не более чем на  $20\text{--}25^\circ$ ;
- угол падения поверхности раздела, по которой формируется плоскость скольжения, должен быть меньше угла падения склона, но при этом поверхность раздела (напластование, трещины, сланцеватость) должна падать «по склону»;
- угол падения поверхности раздела, по которой формируется плоскость скольжения, должен быть больше угла трения по зоне скольжения.

**Скальные оползни с двумя плоскостями скольжения, падающими навстречу друг другу и вниз по склону (типа «клин»)** (рис. 3, б). Формирование и возникновение оползней типа «клин» зависит прежде всего от литологии и структуры массива скальных пород. Наиболее благоприятными для формирования оползней типа «клин» являются скальные массивы, обладающие первичной или вторичной ортогональной трещиноватостью, а также сложенные тонкослоистыми или тонкосланцеватыми породами. Благоприятные условия для возникновения оползней рассматриваемого типа создаются в массивах скальных пород, обладающих сланцеватыми, тонкослоистыми текстурами, и в зонах, подверженных кливажу. При формировании оползней по двум плоскостям скольжения, падающим навстречу друг другу, одна поверхность скольжения обусловлена напластованием пород и наклонной или вертикальной

зоной трещиноватости (тектонической или отдельно-сти). Кроме двух поверхностей скольжения могут присутствовать поверхности отрыва, образованные вертикальными поверхностями раздела различного происхождения (см. рис. 2). В неслоистых массивах горных пород плоскости скольжения обусловлены нали-

чием кососекущих (относительно склона), прерывистых поверхностей раздела, также падающих навстречу друг другу, образуя при своем пересечении (сочленении) ребро, наклоненное в сторону склона.

Плоскости скольжения формируют оползневую нишу, а их пересечение образует ось скольжения, по на-

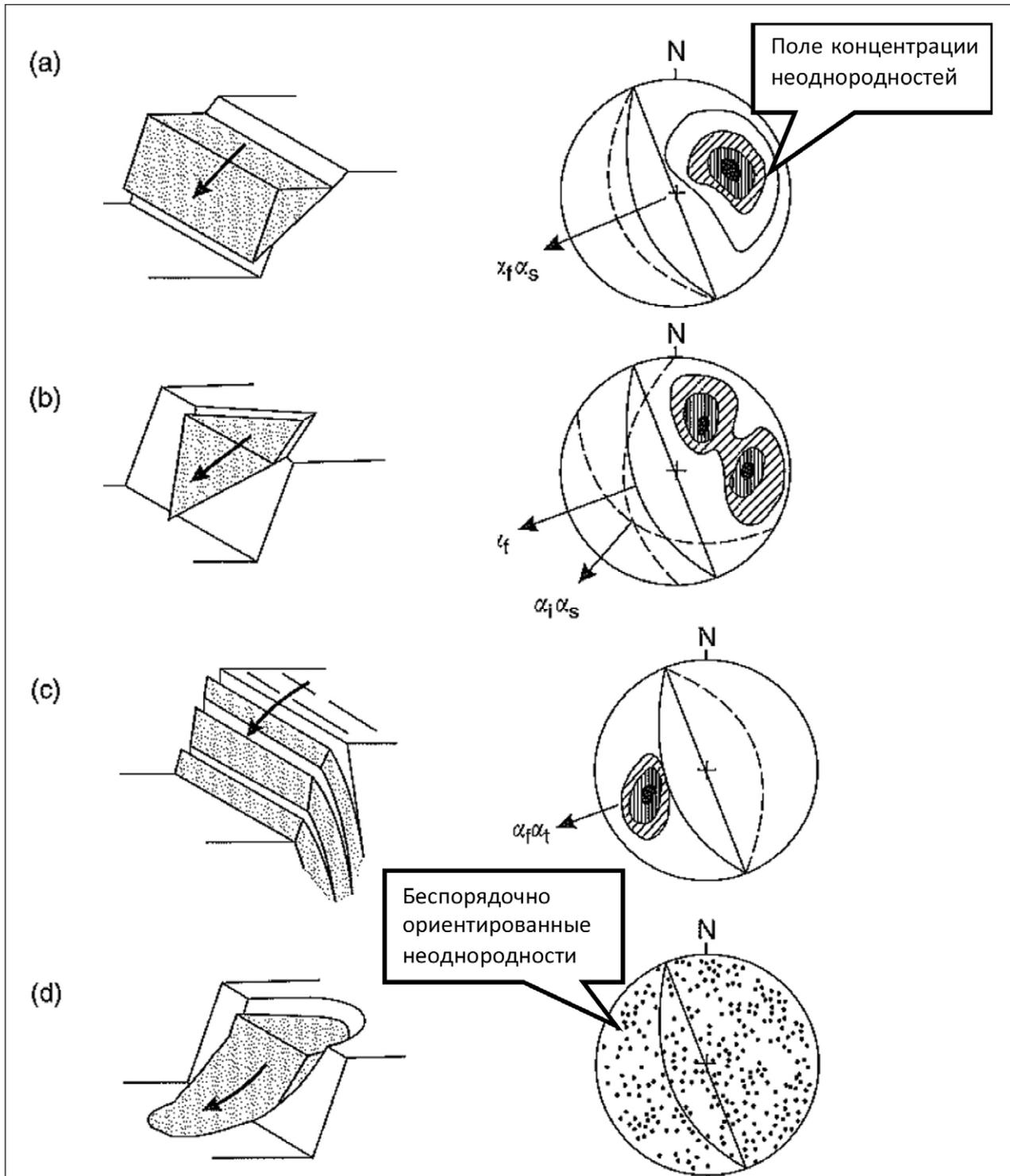


Рис. 3. Типы схематизации склонов, слагаемых скальными горными породами, при количественной оценке устойчивости (при построении полярных диаграмм распределения трещин в массивах использована нижняя полусфера стереографической проекции). Расчетные схемы, рассматривающие формирование зон основных деформаций: а — по явно выраженной плоскости скольжения, совпадающей с простираем склона; б — по двум плоскостям скольжения, падающим навстречу друг другу; в — изгиб торцов пластов; д — по круглоцилиндрической поверхности скольжения (приведено по [15, 39], с изменениями). Направление и угол падения:  $\alpha_f$  — склона;  $\alpha_s$  — зоны смещения;  $\alpha_i$  — изгиба;  $\alpha_l$  — линии пересечения. Описание кинематического анализа при оценке устойчивости склонов, слагаемых скальными горными породами, приведено ниже (см. рис. 10)

правлению которой происходит ускорение движения оползневой массы пород вдоль плоскостей скольжения в направлении максимального падения. В зависимости от соотношения сдвигающих и удерживающих сил оползни типа «клин» могут происходить быстро, в течение нескольких секунд и минут, или в течение более длительного периода, достигающего нескольких месяцев. Размеры такого рода оползней колеблются от нескольких десятков-сотен кубических метров до значительных объемов, обладающих существенным разрушительным потенциалом.

К необходимым условиям развития рассматриваемого типа оползней относятся следующие [15]:

- направление линии пересечения имеющихся поверхностей раздела, по которым формируются плоскости скольжения, должно приближаться к направлению падения склона;
- угол падения линии пересечения имеющихся поверхностей раздела, по которым формируются плоскости скольжения, должен быть меньше угла падения склона, при этом линия пересечения должна падать в сторону склона;
- угол падения линии пересечения имеющихся поверхностей раздела, по которым формируются плоскости скольжения, должен быть больше, чем угол трения на поверхностях скольжения.

В последнем случае зачастую показатели прочностных свойств по различным сформировавшимся зонам скольжения могут быть различными. При этом при количественной оценке устойчивости склона могут быть использованы усредненные характеристики.

**Скальные оползни с круглоцилиндрической поверхностью скольжения** (рис. 3, *d*). Формирование скальных оползней с круглоцилиндрической поверхностью скольжения может происходить как в однородных, так и в слоистых скальных массивах (см. рис. 1). Неслоистые массивы представлены, как правило, магматическими породами, в которых на фоновую протектоническую трещиноватость может накладываться собственно тектоническая раздробленность в виде трещинно-разломных систем (поверхностей раздела) линейного или радиально-кольцевого типа, создающая, в свою очередь, наиболее опасные плоскости ослабления. Опасной считается интенсивность трещиноватости при размере образованных ею элементарных блоков менее 0,3 м и слабом сцеплении между ними. Такие условия характерны для крупных зон разломов, особенно участков их сочленения. Обрушение склонов в неслоистом квазиоднородном массиве происходит по круглоцилиндрической поверхности скольжения, радиус которой зависит от прочностных характеристик скальных грунтов и степени структурного ослабления горного массива. При наличии в массиве системной трещиноватости поверхность скольжения вписывается в плоскости ослабления, созданные трещинами систем, простирающихся вдоль уступа и падающих в сторону склона.

