© А.М. Гальперин, 2006

УДК 624.131.1:622.2

А.М. Гальперин

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Семинар № 1

Отмечается целесообразность использования обратных оползневых расчетов карьерных откосов для определения показателей сопротивления сдвигу пород в массиве, а также обратных расчетов характеристик деформируемости намывных отложений.

Отмечается целесообразность натурного определения физико-механических свойств песчано-глинистых пород бортовых и отвальных массивов с помощью мобильных установок комплексного зондирования.

Основное внимание уделено гидрогеомеханическим исследованиям намывных горнотехнических сооружений, как объектам повышенной экологической опасности.

В XX в. промышленно-технологическая революция привела к глобальному вмешательству человека в наиболее консервативную часть окружающей среды – литосферу. Геологическая деятельность человека стала сопоставимой с природными геологическими процессами. Это дало основание В.И. Вернадскому еще в 1925 г. заявить, что человек своей научной мыслью создает «новую геологическую силу». Подтверждением этому может служить тот факт, что в настоящее время при строительстве и добыче полезных ископаемых человек перемещает в год более 100 млрд. т горных пород, что примерно в 4 раза больше массы материала, переносимого всеми реками мира.

Высокий удельный вес открытого способа разработки месторождений России свидетельствует о сохранении этого генерального направления развития горнодобывающих отраслей промышленности для обеспечения топливом и минеральным сырьем потребностей энергетики, черной и цветной металлургии, химической индустрии, строительства, машиностроения, вычислительной техники, коммунально-бытового и сельского хозяйства. При этом воздействие на окружающую среду современных карьеров и техногенных массивов приобретает региональный характер, учитывая объемы водопонизительных работ, перемещаемых и вовлекаемых в деформации породных масс, земель, нарушаемых объектами горного производства.

Закономерное увеличение глубины и объемов открытых горных работ и, как правило, усложнение геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий разработки определяют качественно новый подход к обеспечению устойчивости бортов глубоких карьеров и высоких отвалов. Эффективность открытой разработки связана с решением таких проблем, как охрана водно-земельных ресурсов, увеличение полноты извлечения запасов полезных ископаемых из недр, сокраще-

ние затрат на вскрышные и отвальные работы, ускоренное восстановление нарушенных территорий.

По мере роста глубины горных работ инженерно-геологическая ситуация осложняется, а процессы изменения этой ситуации становятся более быстротечными и сопровождаются качественно новыми проявлениями, нарушающими безопасность горных работ и состояние окружающей среды. В связи с этим оценка инженерно-геологической си-туации, прогнозирование и разработка способов управления ее развитием предусматривают решение следующих основных задач: изучение механических свойств и структурно-механических особенностей массивов пород; исследование и прогнозирование механических процессов в массивах при производстве горных работ и возможных проявлений этих процессов («проявлений горного давления»); управление состоянием массивов, включая разработку способов контроля этого состояния с учетом вида и характера горных работ.

При инженерно-геологическом и геомеханическом обосновании горно-технологических решений с целью обеспечения экономичности и безопасности открытых разработок необходимо учитывать:

- изменение прочностных и деформационных свойств пород с глубиной;
- изменение положения откосов во времени и пространстве в связи с динамикой горных работ;
- влияние геолого-структурных особенностей на перераспределение напряжений и локализацию деформаций в бортовых массивах;
- усиление роли гидродинамических факторов и, соответственно, предварительного осушения породного массива;
- возрастающие требования повышения полноты извлечения .запасов полезных ископаемых из недр, охраны водно-земельных ресурсов и ускоренного восстановления нарушенных территорий.

Профессорами В.А. Мироненко и В.М. Шестаковым (1974) создано научное направление – гидрогеомеханика, в рамках которого с единых методологических позиций осуществляется «совместное и взаимоувязанное рассмотрение закономерностей механики грунтов и фильтрации подземных вод … применительно к задачам гидрогеологии и инженерной геологии в рамках одной научной дисциплины».

Задачи гидрогеомеханики в горном деле рассмотрены в многочисленных публикациях В.А.Мироненко, его коллег и последователей [1-5]. Выполненный В.А. Мироненко гидрогеомеханический анализ охватывает три главных аспекта влияния подземных вод на устойчивость откосов карьеров и отвалов – изменение напряженного состояния массива, процессы механического выноса и изменение прочностных свойств пород. Для оценки устойчивости обводненных откосов В.А. Мироненко предложен принцип сведения объемных гидродинамических сил к эквивалентным контурным, благодаря которому силовое воздействие подземных вод учитывается наиболее просто – через значения пьезометрической высоты по контуру оползающего блока. Этот эффективный расчетный прием широко используется также при оценке устойчивости откосных сооружений гидроотвалов и хвостохранилищ.

Объектами гидрогеомеханических исследований кафедры геологии МГИ-МГГУ являлись отвальные насыпи смешанных пород на слабых водонасыщенных основаниях (КМА, Кузбасс и др.), подвергавшиеся депрессионному уплот-

нению вследствие глу-бокого водопонижения надрудные толщи месторождений КМА и Запорожского железорудного узла, намывные техногенные массивы гидроотвалов и хвостохранилищ различных горнопромышленных регионов.

Обеспечение долговременной устойчивости бортов карьеров и отвальных массивов песчано-глинистых и полускальных пород должно базироваться на установлении взаимосвязей динамики горных работ и геомеханических процессов депрессионного уплотнения, снижения прочности и развития сдвиговых деформаций пород в карьерных откосах, уплотнения отвальных насыпей и гидроотвалов.

Для получения необходимых расчетных характеристик следует отдавать предпочтение натурным наблюдениям. Большое значение при этом имеет решение обратных задач с целью установления роли отдельных факторов, определения расчетных параметров и законов изучаемых процессов по результатам натурных экспериментов.