В 1966 г. F.D. Patton впервые отметил влияние особенностей характера шероховатости поверхности раздела, ориентированной под некоторым углом шероховатости  $i$ , и важность учета этого влияния при оценке устойчивости скальных склонов (рис. 4). На основе анализа характера плоскостей скольжения в

известняках F.D. Patton показал, что в условиях низких нормальных напряжений, когда не происходит среза волнистых или угловатых неоднородностей, уклон поверхности скольжения равен сумме усредненной величины угла шероховатости  $i$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ , полученного по подготовленной гладкой поверхности [36]. При возрастании нормальных напряжений до определенных величин неоднородности поверхности срезаются при сдвиге и величина угла шероховатости  $i$  снижается до нуля. Для учета влияния шероховатости по плоскости смещения была предложена система следующих уравнений [27]:

$$\tau = \sigma \times \operatorname{tg}(\varphi + i), \text{ при } \sigma < \sigma_o$$

$$\tau = \sigma \times \operatorname{tg}\varphi + c, \text{ при } \sigma > \sigma_o$$

где  $\sigma$  — эффективные нормальные напряжения,  $i$  — угол шероховатости, и

$$\sigma_o = \frac{c}{\operatorname{tg}(\varphi + i) - \operatorname{tg}\varphi}.$$

Детальный анализ влияния на сопротивление сдвигу горных пород особенностей характера шероховатости, морфология поверхности трещин также дается в работах С.Е. Могилевской [14].

В субгоризонтально залегающей ( $0,5^\circ$ ) слоистой толще осадочных скальных пород относительно небольшой прочности также возможно образование оползня по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Такой механизм развития оползней иногда называют трансляционным. В указанной ситуации возможно последовательное формирование в присклоновом массиве «призмы Прандтля» с последующим хрупким разрушением пород призмы упора с вовлечением в процесс оползания дополнительных блоков и постепенным возрастанием вовлеченных в смещение пород до нескольких десятков миллионов кубометров (см. рис. 1, **разновидности III.3a и III.3b**). Такие деформации обычно начинаются мелкомасштабным оползанием неустойчивого массива, а завершаются вовлечением всего склона в смещения.

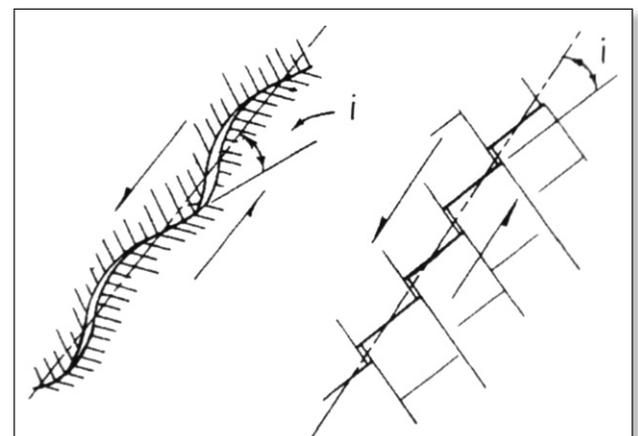


Рис. 4. Взаимосвязь усредненного угла наклона плоскости раздела и особенностей (шероховатости) поверхности раздела [27]

### Критерии прочности, используемые при количественной оценке устойчивости скальных оползней

В практике расчетов устойчивости склонов наиболее широкое применение нашли следующие критерии прочности: Мора — Кулона, Хоека — Брауна, Бартона — Бандиса. Кратко рассмотрим применяемые критерии прочности.

**Критерий прочности Мора — Кулона.** В качестве критерия прочности для скальных оползней скольжения наиболее часто используется зависимость Мора — Кулона:

$$\tau = (\sigma - u) \times \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где  $t$  — сопротивление сдвигу;  $u$  — поровое давление;  $s$  — нормальные напряжения;  $j$  — угол внутреннего трения;  $c$  — сцепление.

Необходимыми данными для расчета устойчивости склона по линейно-упругой модели на основе критерия прочности Мора — Кулона являются сцепление и угол внутреннего трения. Они не используются в решении, при расчете напряжений и деформаций, но необходимы для расчета зон пластического течения, в которых значения напряжений превысили критические значения и закон Гука не выполняется. Использование критерия прочности Мора — Кулона позволяет сравнить расчетное напряжение при сдвиге с теоретическими предельными значениями напряжений.

Обобщением критерия прочности Мора — Кулона является критерий анизотропной прочности. Описываемая модель прочности использует следующую зависимость для определения анизотропии прочностных свойств грунта (параметры  $c$ ,  $\varphi$ ) в трансверсально изотропном случае:

$$c = c_h \cos^2 \alpha + c_v \sin^2 \alpha,$$

$$\varphi = \varphi_h \cos^2 \alpha + \varphi_v \sin^2 \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол уклона плоскости анизотропии; нижние индексы  $h$  и  $v$  обозначают горизонтальное и вертикальное направление (по и перпендикулярно напластованию соответственно) в определении свойств.

**Критерий прочности Хоека — Брауна.** Критерий Хоека — Брауна является примером нелинейного критерия прочности на сдвиг, разработанного для скальных грунтов [32]. Этот критерий развивается поэтапно, опираясь на результаты обобщений эмпирических данных, в течение более чем двух десятилетий. Последняя версия рассматриваемого критерия известна под названием «обобщенный критерий Хоека — Брауна» (Generalised Hoek-Brown criterion) [33]. Согласно обобщенному критерию Хоека — Брауна для расчета прочности на сдвиг требуется четыре начальных параметра [33]:

- $\sigma_{ci}$  — прочность на одноосное сжатие;
- $m_i$  — литологический тип грунтов, например андезит, мергель, кварцит и т.п.;
- $GSI$  — индекс геологической прочности, зависящий от структуры массива, например ненарушенный, блочный, флишевый и т.д. (от 0 до 100);

- $D$  — фактор нарушенности массива горных пород (от 0 до 1).

Каждый из описанных выше четырех входных параметров ( $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$ ,  $GSI$ ,  $D$ ) может быть оценен на основе классификационных графиков и таблиц Хоека — Брауна в зависимости от конкретных геологических условий. Обобщенный критерий Хоека — Брауна может быть определен следующим образом [33]:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a,$$

где  $\sigma'_1$  и  $\sigma'_3$  — эффективные главные напряжения,  $\sigma_{ci}$  — прочность на одноосное сжатие,  $m_b$ ,  $s$  и  $a$  — критерий Хоека — Брауна для породы, которые можно получить из следующих уравнений:

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right),$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right),$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right),$$

$$E_m (GPa) = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\left( \frac{GSI - 10}{40} \right)}.$$

Также были предложены уравнения для вычисления параметров прочности Мора — Кулона (параметры  $c'$ ,  $\varphi'$  для определенных диапазонов. Для склонов эти параметры оцениваются следующим образом [33]:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right],$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}](s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+6am_b(s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}(1+a)(2+a)},$$

где  $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max}/\sigma_{ci}$ .

**Критерий прочности Бартона — Бандиса.** Критерий прочности Бартона — Бандиса широко используется для моделирования сдвиговой прочности породы по трещинам. Этот критерий является нелинейным и определяется следующим образом [25, 26]:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \left[ \varphi_r + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right],$$

где  $\tau$  — сдвиговая прочность,  $\sigma_n$  — нормальное напряжение,  $\varphi_r$  — угол остаточного трения,  $JRC$  — коэффициент шероховатости трещин,  $JCS (= \sigma_1 - \sigma_3)$  — совместная прочность трещин и грунта при сжатии.