Таким образом, речь идет об использовании (в комплексе с другими методами) натурного моделирования, представляющего собой (по Н.В. Мельникову) специально поставленное исследование объекта познания в его естественной среде при подобных или измененных в нужном направлении условиях.

Для уточнения первичной информации при строительстве и эксплуатации карьеров необходима постановка широкого комплекса наблюдений и натурных экспериментов, обеспечивающих непрерывность проектирования и принятие оптимальных решений по управлению откосами на различных этапах освоения месторождения.

Уточнение физико-механических свойств пород и контроль устойчивости откосных сооружений представляется целесообразным осуществлять как с помощью стационарной наблюдательной сети так и с применением установок, позволяющих получать информацию о состоянии пород в откосах в любой момент времени и на любом участке.

Опыт выполнения обратных геомеханических расчетов характеристик длительной прочности и сдвиговой ползучести глинистых пород бортовых массивов карьеров КМА, а также характеристик уплотняемости тонкодисперсных намывных отложений гидроотвалов отражен в докладе представителей кафедры геологии МГГУ на симпозиуме по геотехнике и охране окружающей среды (А.М. Гальперин, А.Ю. Панфилов, 2005).

Последние 15 лет основными объектами гидрогеомеханических исследований кафедры геологии являлись намывные техногенные массивы гидроотвалов карьеров КМА и хвостохранилищ горнорудных предприятий в различных регионах (КМА, Кольский п-ов, Якутия).

Среди природно-технических систем эти объекты занимают особое место, что связано с концентрацией в них значительных объемов водонасыщенных техногенных отложений – отходов обогащения полезных ископаемых и гидровскрыши. Отрицательное воздействие гидроотвалов, хвостохранилищ, шламохранилищ на окружающую среду выражено в изменении природного ландшафта, загрязнении воздушного бассейна, влиянии на режим и характеристики подземных водоносных горизонтов, а также возможных изменений химического состава воды и воздуха в хвостохранилищах.

В целях обеспечения промышленной и экологической безопасности намывных горнотехнических сооружений в

МГИ-МГГУ проводились работы по следующим основным направлениям:

- разработка расчетных схем и инженерных решений задач уплотнения намывных массивов на различных стадиях их формирования;
- инженерно-геологическое районирование, предусматривающее оценку уплотняемости и несущей способности различных зон и участков намывных массивов;
- изыскание новых способов ускорения процесса консолидации тонкодисперсных намывных отложений;
- определение рациональной конструкции дамб гидросооружений;
- установление рациональной формы техногенного рельефа намывных территорий с учетом остаточных осадок;
- контроль состояния возводимых объектов, включающий стационарные и мобильные устройства, наземную и аэрофотограмметрическую съемку для систематической оценки устойчивости дамб, степени уплотнения и несущей способности внутренних зон намывных сооружений.

В натурных условиях механические свойства техногенных отложений гидроотвалов и хвостохранилищ изучались путем измерений порового давления, испытаний методами вращательного среза и прессиометрическим, инструментальных наблюдений за осадками намывных массивов и их оснований.

Кафедрой геологии МГИ-МГГУ внедрены в практику мониторинга намывных горнотехнических сооружений систематические замеры порового давления с помощью стационарных датчиков и штанговых пьезодинамометров конструкции Гидропроекта, а после 1974 г. – специальных комбинированных зондов.

В последние 20 лет на гидроотвалах разрезов Кузбасса крупномасштабные работы по обоснованию параметров ограждающих дамб и отвальных насыпей на намывных основаниях выполнялись лабораторией гидрогеологии ВНИМИ [4].

Натурные измерения порового давления и осадок позволили уточнить параметры нелинейной консолидации намывных грунтов с учетом реальных условий массива гидроотвала. При обратных расчетах использовались инженерные методы прогноза уплотнения намывных тонкодисперсных толщ, соответствующие различным этапам их формирования. Сочетание замеров осадок и порового давления позволяет определять по натурным данным, как коэффициент консолидации, так и приведенный коэффициент сжимаемости намывных грунтов. Полученные из обратных расчетов характеристики использовались для проверки прямых задач, позволивших установить хорошую сходимость расчетных и натурных значений порового давления и степени уплотнения слоев тонкодисперсных пород. Выявлен характер изменчивости параметров нелинейной консолидации и сопротивления сдвигу для намывных масс пляжных, промежуточных и прудковых зон.

С 1995 г. при полевых работах МГГУ используется модификация лег-кой зондировочной установки (ЛЗУ) ВНИМИ (автор конструкции Ю.И. Кутепов). С помощью ЛЗУ становится возможным опробование труднодоступных гидроотвальных участков с несущей способностью $P_{доп} \geq 0.013$-0.015 МПа.

В ближайшей перспективе необходимо использование современных зондировочных установок, обеспечивающих оперативное получение информации о состоянии техногенных массивов.

Комплекс показателей, полученных при полевых и лабораторных исследованиях техногенных отложений, позво-

ляет выполнить инженерно-геологическое районирование намывных территорий. Материалы районирования, наряду с инженерно-геологическими картами и разрезами, включают также для различных по мощности и составу зон намывного массива таблицы значений во времени осадок и допустимых внешних нагрузок на намывное основание. Инженерно-геологическое районирование выполняется с целью решения следующих основных практических задач: повышения вместимости сооружения при гидравлической укладке складируемых материалов; формирования на территории заполненного гидроотвала «сухих» отвалов; рекультивации намывных территорий.