С учетом влияния шероховатости по плоскости смещения (по F.D. Patton) коэффициент устойчивости склона ( $F_s$ ) с использованием критериев прочности Бартона — Бандиса может быть получен следующим образом [39]:

$$FS = \frac{\tau S}{P \sin \psi_i} = \frac{(\sigma_n \operatorname{tg} [\varphi_r + JRC \log_{10} (\frac{JTC}{\sigma_n})]) S}{P \sin \psi_i} =$$

$$= \frac{\operatorname{tg} [\varphi_r + JRC \log_{10} (\frac{JTC}{\sigma_n})]}{\sin \psi_i} = \frac{\operatorname{tg} (\varphi_r + i)}{\operatorname{tg} \psi_i},$$

где  $S$  — площадь плоскости смещения,  $P$  — вес смещающегося блока,  $\psi_i$  — уклон плоскости смещения,  $i$  — угол шероховатости.

### Вопросы количественной оценки устойчивости скальных оползней

В настоящее время существует достаточно много методов расчета устойчивости склонов. Выбор тех или иных методов в первую очередь определяется типом оползневого процесса и механизмом возможного смещения оползневых масс. Как уже отмечалось, оползни в скальных грунтах («скальные оползни») характеризуются наличием целого ряда специфических особенностей, что, соответственно, играет существенную роль при количественной оценке устойчивости склонов, слагаемых скальными горными породами. В настоящей работе проанализированы примеры расчета устойчивости склонов, слагаемых скальными горными породами, как в условиях поиска возможной плоскости скольжения, как правило, имеющей круглоцилиндрический характер, так и для варианта наличия в массиве различного рода плоскостей раздела (поверхностей напластования и систем трещины различного генезиса). Для проведения оценок устойчивости были использованы следующие варианты расчета.

1. Варианты, решающие задачи поиска плоскости скольжения при оценке устойчивости (без прямого учета существующих плоскостей раздела):

- группа методов предельного равновесия, представленных методом Morgenштерна — Прайса<sup>5</sup>, упрощенным методом Бишопа и упрощенным методом Ямбу.

2. Варианты, оценивающие устойчивость с учетом существующих плоскостей раздела:

- метод конечных элементов, представляющий класс численных методов и рекомендованный к применению в актуализированных редакциях нормативных документов [20];
- метод расчета объемных скальных блоков (оползней типа «клин»).

В качестве объекта проведения тестовых расчетов был выбран склон высотой порядка 250 м, слагаемый известняками девонского возраста, осложненный серией тектонических нарушений, выраженных линейными зонами тектонических брекчий, и характеризующийся развитием оперяющих систем трещин (рис. 5).

**Особенности применения методов предельного равновесия при оценке устойчивости скальных склонов.** При оценке устойчивости склонов методы предельного равновесия ориентированы на поиск поверхности скольжения (близкой к круглоцилиндрической), для которой характерно минимальное значение коэффициента устойчивости. Дополнительно к традиционным схемам выполнения расчета по поверхности, близкой к круглоцилиндрической, в настоящей работе были применены следующие подходы:

- 1) использование при расчете плоской (блоковой) поверхности скольжения для моделирования имеющихся в массиве поверхностей раздела;
- 2) использование при расчете модели анизотропной прочности<sup>6</sup>.

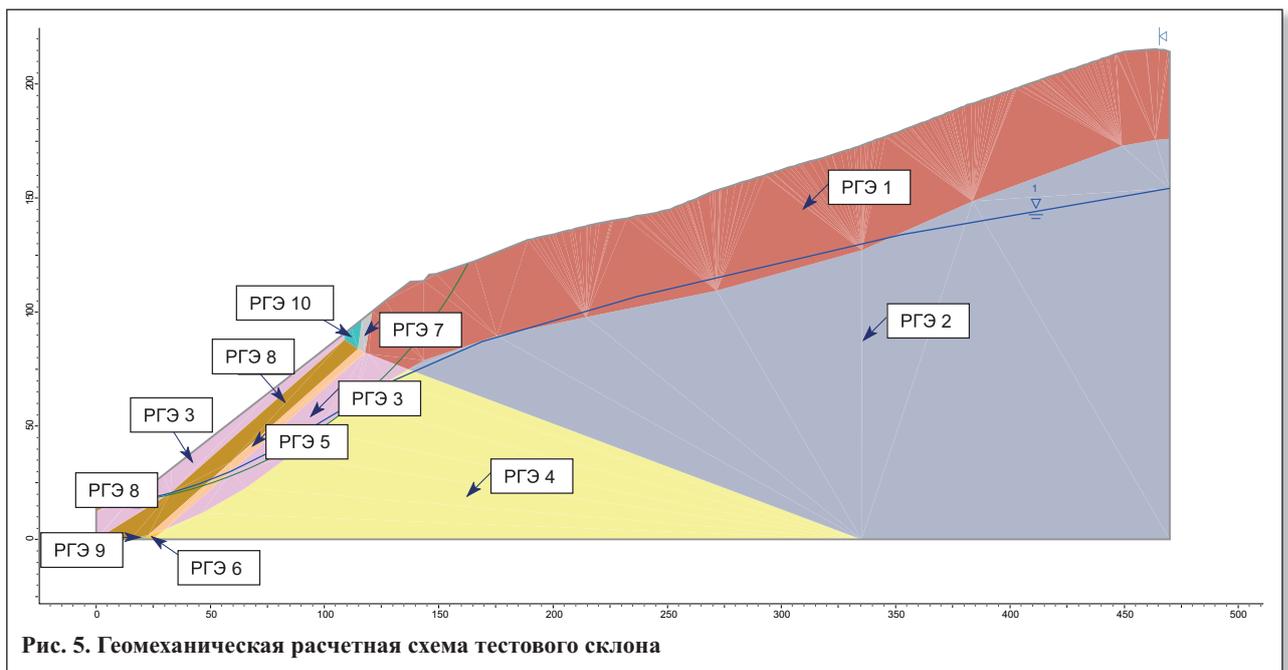


Рис. 5. Геомеханическая расчетная схема тестового склона

<sup>5</sup> Методы Бишопа и Morgenштерна — Прайса рассматриваются действующими нормативными документами (СП 11-105-97, часть II [19]) в качестве общепринятых методов расчета устойчивости склонов.

<sup>6</sup> Особенности применения при количественной оценке устойчивости склонов модели анизотропной прочности рассмотрены в [9].

Свойства грунтов, принятые при оценке устойчивости тестового склона									
Наименование грунтов и выделенные РГЭ	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона $\mu$	Модуль деформации $E$ , МПа	Параметры прочности				Угол анизотропии	
				по трещиноватости		в массиве			
				tg $\varphi$	$C$ , МПа	tg $\varphi$	$C$ , МПа		
Известняки	РГЭ 1	2,72	0,27	1 600	0,74	0,07	0,80	0,18	40
	РГЭ 2	2,74	0,23	4 250	0,79	0,10	0,85	0,30	40
Известняки в зоне тектонического дробления	РГЭ 3	2,69	0,35	950	0,60	0,04	0,80	0,18	80
	РГЭ 4	2,72	0,35	1 300	0,65	0,05	0,85	0,30	80
Брекчия	РГЭ 5	2,66	0,29	2 650	0,81	0,08	0,90	0,25	40
	РГЭ 6	2,69	0,20	5 200	0,86	0,11	0,95	0,35	40
Брекчия в зоне тектонического дробления	РГЭ 7	2,66	0,35	1 300	0,50	0,04	0,90	0,25	80
Глинистые сланцы	РГЭ 8	2,66	0,30	1 050	0,71	0,06	0,75	0,15	60
	РГЭ 9	2,70	0,26	2 000	0,76	0,09	0,80	0,25	60
Глинистые сланцы в зоне тектонического дробления	РГЭ 10	2,56	0,35	650	0,45	0,03	0,75	0,15	80

При реализации первого из названных подходов наряду с традиционными расчетами по круглоцилиндрической поверхности скольжения в расчетах была использована плоская (блоковая) поверхность скольжения, которая совпадает с существующей плоскостью раздела в массиве и более адекватно моделирует образование оползней с явно выраженной плоскостью раздела. В рассматриваемом случае это система трещин напластования, простираение которой совпадает с простираением склона, по которой формируется плоскость скольжения — тип I по условиям формирования зоны основных деформаций (согласно представленной типизации). Как было показано выше, образующаяся поверхность скольжения моделируется протяженной стороной оползневого блока (угол падения основания блока совпадает с углом падения трещин напластования). При этом отчленение сползающего блока происходит по трещинам отдельности или по субвертикальным тектоническим трещинам.

При реализации второго из названных подходов учитывалась структурная анизотропия свойств грунтов, существенное влияние которой на получаемые оценки устойчивости было показано ранее авторами в работе, посвященной этой проблеме [9]. При выполнении рассматриваемых ниже расчетов использовалась модель прочности, основанная на описанном выше обобщенном критерии прочности Мора — Кулона, учитывающем анизотропию прочностных свойств грунтов (в трансверсально изотропном случае) при моделировании устойчивости склонов. При реализации рассматриваемого подхода моделируется III тип условий формирования зоны основных деформаций скальных оползней (согласно представленной типизации (см. рис. 1).

Таким образом, учитывая вышеизложенное, при использовании методов предельного равновесия для количественной оценки устойчивости склона, слагаемого скальными горными породами, расчеты выполнялись по следующим схемам:

- оценка устойчивости склона по круглоцилиндрической поверхности;
- оценка устойчивости склона по круглоцилиндрической оптимизированной поверхности (то есть допускается на отдельных участках «прилипание» расчетной поверхности смещения к существующим поверхностям раздела);
- оценка устойчивости всего откоса по плоской (блоковой) поверхности смещения.

Свойства грунтов, принимавшиеся в расчет, рассматривались по следующим вариантам:

- в соответствии с требованиями действующих нормативных документов — усредненные (по ГОСТ 20522-2012 [6]) по массиву РГЭ (согласно требованиям СП 11-105-97, ч. II [19]);
- устойчивость склона определялась свойствами грунтов по зонам трещиноватости<sup>7</sup>;
- грунты, слагающие склоновый массив, рассматривались как анизотропные.

В таблице 2 и на рис. 6 представлены результаты количественной оценки устойчивости склона, слагаемого скальными горными породами, полученные различными методами предельного равновесия по различным вариантам расчета для условий без дополнительных воздействий (сейсмического, техногенного).

Сравнительный анализ полученных результатов, полученных методами предельного равновесия, позволяет отметить следующее.

1. Расчетные величины коэффициента устойчивости для склонов, слагаемых скальными горными породами, полученные в соответствии с требованиями действующих нормативных документов (усреднение свойств грунтов по РГЭ), являются одними из максимальных (среди полученных, независимо от метода расчета) и, по-видимому, имеют завышенные значения,

<sup>7</sup> Вопросы влияния трещиноватости горных пород на устойчивость откосов детально рассмотрены в работах С.Н. Чернышева и др. [23].

Таблица 2

Вариант расчета	Расчетный метод		
	Моргенштерна — Прайса (М-П)	Бишопа	Янбу
1. Стандартная — поверхность круглоцилиндрическая, в расчет приняты свойства грунтов, усредненные по РГЭ (согласно ГОСТ 20522-2012 [6] и СП 11-105-97, ч. II [19])	1,91	1,92	1,81
2. Стандартная — поверхность круглоцилиндрическая оптимизированная, в расчет приняты свойства грунтов, усредненные по РГЭ (согласно ГОСТ 20522-2012 [6] и СП 11-105-97, ч. II [19])	1,79	1,77	1,69
3. Стандартная — поверхность круглоцилиндрическая, в расчет приняты свойства грунтов, полученные по зоне трещиноватости (с усреднением)	1,33	1,33	1,24
4. Стандартная — поверхность круглоцилиндрическая оптимизированная, в расчете учтены свойства грунтов, полученные по зоне трещиноватости	1,32	1,27	1,19
5. Поверхность смещения задана по поверхности раздела (плоская поверхность смещения), в расчет приняты свойства грунтов, усредненные по РГЭ (согласно ГОСТ 20522-2012 [6] и СП 11-105-97, ч. II [19])	2,05	1,93	1,89
6. Поверхность смещения задана по поверхности раздела (плоская поверхность смещения), в расчет приняты свойства грунтов, полученные по зоне трещиноватости	1,43	1,34	1,28
7. Стандартная — поверхность круглоцилиндрическая, в расчет приняты свойства грунтов, усредненные по массиву с учетом анизотропии свойств грунтов	1,41	1,41	1,30
8. Стандартная — поверхность круглоцилиндрическая оптимизированная, в расчет приняты свойства грунтов, усредненные по массиву с учетом анизотропии свойств грунтов	1,37	1,35	1,26
9. Поверхность смещения задана по поверхности раздела (плоская поверхность смещения), в расчет приняты свойства грунтов, усредненные по массиву с учетом анизотропии свойств грунтов	1,63	1,51	1,45

что может привести к ошибочной оценке инженерно-геологической ситуации.

2. Оптимизация круглоцилиндрической поверхности при оценке устойчивости в соответствии с требованиями действующих нормативных документов для склонов, слагаемых скальными горными породами, сопровождается снижением величин коэффициентов устойчивости на 6–8% (в зависимости от метода расчета), также характеризуясь, по-видимому, завышенными значениями.

3. Расчетные величины коэффициента устойчивости для склонов, слагаемых скальными горными по-

родами, полученные в соответствии с требованиями действующих нормативных документов для плоской поверхности смещения в условиях, когда поверхность раздела не выделена в отдельный РГЭ, имеют максимальные значения (среди полученных, независимо от метода расчета) и, очевидно, являясь существенно завышенными, характеризуют инженерно-геологическую ситуацию неверно.

4. Расчетные величины коэффициента устойчивости для склонов, слагаемых скальными горными породами, полученные с использованием данных о свойствах грунтов по зонам трещиноватости, секущим



Рис. 6. Сопоставление результатов количественной оценки устойчивости склона, слагаемого скальными горными породами, полученных с использованием метода Моргенштерна-Прайса по различным вариантам расчета

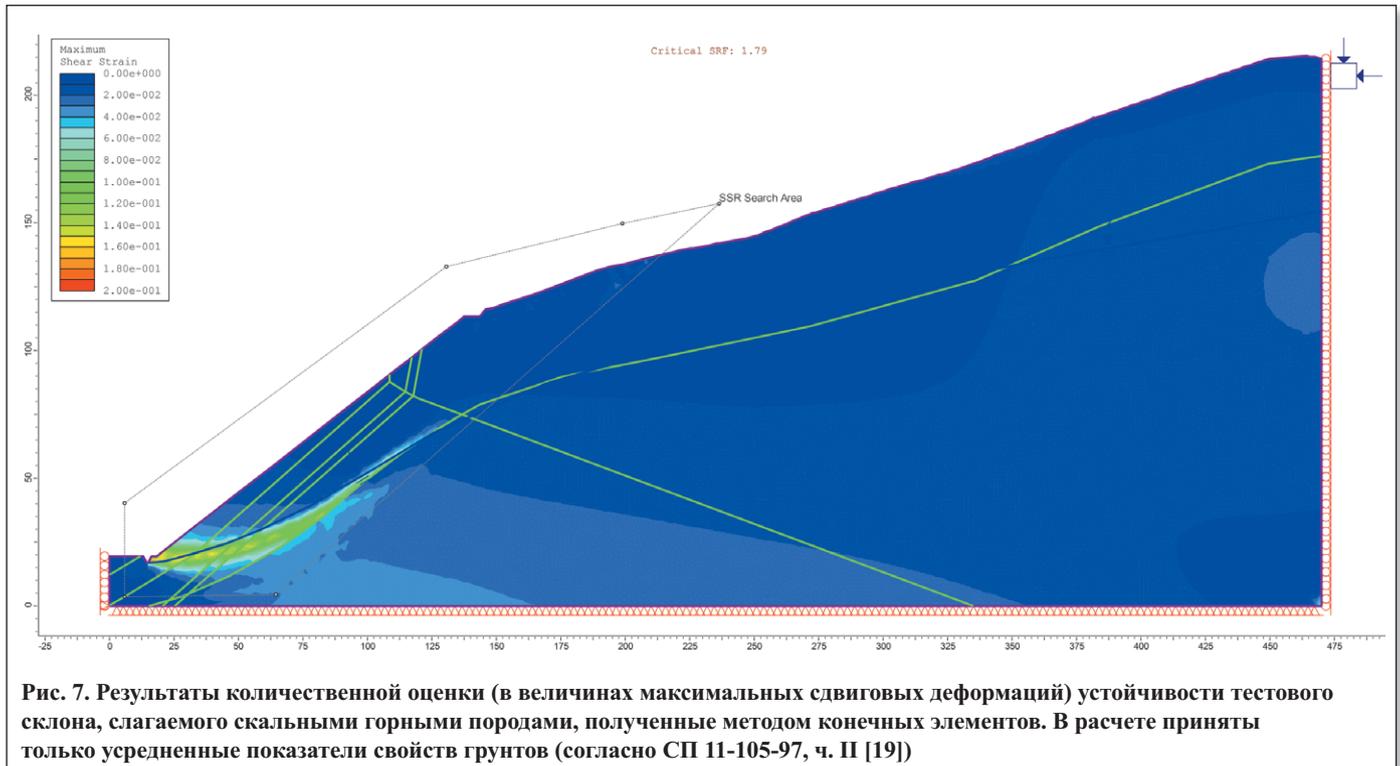


Рис. 7. Результаты количественной оценки (в величинах максимальных сдвиговых деформаций) устойчивости тестового склона, слагаемого скальными горными породами, полученные методом конечных элементов. В расчете приняты только усредненные показатели свойств грунтов (согласно СП 11-105-97, ч. II [19])

склон (в том числе не полностью), выделенным в отдельный РГЭ, существенно снижаются (до 30–32% (!), в зависимости от метода расчета) по сравнению с величинами, полученными при расчетах без выделения отдельного ИГЭ по зоне трещиноватости<sup>8</sup>.