Отсутствие надежного гидрогеомеханического обоснования технологии формирования гидроотвалов и хвостохранилищ приводит к аварийным ситуациям, которые создают угрозу для жизни людей, приводят к заилению глинистыми или токсичными пульпами плодородных земель, загрязнению поверхностных и подземных вод. Аварии на намывных горнотехнических сооружениях могут повлечь за собой техногенные катастрофы регионального уровня (Стебниковский ГХК, 1983 г., Качканарский ГОК, 1999 г., золотоперерабатывающее предприятие, Румыния, 2000 г. и др.), которые можно было бы предупредить при наличии надежной наблюдательной сети и соответствующих технических средств.

Необходимость проведения оперативного контроля состояния намывных массивов подтверждена российскими законодательными актами и нормативными документами: Федеральными Законами «Об экологической экспертизе» (1995), «О безопасности гидротехнических сооружений» (1997), «О промышленной безопасности производственных объектов» (1997), «Правилами безопасности при эксплуатации хвостовых, шламовых и гидроотвальных хозяйств», разработанными НИИ ВИОГЕМ и Госгортехнадзором России и введенными в действие в 1997 г.

Для подготовки документов о консервации гидроотвала «Березовый Лог» как ответственного гидротехнического сооружения выполнены следующие основные работы: оценка устойчивости дамб гидроотвала; определение осадок намывного массива; зондирование прудковой зоны комбинированными зондами для пределения сопротивления намывных отложений сдвигу и пенетрации, а также величины порового давления в намывном массиве.

Деформации (осадки) намывного массива мощностью до 75 м определялись с помощью инструментальных наблюдений по продольному и поперечным профилям. Установлено, что за период 1988-2005 гг. осадки стабилизировались практически на всей территории гидроотвала. Данные зондирования позволили установить несущую способность намывного массива и уточнить характеристики сжимаемости техногенных отложений. Комплекс маркшейдерских и инженерно-геологических работ обеспечил получение необходимой информации для составления проекта консервации гидроотвала и его рекультивации. В третьей секции гидроотвала, где намывной массив сложен тонкодисперсным материалом ($d<0,005$мм), осадки техногенной толщи общей мощностью до 30 м (10 м – пористый штамп из хвостов обогащения, 20 м – глинисто-меловые намывные грунты) за этот период составили около 2,5 м.

Состояние откосных сооружений эффективно контролируется комплексным зондированием приоткосных зон и

данными стационарных датчиков-пьезодинамометров, заложенных по расчетным профилям в теле и основании дамбы на различных этапах формирования намывного массива. Датчики позволяют измерять давление воды в раздельнозернистых и глинистых (тонкодисперсных) отложениях, тогда как традиционные пьезометры предназначены для определения высоты водяного столба лишь в раздельнозернистых породах.

Текущий коэффициент запаса устойчивости дамб определяют в зависимости от площади эпюры давления воды путем снятия с пьезодинамометров показаний, приводимых к вероятной поверхности скольжения.

В 1999-2005 гг. такая система контроля была внедрена на головной дамбе хвостохранилища Михайловского ГОКа (оборудовано два измерительных профиля), на действующем гидроотвале и хвостохранилище Лебединского ГОКа и проведены подготовительные работы по ее внедрению на объектах Стойленского ГОКа.

Рассмотренные методы мониторинга позволяют оперативно получать информацию о состоянии намывного массива и откосных сооружений, на основании которой возможно с высокой степенью вероятности прогнозировать состояние гидроотвалов и хвостохранилищ, оценивать степень их воздействия на окружающую среду и принимать действенные решения по использованию намывных сооружений и снижению вредного влияния объекта на экологическую обстановку в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гальперин А.М.* Геомеханика открытых горных работ. – М.: Изд. МГГУ, 2003, 473 с.
2. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Основы гидрогеомеханики. – М.: Недра, 1974. 336 с.
3. *Мироненко В.А., Стрельский Ф.П.* Практическое применение принципов гидрогеомеханики в целях повышения промышленной и экологической безопасности горных работ // Инженерная геология, 1989, № 5, с. 3-14.
4. *Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А.* Техногенез намывных отложений. Геоэкология, 2003, № 5, с. 405-413.
5. *Galperin A.M., Panvilov A.Yu.* Back calculation for the determination of strength and deformational characteristics of soils in open-pit slopes and hydrofilled structures. Proc. Of the Int. Workshop in Geoinvironment and Geotechnics. Milos, Greece, Sept. 2005, pp. 131-136.

Коротко об авторах

Гальперин Анатолий Моисеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии, Московский государственный горный университет.

© В.В. Гладышев, 2006

УДК 658.511:550.8

В.В. Гладышев

МЕТОДЫ ТЕКУЩЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Семинар № 1

Прогнозирование геологических показателей, осуществляемое в системе мониторинга горных предприятий, можно разделить на три вида [2]: текущее, оперативное и долгосрочное. Текущее прогнозирование проводится на весьма короткий последующий период эксплуатации (до нескольких месяцев) в связи с развитием хода горных работ и изменениями их технологии, а также в связи с изменениями водохозяйственной и климатической обстановки.

Оперативное прогнозирование проводится систематически по результатам ежегодной эксплуатации на кратковременный (1–3 года) период. Долгосрочное прогнозирование осуществляется при выявленных неблагоприятных тенденциях изменения состояния геологической среды, а также в связи с долгосрочными планами развития горных работ.

К методам текущего прогнозирования геологических показателей в системе мониторинга горных предприятий целесообразно отнести: методы статистической экстраполяции, методы регрессии, а также метод Бокса-Дженкинса.

Методы статистической экстраполяции основываются на предсказании стационарных процессов по их вероятностным характеристикам и на экстраполяции тенденций нестационарных и периодических случайных процессов. Собственно прогнозированию должно предшествовать построение вероятностных моделей. Эмпирическим материалом для построения моделей служат динамические ряды, получаемые в результате достаточно длительных наблюдений и систематических измерений на прогнозируемом объекте или аналогичных ему.