5. Учет анизотропии свойств грунтов при оценке устойчивости склонов, слагаемых скальными горными породами, сопровождается снижением получаемых величин коэффициентов устойчивости от 23–25% до 26–28% (в зависимости от метода расчета).

Следует отметить, что значения  $K_{уст}$ , полученные с учетом анизотропии свойств грунтов, и значения  $K_{уст}$ , полученные с использованием данных о свойствах грунтов по зонам трещиноватости, являются более близкими между собой, существенно отличаясь от значений  $K_{уст}$ , полученных при принятии в расчет показателей свойств грунтов в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

**Использование метода конечных элементов при оценке устойчивости скальных склонов с возможностью задания трещиноватого массива.** В методе конечных элементов структурные неоднородности в массиве горных пород, такие как, например, имитация структуры первичной или вторичной трещиноватости, могут быть смоделированы с использованием особого механизма совместных границ. Такого рода совместные границы могут быть заданы для различных статистических или детерминистических моделей и моделируются как зоны, где происходит скачок смещений элементов. Рассматриваемая зона может быть представлена как пружина, обладающая нормальной и сдвиговой жесткостью. Такая формулировка совместных границ позволяет общим узлам конечно-элементной сетки перемещаться относительно друг друга, соз-

давая нормальные и касательные деформации. Эта идея берет свое начало в концепции, заложенной в методе граничных элементов [11]. Результаты расчета устойчивости рассматриваемого тестового склона, слагаемого скальными породами, методом конечных элементов представлены на рис. 7–9.

Рассмотрение результатов количественной оценки методом конечных элементов устойчивости тестового склона, слагаемого скальными горными породами, показало следующее.

1. При принятии в расчет свойств грунтов в соответствии с требованиями действующих нормативных документов (усреднение свойств грунтов по РГЭ без учета структурных неоднородностей в массиве горных пород) полученная величина коэффициента устойчивости близка к значениям  $K_{уст}$ , полученным при оценке устойчивости методами предельного равновесия по оптимизированной круглоцилиндрической поверхности (см. табл. 2, вариант 2).

2. Учет структурных неоднородностей в массиве горных пород (с использованием вышеописанного способа учета трещиноватости) приводит к снижению получаемых величин коэффициентов устойчивости более чем на 32% (сопоставимо с вариантом 4 в табл. 2). При этом формирование зоны основных деформаций происходит как вне существующих поверхностей раздела, так и наследуя их (см. рис. 1, подтипы II.1, II.2 и III.1).

3. При принятии в расчет свойств грунтов, усредненных по массиву с учетом их анизотропии, структурных неоднородностей в массиве горных пород и изменчивости свойств грунтов по зонам трещиноватости, полученная величина коэффициента устойчивости близка к значениям  $K_{уст}$ , полученным при оценке устойчивости методами предельного равновесия по

<sup>8</sup> Зоны трещиноватости и другие поверхности раздела, секущие склоны, традиционно крайне редко выделяются при изысканиях в отдельные ИГЭ в связи с их незначительной мощностью и сложностью получения характеристик свойств грунтов в пределах такого рода неоднородностей в склоновом массиве.

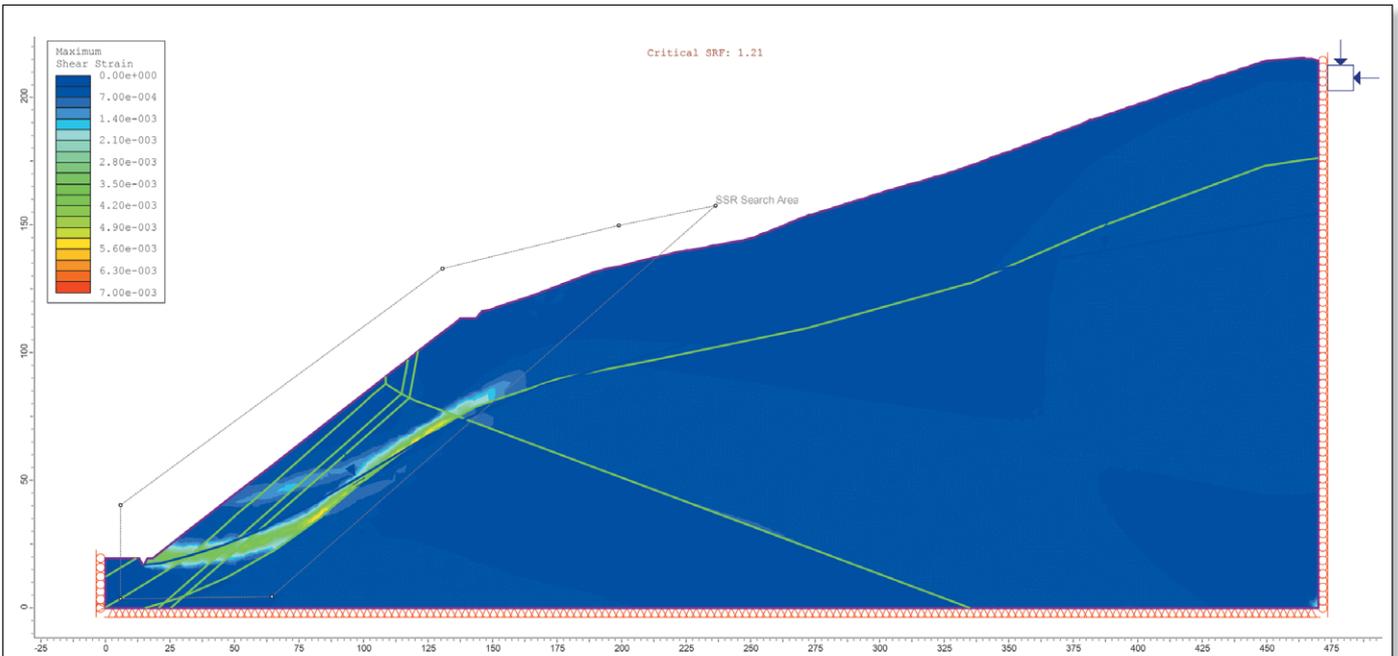


Рис. 8. Результаты количественной оценки (в величинах максимальных сдвиговых деформаций) устойчивости тестового склона, слогаемого скальными горными породами, полученные методом конечных элементов. В расчете учтены структурные неоднородности в массиве горных пород и свойства грунтов, полученные по зонам трещиноватости

поверхности раздела (плоская поверхность смещения) с принятием в расчет свойств грунтов, усредненных по массиву с учетом анизотропии свойств грунтов (см. табл. 2, вариант 9). Однако при этом обращают на себя внимание форма и расположение зоны максимальных сдвиговых деформаций, формирующиеся в основании склонового массива, что свидетельствует о возможном образовании в массиве «призмы Прандтля» (разновидности III.3a и III.3b согласно представленной типизации (см. рис. 1) при дополнительных воздействиях (сейсмическом или техногенном).

*Использование метода «расчета объемных скальных блоков».* Областью применения метода «расчета объемных скальных блоков» при количественной оценке устойчивости склонов, слогаемых скальными горными породами, является анализ устойчивости оползневых тел, ограниченных серией разноориентированных плоскостей скольжения (клиновидные оползни скольжения и другие разновидности — см. рис. 2), формирующиеся по существующим поверхностям раздела — подтип I.4 по условиям формирования зоны основных деформаций

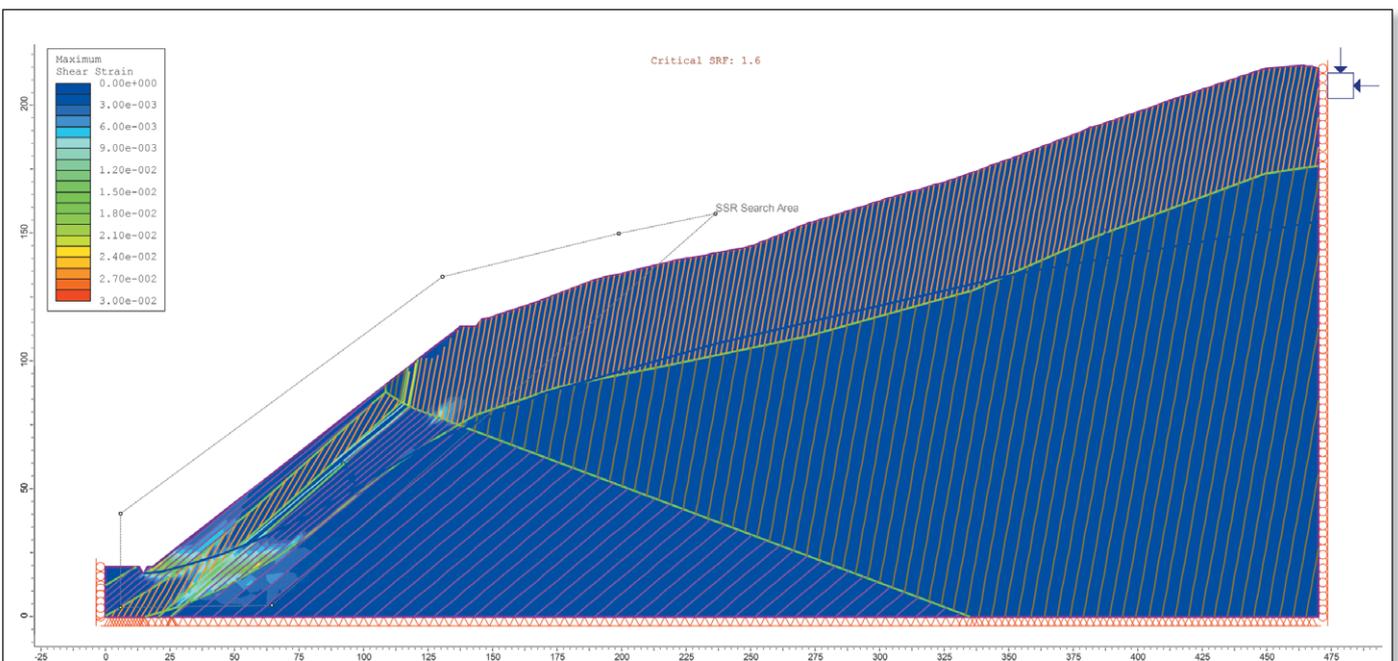


Рис. 9. Результаты количественной оценки (в величинах максимальных сдвиговых деформаций) устойчивости тестового склона, слогаемого скальными горными породами, полученные методом конечных элементов. В расчет приняты свойства грунтов, усредненные по массиву с учетом их анизотропии, приняты во внимание структурные неоднородности в массиве горных пород и изменчивость свойств грунтов по зонам трещиноватости

ций скальных оползней (согласно представленной типизации).

В общем случае, анализ устойчивости скальных склонов на основе метода «расчета объемных скальных блоков» выполняется в два этапа. На первом этапе проводится анализ геоструктурных особенностей скального массива, формирующего склон, с целью определения ориентации систем трещин, которые могли бы привести к его обрушению. Такого рода оценка осуществляется с использованием кинематического анализа. Если по результатам кинематического анализа установлена возможность обрушения скального массива, то на втором этапе производится непосредственно расчет устойчивости склона. Приведенная далее методика оценки устойчивости скальных склонов методом «расчета объемных скальных блоков» основана на работах А.К. Turner и R.L. Schuster, G.P. Giani, E. Hoek и J.W. Bray [28, 31, 38].

Самыми важными параметрами при оценке трещиноватости при кинематическом анализе являются угол падения и азимут простираения систем трещин, выявленных в скальном массиве, их соотношение с общей ориентировкой склона. Кинематический анализ основывается на интерпретации этих данных с использованием стереографического проектирования, которое позволяет трехмерные данные ориентации систем трещин представить и проанализировать на плоскости.

Наиболее распространенным случаем обрушения объемных скальных блоков является образование клиновидных оползней скольжения со смещением по двугранному углу («желобу»), падающему в сторону склона, образованному двумя диагональными поверхностями, обычно совпадающими с существующими в массиве поверхностями раздела (системами трещин или другими ослабленными поверхностями). Внешний вид скального блока типа «клин» и других разновидностей такого рода оползней при различных случаях обрушения скального блока пород по пересекающимся плоскостям скольжения показан на рис. 2.

Поскольку рассматриваемая модель является трехмерной, никакие дополнительные предположения об ограничениях по боковым плоскостям клина не требуются. Стереографический анализ позволяет также определить, произойдет ли скольжение по обеим формирующим клин трещинам или только по одной из них. Эта процедура известна как тест Марклэнда [15, 31, 35]. На рис. 10 проиллюстрированы условия, которые были оценены стереографическим методом.

Общая методика оценки устойчивости обрушения блока скальных пород по двум пересекающимся плоскостям скольжения (типа «клин») основана на анализе состояния монолитного блока, условия равновесия которого могут быть охарактеризованы с использованием понятия «коэффициент устойчивости». Для выполнения количественной оценки устойчивости необходимо, чтобы геометрия блока (клина) была определена местоположением и ориентацией существующих в массиве поверхностей раздела, которые потенциально могут явиться зонами формирования основных деформаций при смещении скального оползня.

Пример результатов расчета устойчивости рассматриваемого тестового склона, слагаемого скальными

породами (известняками), описанным методом «расчета объемных скальных блоков» представлен на рис. 11. Кинематический анализ обрушения оползневого блока типа «клин» был выполнен для тестового участка со следующими параметрами:

- высота откоса — 100 м;
- угол падения поверхности склона — 38°;
- угол падения поверхности в верхней части склона — 18°;
- параметры трещин, образующих клин:
  - система 1, угол падения/азимут падения — 40/148;
  - система 2, угол падения/азимут падения — 42/239;
- прочностные свойства грунтов по трещинам:  $c = 30$  кПа,  $\phi = 24^\circ$ .

Выполненная методом «расчета объемных скальных блоков» количественная оценка устойчивости рассматриваемого тестового склона, слагаемого скальными породами, показала, что при заданных условиях и параметрах скальный блок, отчлененный по двум пересекающимся плоскостям скольжения (то есть имеющий форму «клина»), является устойчивым ( $K_{\text{уст}}=1,26$ ).