Предсказание стационарных случайных процессов в простейших случаях осуществляется по последнему значению или по математическому ожиданию. Прогнозирование по первому из этих способов предусматривает принятие в качестве предсказанного последнего из предшествующих ему фактических значений динамического ряда. Подобный прием допустим лишь для очень незначительных периодов прогнозирования; надежность получаемых на его основе прогнозов обычно невелика.

Прогнозирование стационарных процессов путем экстраполяции математического ожидания заключается в распространении математического ожидания, оцененного по динамическому ряду предшествовавших значений, на период прогнозирования. Располагая статистическими оценками математического ожидания и среднего квадратического отклонения, можно определить доверительный интервал, в пределах которого с заданной вероятностью находится средняя.

В данном случае, так же как и в предыдущем, предсказание значений осуществляется без учета времени прогнозирования. Надежность прогнозов невысока, а их результаты могут распространяться лишь на весьма ограниченный период за пределами наблюдений [6].

Более состоятельными и надежными являются прогнозы стационарных процессов, получаемые с учетом значений

их предыстории, вероятностных характеристик и времени прогнозирования. Математический аппарат разработан А.Н. Колмогоровым [3] для стационарных случайных последовательностей и обобщен А. М. Ягломом [7] для однородных случайных полей. Методы оптимальной статистической интерполяции получили дальнейшее развитие благодаря трудам Ж. Матерона [4], который применил так называемый крайгинг при оценке показателей в недрах.

Рассматриваемая проблема формируется как задача оценки среднего значения случайной функции, которая может быть решена в общем виде методами корреляционного или структурного анализа. Пусть известны значения реализации стационарной случайной функции $f(M)$ в точках $M_1, M_2, \ldots, M_n$ и требуется найти эффективную оценку среднего значения $f(M)$ в некотором объеме V

$$\text{ƒ}= \frac{1}{V}\int_V f(M)dV\ , \qquad (1)$$

используя всю имеющуюся информацию, и определить погрешность полученной оценки.

Если замеры $f_i = f\ (M_i)$ произведены таким образом и в таком количестве, что позволяют оценить корреляционную функцию $K\ (r)$, то коэффициенты p_i линейной оценки

$$\text{ƒ}= \sum_{i=1}^{n} p_i f_i \qquad (2)$$

находятся с помощью формул

$$p_i = \sum_{j=1}^{n-1} R_{ij}^{-1} A_j\ ,\ i=1,\ 2,\ \ldots,\ n-1;$$

$$p_n = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} p_j\ , \qquad (3)$$

где R_{ij}^{-1} – элементы матрицы, обратной матрице R, и введены следующие обозначения:

$$R_{ij} = K_{ij} + K_{nn} - K_{ni} - K_{nj}\ ;$$

$$A_j = K_{Vj} - K_{Vn} + K_{nn} - K_{nj}\ ; \qquad (4)$$

$$K_{Vj} = \frac{1}{V}\int_V K(r_j)dV\ ;$$

$$K_{ij} = K(r_{ij}),$$

где r_{ij} – расстояние между точками M_i и M_j ; r_j – расстояние между точкой M с текущими координатами и точкой M_j.

Коэффициенты p_i, определяемые формулами (3), есть коэффициенты крайгинга в геостатистической теории. Дисперсия оценки при этом определяется выражениями

$$\sigma^2{}_n = K_{VV} + K_{nn} - 2K_{Vn} - \sum_{j=1}^{n-1} p_j A_j\ ; \qquad (5)$$

$$K_{VV} = \frac{1}{V^2}\int_V \int_V K(r')dVdV'\ ,$$

где r' – расстояние между двумя точками с текущими координатами, принадлежащими объему V.

Коэффициенты точечного крайгинга определяются по уравнениям (3) с заменой $K_{Vi} \rightarrow K_{li}$ и $K_{VV} \rightarrow K_{ll}$, если находится оценка показателя в точке M_l. Таким образом, общее решение (2) - (5) может быть использовано для прогнозирования значений геологических показателей в системе мониторинга горных предприятий.

При использовании компьютерных технологий нахождение оценок по формулам (2) - (5) значительно упрощено. Для этого необходимо иметь стандартные программы для вычисления обратных матриц и кратных интегралов. В геостатистике используются не экспериментальные оценки корреляционной функции или полувариограммы $\gamma(r) = K_0 - K(r)$, а их теоретические модели, качеством «подгонки» к которым экспериментальных данных определяется эффективность использования крайгинга.

Текущее прогнозирование геологических показателей может быть сведено к одномерной статистической экстраполяции по прошлым значениям динамического ряда. Пусть для определенности

задан временной ряд среднесуточных значений какого-либо геологического показателя $C_1, C_2, \ldots, C_n$. Требуется прогноз $\check{C}_{n+1}$ вперед с упреждением на j суток. В соответствии с общим подходом имеем

$$\hat{C}_{n+j} = \sum_{i=1}^{n} p_i C_i \ . \qquad (6)$$

Благодаря «эффекту экранирования» большинство p_i в формуле (6) практически равны нулю и можно ограничиться небольшим числом слагаемых, близких к концу временного ряда. Для практических целей достаточно ограничиться тремя слагаемыми, тогда

$$\hat{C}_{n+j} = (1 - p_{n-1} - p_{n-2})C_n + p_{n-1}C_{n-1} + \\ + p_{n-2}C_{n-2} \ . \qquad (7)$$

Как показал анализ большого числа динамических рядов, при интервале дискретности $t_0 << \tau_0$, где τ_0 – интервал корреляции, корреляционная функция может быть аппроксимирована выражением

$$K(t) = \sigma_0^{\,2}\left[1 - \left|\frac{t}{\tau_0}\right|^k\right], \qquad (8)$$

где k — обычно находится в пределах 0–2.

Учитывая явный вид автокорреляционной функции $K(t)$, с помощью (3) и (5) находим:

$$p_{n-1} = \frac{2A_1 - A_2}{4 - 2^k}\ ;$$

$$p_{n-2} = \frac{-A_1 + 2^{1-k}A_2}{4 - 2^k}\ ; \qquad (9)$$

$$\sigma_3^{\,2} = \sigma_0^{\,2}(j\frac{t_0}{\tau_0})^k(2 - p_{n-1}A_1 - p_{n-2}A_2),$$

где

$$A_1 = 1 + j^k - (1 + j)^k\ ,$$

$$A_2 = 2^k + j^k - (2 + j)^k\ .$$

Приведенное решение справедливо лишь при краткосрочном прогнозировании, т. е. при $jt_0 < \tau_0$. В противном случае необходимо заново подобрать аналитическую модель $K(t)$ и привлечь для оценки большее число членов ряда. При увеличении j оптимальная оценка стремится к обычному статистическому прогнозу с помощью математического ожидания, при этом все $p_i = 1/n$.

Следует иметь в виду, что надежная оценка вероятностных характеристик случайных процессов по отдельным динамическим рядам, а соответственно и эффективное использование для прогнозирования методов случайных функций реальны лишь в тех случаях, когда исследователь располагает большим количеством наблюдений, относящихся к длительному периоду времени.

Прогностическая экстраполяция тенденций нестационарных процессов возможна в тех случаях, когда на том или ином отрезке будущего времени интересующий нас параметр будет относительно плавно изменяться под действием тех же и так же влияющих на него природных и прочих факторов, что и в прошлом времени, на протяжении которого получен исходный динамический ряд. Если указанное условие не соблюдается и обнаруживается заметное изменение тенденции во времени, описывающее эту тенденцию уравнение может уточняться путем применения следующих приемов [6]: а) отсечения членов динамического ряда, характеризующих «устаревшие» тенденции и получения аппроксимирующей функции для оставшейся части этого ряда; б) переоценки параметров аппроксимирующей функции с учетом устаревания данных; в) корректировки параметров уравнений посредством изменения величины свободного члена, изменения угла наклона прямой, растягивания или сжимания аппрокси-мирующей кривой и т. п.

На всех стадиях прогнозирования по методу статистической экстраполяции

выполнение формальных математических операций должно осуществляться в тесном сочетании с содержательным анализом исходных дан-ных, вероятностных характеристик параметров статистических моделей случайных процессов, доверительных интервалов и т. п. Необходимо глубокое осмысление причин и характера изменения геологических показателей во времени при всестороннем учете теоретических представлений о природе и механизме прогнозируемых процессов, присущих им тенденций, интенсивности действия факторов, а соответственно и особенностей протекания процессов за пределами динамического ряда.

Группу методов регрессии можно выделить с некоторой долей условности, поскольку регрессия как закономерное изменение условного математического ожидания одной величины в зависимости от значений одной или нескольких других величин используется и при экстраполяции динамических рядов.

Из приведенного определения регрессии следует, что как средство прогнозирования геологических показателей в системе мониторинга горных предприятий она может использоваться в тех случаях, когда исходные и подлежащие предсказанию сведения об объекте поддаются количественному выражению. Подобные обстоятельства могут иметь место лишь в случаях, когда для интересующего нас момента будущего времени теми или иными способами установлены значения параметров, с которыми достаточно тесно коррелирован параметр, подлежащий прогностической оценке.

Основу прогностической регрессии составляет построение и использование уравнений парной, а чаще множественной связи. Построение уравнений осуществляется на основе обучающих выборок объектов, для которых известны количественные оценки как исходных независимых переменных (аргументов), так и подлежащих прогнозированию зависимых переменных. Объем обучающей выборки должен обеспечивать получение представительных статистических оценок зависимых и независимых переменных.

Применительно к процедуре прогностической регрессии должны использоваться принципы предварительного выделения, последующей оценки и окончательного отбора показателей. Предварительное выделение потенциально существенных показателей должно осуществляться на базе содержательного анализа представлений о природе и причинной обусловленности параметров, подлежащих прогнозированию. Основными критериями последующего отбора независимых параметров следует считать наличие достаточно тесной корреляционной связи между этими параметрами и зависимыми (с позиций прогнозирования) переменными, а также максимальную достоверность оценки последних. Поскольку процедура оценки и отбора факторов с учетом названных и ряда других существенных критериев весьма трудоемка, для решения этой задачи широко используются компьютерные технологии. Успешно применяются программы, основанные на принципах случайного поиска с адаптацией, линейного программирования, а также ряд других программ, базирующихся на последовательном составлении наборов показателей и оценки их суммарной информативности с помощью специальных показателей качества обучения и др. Одной из наиболее эффективных является программа, основанная на принципе эвристической самоорганизации. Ее сущность заключается в построении частных уравнений зависимости интере-

сующего нас показателя y от отдельных аргументов. Качество таких частных уравнений связи оценивается по точкам некоторой проверочной последовательности, предварительно выделяемой из состава эмпирической выборки. Критерием качества служит величина средней квадратической погрешности. Из «лучших» частных уравнений определяются промежуточные аргументы, по которым строится новая серия частных уравнений. Затем вновь производится оценка качества уравнений, отбор лучших из них и т. д. до тех пор, пока средняя квадратическая погрешность не перестанет уменьшаться. Как только это происходит, промежуточные аргументы в «лучшем» уравнении последней серии заменяются значениями из уравнений предыдущих серий и т. д. до тех пор, пока не получится зависимость y от исходных аргументов. Члены, отвечающие несущественным факторам, из итогового уравнения автоматически исключаются.