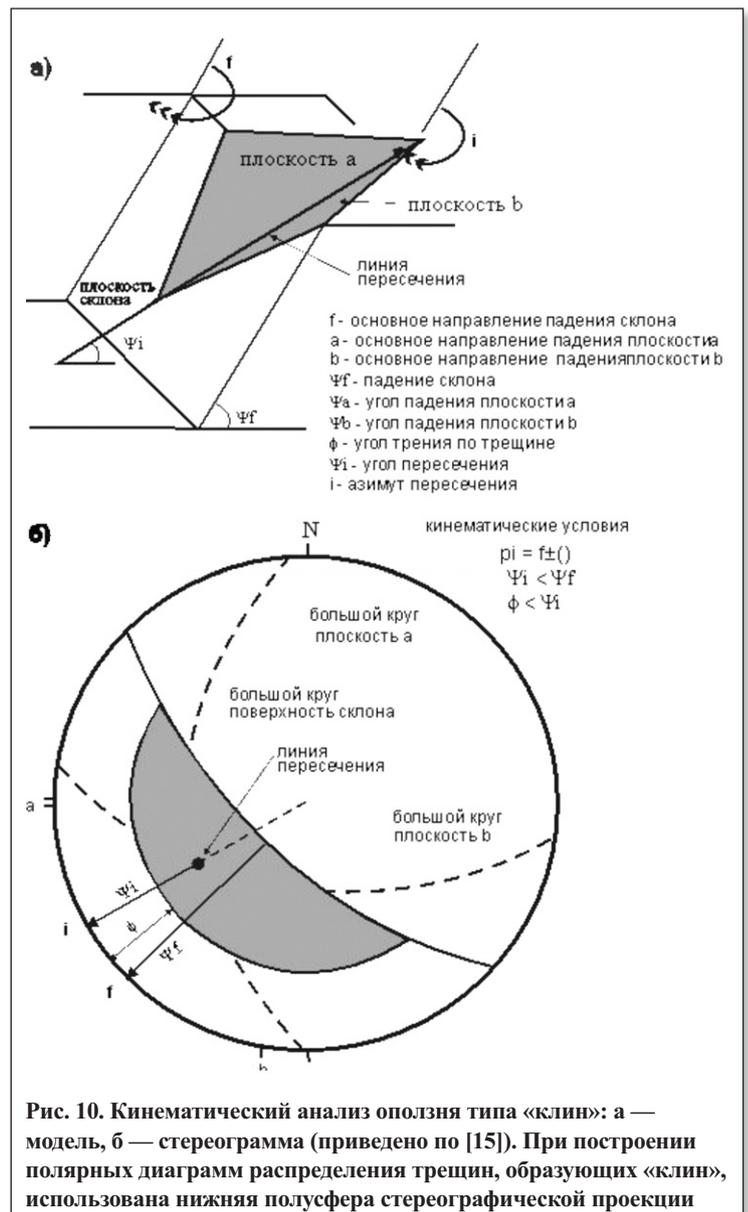


Рис. 10. Кинематический анализ оползня типа «клин»: а — модель, б — стереограмма (приведено по [15]). При построении полярных диаграмм распределения трещин, образующих «клин», использована нижняя полусфера стереографической проекции

## Заключение

Оползни в скальных горных породах («скальные оползни») следует рассматривать как самостоятельный класс оползневых процессов. Существенное влияние на развитие скальных оползней оказывают существующие в склоновом массиве неоднородности (в виде различного типа и генезиса поверхностей раздела), во многих случаях предопределяющие условия формирования зоны основных деформаций и механизм развития смещений на начальной стадии. Выполненный анализ геоструктурных особенностей склонов, слагаемых скальными образованиями, и учет влияния физико-механических характеристик скальных грунтов позволяют выделить 3 типа, 11 подтипов и несколько разновидностей условий формирования зон основных деформаций скальных оползней на начальном этапе смещений и сформулировать основные подходы к схематизации скальных склонов при количественной оценке их устойчивости. Типизация расчетных схем, базирую-

щихся на рассмотрении формирования зон деформаций, позволяет говорить о четырех основных видах расчетных схем, реализуемых с использованием нескольких критериев прочности: Мора — Кулона, Хоека — Брауна и Бартон — Бандиса.

Численные эксперименты по количественной оценке устойчивости показали важность учета изменчивости свойств грунтов, слагающих скальные склоны, при расчете их устойчивости. Недочет при количественной оценке устойчивости склонов анизотропии свойств скальных грунтов, игнорирование изменчивости свойств грунтов по поверхностям раздела (например, по зонам трещиноватости, секущим склон (в том числе не полностью) приводят к существенному завышению (до 25–32% (!), в зависимости от метода расчета) получаемых значений  $K_{уст}$ , что может стать причиной неверной оценки инженерно-геологической ситуации.

Вместе с тем, несмотря на очевидность полученных выводов, в современных нормативных доку-

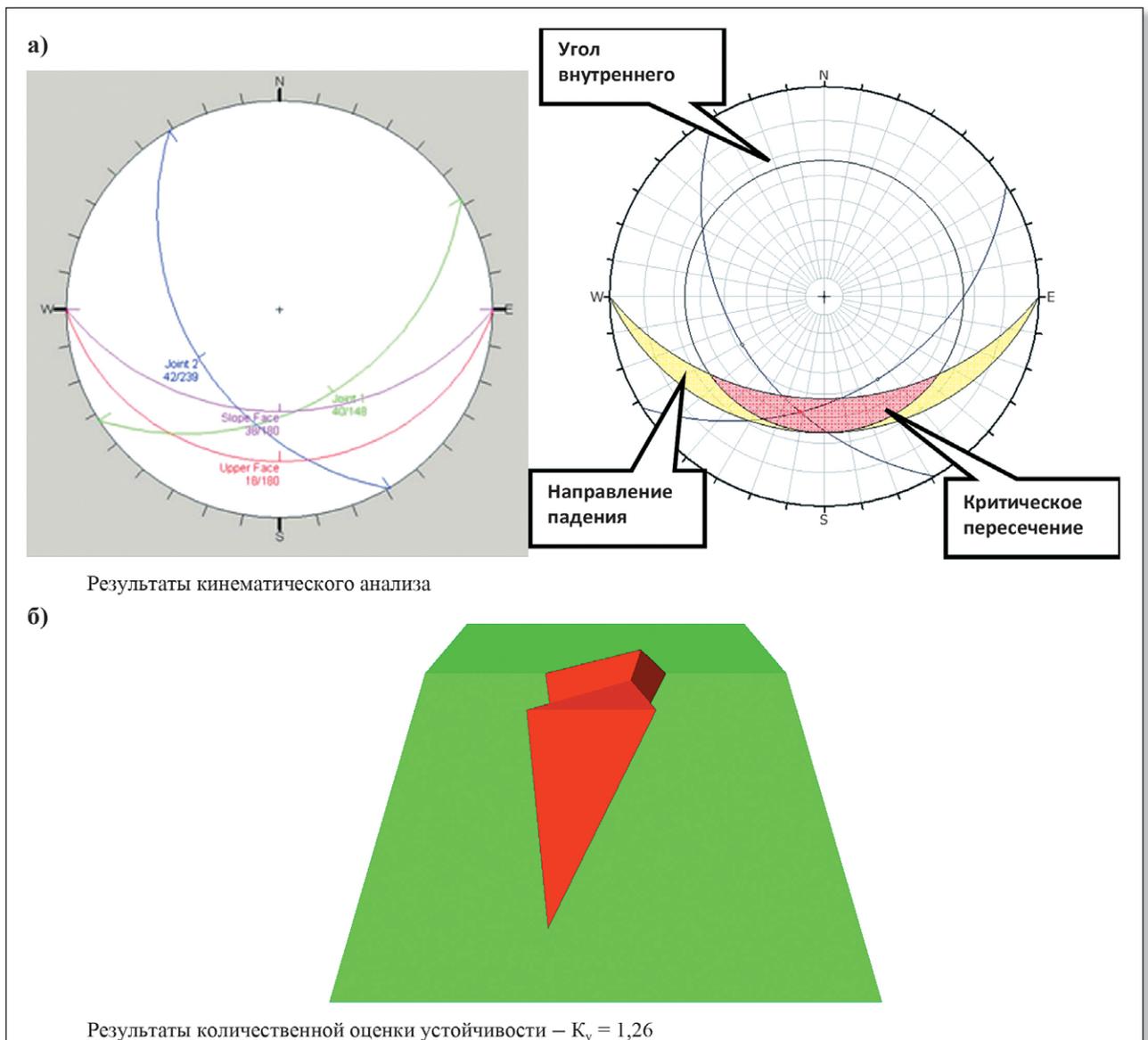


Рис. 11. Результат оценки устойчивости склона методом «расчета объемных скальных блоков» — подтип I.4 по условиям формирования зоны основных деформаций скальных оползней (согласно представленной типизации). При построении полярных диаграмм распределения трещин, образующих «клины», использована нижняя полусфера стереографической проекции

ментах, регламентирующих выполнение инженерных изысканий (в том числе в актуализированных редакциях):

- отсутствует четкое отражение особенностей склоновых деформаций в скальных массивах;
- отсутствуют дополнительные требования к проведению количественной оценки устойчивости склонов, слагаемых скальными горными породами, в том числе:
  - а) требования по применению специальных методов расчетов, например метода «расчета объемных скальных блоков»;
  - б) требования по учету изменчивости свойств скальных грунтов как в массиве, так и в зонах трещиноватости.

Указанное требует уделить этим вопросам дополнительное внимание при выполнении работ по дальнейшей актуализации строительных норм и правил, что, в свою очередь, должно основываться на результатах исследований специфических особенностей, принципов и закономерностей формирования и механизма смещения оползней в скальных горных породах («скальных оползней»).