Для количественной оценки относительной значимости отдельных факторов и относящихся к ним параметров x_i, входящих в уравнение множественной регрессии $y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, рекомендуется использовать значения показателя влиятельности Q_i [5]:

$$Q_i = \frac{(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, x_{i\max}, \ldots, \bar{x}_n) - f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, x_{i\min}, \ldots, \bar{x}_n)}{\bar{y}} \qquad (10)$$

где $x_{i\,max}$ и $x_{i\,min}$ – экстремальные значения параметра x_i; $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_n$ – средние значения параметров, характеризующих другие факторы; $\bar{y}$ – значение функции при средних значениях аргументов.

Итак, показатель влиятельности представляет собой относительное изменение прогнозируемого показателя, которое может произойти при максимально возможном изменении параметра, характеризующего интересующий нас фактор, при средних значениях всех прочих параметров.

Собственно прогнозирование по методам регрессии сводится к подстановке известных значений независимых переменных в уравнение корреляционной связи и вычислению математического ожидания подлежащего прогнозированию показателя. Однако эта операция еще не завершает процедуру прогнозирования, поскольку точечная оценка зависимой переменной сама по себе недостаточно характеризует те случайные значения, которые параметр может принять в действительности вследствие неизбежных отклонений от идеализированного выражения связи. Для перехода от точечных к более предс-тавительным интервальным прогнозным оценкам показателя необходимо определять доверительные интервалы. Вопросы построения и геологической интерпретации доверительных интервалов для уравнений множественной регрессии (поверхностей трен-да) рассматриваются в руководствах по статистическому моделированию.

При использовании методов регрессии следует иметь в виду, что экстраполяция данных за пределы результатов наблюдений, по которым получено уравнение связи, может, строго говоря, осуществляться лишь при наличии убедительных доводов в пользу того, что за этими пределами сохраняется форма связи. В общем случае ошибки, связанные с изменением тенденции, возрастают тем больше, чем большая экстраполяция допускается при прогнозировании. Однако ограниченная экстраполяция нередко дает приемлемые результаты и в тех случаях, когда гипотеза о сохранении формы взаимосвязи строго не сформулирована и не проверена. В подобных случаях, по Е. М. Четыркину, приходит-

ся руководствоваться соображением, что «лучше плохая мера, чем отсутствие какой-либо меры вообще» [6].

Мерой состоятельности и достоверности вероятностных прогнозов, основанных на методах регрессии, могут служить значения коэффициентов парной или множественной корреляции между независимыми и зависимыми параметрами, а также значения средних случайных или средних квадратических погрешностей оценки параметров, получаемые при проверке прогнозов на контрольных выборках. С учетом характера решаемых задач прогнозы, дающие среднюю относительную погрешность порядка 30 – 50 %, могут относиться к ориентировочным, а при меньшей погрешности – к условно достоверным.

В последнее время, преимущественно в связи с задачами экономики, получили развитие различные методы краткосрочного прогнозирования динамических последовательностей на основе анализа временных рядов. Для рассматриваемых вопросов наибольший интерес представляет **методика Бокса – Дженкинса**, подробно изложенная в работе [1]. Экспериментальные оценки корреляционной функции здесь используются непосредственно при построении модели временного ряда. Тем самым исключается субъективный подход при интерпретации изменчивости показателя. Инструментом прогноза здесь служит обобщенная модель авторегрессии – скользящего среднего *АРСС (p, q)*:

$$x_n = \varphi_1 x_{n-1} + \varphi_2 x_{n-2} + \ldots + \varphi_p x_{n-p} + \\ +\varepsilon_n - \theta_1 \varepsilon_{n-1} - \theta_2 \varepsilon_{n-2} - \ldots - \theta_q \varepsilon_{n-q}, \quad (11)$$

где $x_i = C_i - \bar{C}$ (C_i – член динамического ряда какого-либо геологического показателя, $\bar{C}$ - среднее значение динамического ряда); $\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_p$ – параметры авторегрессии; $\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_q$ – параметры скользящего среднего; ε_i – белый шум.

Наиболее сложным в методике является идентификация модели и точное оценивание ее параметров. После того как это проведено и осуществлена диагностическая проверка, прогнозы с упреждением на *j* шагов проще всего осуществлять рекурсивно, используя разностное уравнение (11).

Теоретический анализ различных методов прогнозирования не позволяет сделать вывод о предпочтительном выборе того или иного метода в каждом конкретном случае. Как показывают расчеты по большому числу месторождений, точность прогнозов по методу Бокса – Дженкинса, как правило, выше, чем по любому другому методу, что позволяет использовать его как эталонный метод. Однако сложность вычислительных процедур при построении модели, а также неоднозначность идентификации порядка модели ограничивают область применимости метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М., «Мир», вып. 1, 1974.
2. *Ермолов В.А.* Геология. – М., Изд-во МГГУ, ч. 2, 2005.
3. *Колмогоров А.Н.* Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. – Изв. АН СССР. Сер. матем., № 1, 1941.
4. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. – М., «Мир», 1968.
5. *Смирнов Б.В.* Теоретические основы и методы прогнозирования горно-геологических условий добычи полезных ископаемых по геологоразведочным данным. – М., «Недра», 1976.
6. *Четыркин Е.М.* Статистические методы прогнозирования. – М., «Статистика», 1977.
7. *Яглом А.М.* Введение в теорию стационарных случайных функций. – Успехи математических наук, т.VII, вып. 5, 1952.

Коротко об авторах

Гладышев Владислав Владимирович – аспирант кафедры геологии, Московский государственный горный университет.