Подводя итог выполненному анализу и рассмотрению полученных результатов, можно сделать основной вывод, что без понимания механизма, структуры и роли ослабленных зон в устойчивости склона любые количественные оценки устойчивости скальных склонов будут некорректными, что в конечном итоге может привести к ошибочной оценке инженерно-геологической ситуации. Исходя из полученных результатов тестовых расчетов устойчивости, представляется, что наиболее перспективным при количественной оценке устойчивости скальных склонов является применение анизотропной модели при использовании методов предельного равновесия, но при обязательном условии (!) — закрытой трещиноватости. При использовании метода конечных элементов при оценке устойчивости скальных склонов желательно задание условий трещиноватости массива для получения более реалистичных результатов. Метод «расчета объемных скальных блоков» хорошо «работает» при открытой трещиноватости с четко выраженными системами трещин, разделяющими массив на крупные блоки. Однако в случае высокой раздробленности массива данный подход следует признать неприемлемым. 🌐

# ГЕОТЕХНИКА

Журнал для изыскателей, проектировщиков и строителей

Цель журнала — ознакомление российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники

Периодичность в 2016 году:  
**6 номеров**

Стоимость годовой подписки:  
**3900 рублей**  
[info@geomark.ru](mailto:info@geomark.ru)



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов С.К., Глазов Н.В., Романов А.В., Трупаков Н.Г.* Противооползневые сооружения. Исследование и проектирование. М.-Л.: Стройиздат, 1940. 200 с.
2. *Аникин И.В.* К вопросу о классификации оползней // Сб. тр. Хабаров. ин-та инж. ж/д. трансп. 1957. № 11. С. 129–139.
3. *Богданович К.И.* Несколько замечаний о геологических условиях сооружения Черноморской железной дороги от Туапсе до Ново-Сенак // Тр. II Всеросс. съезда деятелей по практической геологии и разведочному делу. СПб.: Тип. Биркенфельда, 1913. Вып. 1. С. 79–90.
4. *Газиев Э.Г.* Принципы и методы расчета устойчивости скальных откосов различного строения // Инженерная геология. 1979. № 1. С. 60–69.
5. *Газиев Э.Г., Речицкий В.И.* Вероятностная оценка надежности скальных массивов. М.: Стройиздат, 1985. 104 с.
6. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Стандартиформ, 2013. 16 с.
7. *Демин А.М.* Оползни в карьерах // Матер. совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними. Киев: Изд-во Киевск. ун-та, 1964. С. 335–337.
8. *Егоров А.Я.* Структурно-тектонические особенности формирования откосов карьера Коашва в Хибинах // Инженерная геология. 1990. № 5. С. 45–55.
9. *Зеркаль О.В., Фоменко И.К.* Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 44–50.
10. *Клевцов И.А.* Оползни Северного Кавказа, их типы, условия образования и меры борьбы с ними // Оползни и борьба с ними: тр. Сев.-Кав. науч.-произв. семинара по изучению оползней и опыта борьбы с ними. Ставрополь: Ставро. кн. изд-во, 1964. С. 85–133.
11. *Крауч С., Старфилд А.* Методы граничных элементов в механике твердого тела. М.: Мир, 1987. 327 с.
12. Методика инженерно-геологических исследований высоких обвальных и оползневых склонов / под ред. Г.С. Золотарева и М. Янича. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 184 с.
13. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости // Сборник нормативных материалов по маркшейдерскому и геологическому обеспечению горных работ в угольной отрасли России. М.: ИПКОН, 1998. С. 558–686.
14. *Могилевская С.Е.* Влияние морфологии поверхности трещин в горных породах на сопротивляемость сдвигу трещиноватых скальных пород по ослабленным поверхностям // Тр. ВНИИГ, 1972. Т. 99. С. 140–155.
15. *Пендин В.В., Фоменко И.К.* Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
16. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. СПб.: Гос. НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела — Межотрасл. науч. центр ВНИМИ, 1998. 208 с.
17. Рекомендации по расчету устойчивости скальных откосов: П-843-86. М.: Гидропроект, 1986. 51 с.
18. *Саваренский Ф.П.* Опыт построения классификации оползней // Тр. I Всесоюзного оползневого совещания. Л.-М.: ОНТИ, 1935. С. 29–37.
19. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2003. 93 с.
20. СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения (актуализированная редакция СНиП 22-02-2003). М.: Минрегион России, 2012. 60 с.
21. СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). М.: Минрегион России, 2012. 116 с.
22. *Федоренко В.С.* Горные оползни и обвалы, их прогноз. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 214 с.
23. *Чернышев С.Н.* Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. М.: Недра, 1984. 111 с.
24. *Barton N.R.* From empiricism, through theory, to problem solving in rock engineering // Harmonising Rock Engineering and the Environment / Q. Qian, Y. Zhou, eds. London: Taylor&Francis Group, 2011. P. 3–14.
25. *Barton N.R., Bandis S.* Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice // Rock joints: Proc. Int. Symp. on Rock Joints / N. Barton, O. Stephansson, eds. Rotterdam: Balkema, 1990. P. 603–610.
26. *Barton N.R., Choubey V.* The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice // Rock Mechanics, 1977. V. 10. № 1-2. P. 1–54.
27. *Crowdury R., Flentje P., Bhattacharya G.* Geotechnical Slope Analysis. London: CRC Press/Balkema, 2010. 737 p.
28. *Giani G.P.* Rock Slope Stability Analysis. Rotterdam: Balkema, 1992. 374 p.
29. *Goodman R.E., Bray J.W.* Toppling of rock slopes // Proc. ASCE Specialty conference on rock engineering for foundation and slopes. New York: Am. Soc. Civ. Eng., 1976. V. 2. P. 201–234.
30. *Hoek E., Bray J., Boyd J.* The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1973. V. 6. № 1. P. 22–35.
31. *Hoek E., Bray J.W.* Rock Slope Engineering / 3<sup>rd</sup> ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 358 p.
32. *Hoek E., Brown E.T.* Underground Excavation in Rock. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. 527 p.
33. *Hoek E., Caranza-Torres C.T., Corcum B.* Hoek-Brown failure criterion-2002 edition // Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMS-TAC'2002). Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002. V. 1. P. 267-273.
34. *Hungr O., Leroueil S., Picarelli L.* Varner classification of landslide types, an update // Landslides and Engineering Slopes: Protecting Society through Improved Understanding. London: Taylor&Francis Group, 2012. V. 1. P. 47–58.
35. *Markland J.T.* A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected // Imperial College Rock Mechanics Research Report. 1972. № 19. 10 p.
36. *Patton F.D.* Multiple models of shear failure in rock // Proc. 1<sup>st</sup> Internat. Congr. on Rock Mechanics. Lisbon. 1966. V. 1. P. 509–513.
37. *Stead D., Wolter A.* A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology // Journal of Structural Geology. 2015. V. 74. P. 1–23.
38. *Turner A.K., Schuster R.L.* Landslides: investigation and mitigation. Washington: National Academy Press, 1996. 673 p.
39. *Wyllie D.C., Mah C.W.* Rock Slope Engineering: civil and mining / 4<sup>th</sup> ed. London: Spon Press/Taylor&Francis Group, 2010. 431 p.

# ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ», «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,  
«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



Реклама

## Стоимость годовой подписки на журналы (через редакцию) с учетом почтовых расходов и НДС

- «Инженерные изыскания» (14 номеров) – 9660 рублей.
- «Инженерная геология» (6 номеров) – 3600 рублей.
- «Геориск» (4 номера) – 2400 рублей.
- «Геотехника» (6 номеров) – 3900 рублей.

**Полный комплект журналов — 19560 рублей.**

ОТДЕЛ ПОДПИСКИ  
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ

**+7 (495) 210-89-92**

PR@GEOMARK.RU  
WWW.GEOMARK.RU

## Подписку на журналы можно оформить через подписные агентства

Оформление подписки на журналы возможно через агентства «Роспечать» и «Урал-пресс». Стоимость подписки устанавливается агентствами самостоятельно и может отличаться от стоимости, указанной редакцией.

### Подписные индексы ОАО «Агентство "Роспечать"»

«Инженерные изыскания»	71509
«Инженерная геология»	36611
«ГеоРиск»	71510
«Геотехника»	22780

Подписку через агентство «Урал-пресс» можно оформить на официальном сайте — [www.ural-press.ru](http://www.ural-press.ru)