© А.Ю. Панфилов, 2006

УДК 624.131.1:624.137.2

А.Ю. Панфилов

ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Семинар № 1

Обратные расчеты выполняются с использованием контуров оползневых призм на момент деформации откосов. Принятая методика определения длительной прочности основывается на учете изменения природного сопротивления сдвигу по поверхности скольжения во времени. Составными частями методики являются, во-первых, определение природной сдвиговой прочности путем обратных расчетов оползней участков уступов, имевших различные высоту H_y, угол откоса α и время устойчивого их существования, и, во-вторых, нахождение закономерности изменения сдвиговой прочности во времени $c = f(t)$. Для выделенных комплексов глинистых пород, имеющих относительно изотропные механические свойства при отсутствии ярко выраженных структурных поверхностей ослабления, путем лабораторных испытании определяются показатели механической прочности на сдвиг φ_o и c_o, которые характеризуют собой условно-мгновенную (природную) прочность исследуемых пород. Путем решения обратных оползневых задач при $\varphi = const$ определяется ряд значений c для различных промежутков времени t.

С учетом незначительного изменения величины угла внутреннего трения в процессе сдвига, используется формула в виде:

$$C_t = c_0 – (c_0 - c_\infty)\, t_p/(T_p+t_p) \qquad (1)$$

где c_o — мгновенная (природная) прочность грунта на сдвиг; c_t — прочность грунта на сдвиг в момент времени нарушения устойчивости; $C\infty$ — длительная прочность; T_p — параметр длительной прочности.

Данная зависимость позволяет определить параметры длительной прочности глинистых пород.

Построение графиков в координатах ($t/(c_0-c_t)$; t), изображенных на *рис.1*, соответствует преобразованию уравнения *(1)* в линейное уравнение:

$$\frac{t_p}{c_0 - c_t} = \frac{T_p}{c_0 - c_\infty} + \frac{1}{c_0 - c_\infty} t_p \qquad (2)$$

Из формулы *(2)* и *рис.1* следует, что параметры длительной прочности будут равны:

$$c_0 - c_\infty = \frac{1}{tg\alpha} \qquad (3)$$

$$T_p = \frac{AO}{tg\alpha}$$

(4)

Для удобства принимаем c_0-c_∞=1/a. Нахождение коэффициентов линейного уравнения производим способом наименьших квадратов.

При расчете длительной прочности апт-неокомских глин значения сцепления c_t определялись для откосов, продолжительность существования которых с момента их формирования до оползня составляла от 0,5 до 32,5 месяцев. Расчеты выполнялись с использованием геометрии оползневой призмы, смоделированной по данным аэрофотограмметрической съемки в программе Surfer. При расчетах принято $\varphi = 20^o$.

Получена зависимость:

$$c_t = 0,43 - 0,33 \frac{t_p}{0,545 + t_p}, \qquad (5)$$

которая позволяет прогнозировать величину сопротивления сдвигу на любое время. При расчете длительной прочности келловейских глин сцепление c_t рассчитывалось для откосов, простоявших до деформации от одного месяца до двух лет. Принято $\varphi = const = 16°$.

Уравнение длительной прочности для келловейских глин, таким образом, запишется в виде:

$$c_t = 0,75 - 0,51 \frac{t_p}{0,464 + t_p} \qquad (6)$$

По данной методике рассчитывались параметры длительной прочности для суглинков МГОК. При расчете длительной прочности суглинков сцепление c_t рассчитывалось для откосов, простоявших до деформации от одного месяца до двух лет. По данным расчетов, для зон, нарушенных ложбинами стока принимаем $\varphi = const = 12^0$. Уравнение длительной прочности для суглинков (нарушенные зоны), запишется в виде:

$$c_t = 0,32 - 0,22 \frac{t_p}{0,128 + t_p} \qquad (7)$$

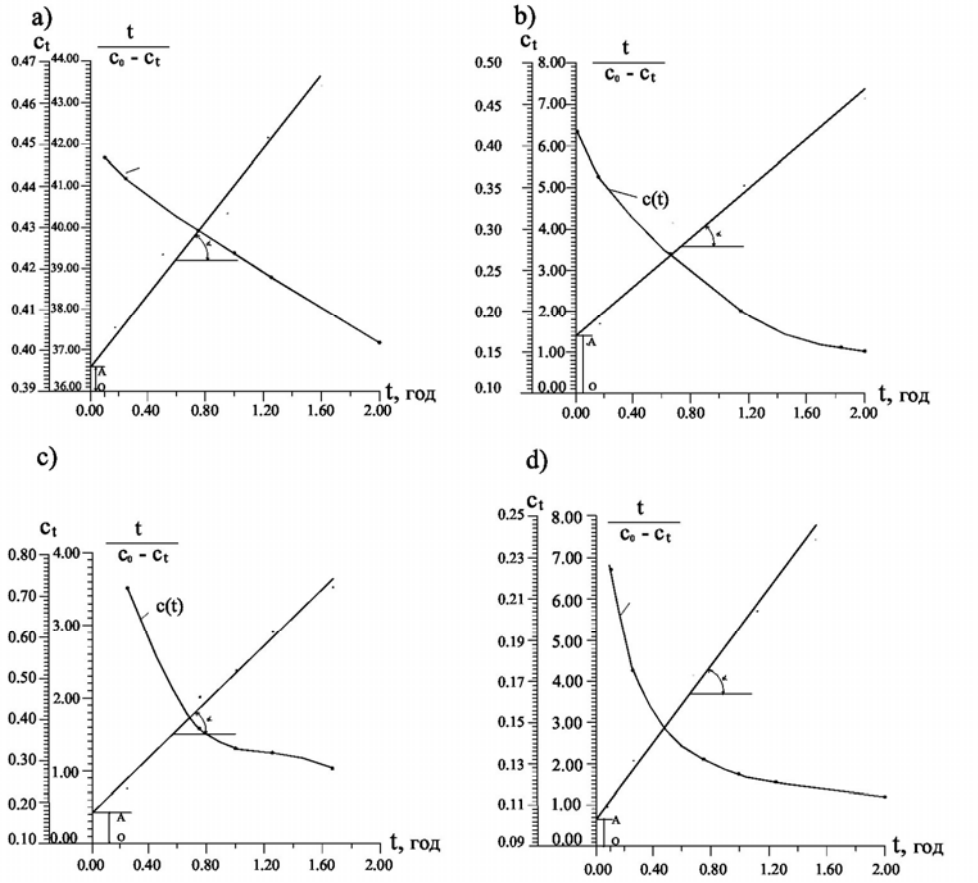


Рис. 1. Зависимости изменения прочности во времени соответственно a,b,c,d – суглинков в ненарушенных зонах, апт-неокомских глин в ненарушенных зонах, келловейских глин в ненарушенных зонах, суглинков в нарушенных зонах: C_0, C_t – соответственно условно-мгновенное и остаточное сцепление на момент времени *t*

Для ненарушенных зон φ = const = $=24^0$. Уравнение длительной прочности для суглинков (ненарушенные зоны), запишется в виде:

$$c_t = 0,45 - 0,25\frac{t_p}{8,26 + t_p} \qquad (8)$$

С использованием результатов обратных расчетов и прессиометрических испытаний построены графики сопротивления сдвигу апт-неокомских и верхнеюрских глин для различных моментов времени. Период от момента формирования откоса до достижения сцепления апт-неокомских и верхнеюрских (волжско-келловейских) глин величины c_∞ с достаточной для инженерных целей точностью может быть принят соответственно равным 5 и 10 лет.

Определены значения η_T и η_p из формул:

$$\frac{\dot{u}_T}{\tau} = \frac{1}{\eta_T}\tau^{-\delta}; \quad \frac{\dot{u}_p}{\tau} = \frac{1}{\eta_p}\tau^{-\delta} \qquad (9)$$

Рассмотрены результаты инструментальных наблюдений за смещениями реперов, заложенных по двум профильным линиям на площадке уступа северного борта карьера Михайловского ГОКа, сложенного келловейскими глинами. На графиках смещений реперов во времени четко фиксируются моменты t_T и t_p, что позволяет определить скорости смещений $\dot{u}_p$ и $\dot{u}_T$. Построение кривых скольжения в массиве откоса производилось по методике ВНИМИ.

Результаты натурных исследований пород вскрышной толщи Михайловского месторождения КМА обобщены в сводной инженерно-геологической колонке (рис. 2).

Определение прочности пород на сдвиг в массиве производится на момент достижения предельного равновесия по сформированной поверхности скольжения, а также путем расчета удерживающих и сдвигающих сил в пределах выделенных элементарных блоков и их разности по всей поверхности скольжения.

Оползневое тело разбивается на продольные и поперечные блоки. Сдвигающие и удерживающие силы по блокам рассчитываются в программном пакете «UST», разработанном на кафедре геологии МГГУ, при этом вывод информации производится последовательно по блокам. В выводном файле представлены пять столбцов, в которых обозначаются соответственно: удерживающие и сдвигающие силы для каждого блока, разности этих сил для каждого блока, суммарное значение удерживающих и сдвигающих сил по всем блокам в профиле и разность этих значений. Общая площадь поверхности скольжения определяется по методике [1] в программном пакете Surfer.

Использование объемной задачи позволило уточнить значение C_∞ для нарушенных зон в суглинках МГОК, которое составило $C_\infty = 0{,}1 \cdot 10^{-1}$ МПа. Уточнено также значение угла внутреннего трения φ_∞ и установлено значительное его уменьшение по сравнению с его начальным значением для зон, нарушенных ложбинами стока (24° для ненарушенных зон и 12° для нарушенных зон). На основе плана изомощностей оползневого тела определено изменение некомпенсированного оползневого давления по фронту оползня с учетом реальной геометрии ложа и поверхности оползневого тела. Величина некомпенсированной реакции E_i в основании уступа

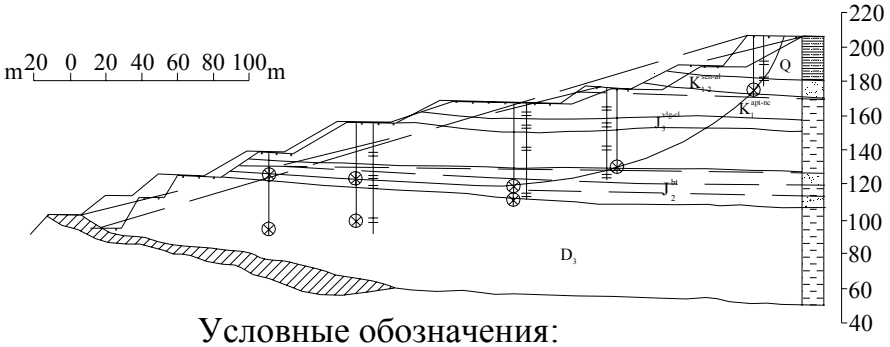
$$E_i = \frac{\eta \cdot P_i \sin\alpha_i - P_i \cos\alpha_i tg\varphi_i}{\cos\delta_i + \sin\delta_i \cdot tg\varphi_i} + E_{i-1} \quad (10)$$

где P_i - масса пород в пределах блока; α_i - угол наклона основания блока; $\delta_i = \alpha_i - \alpha_{i+1}$ - угол наклона реакции к основанию i–го блока.

Результаты ранее выполненных исследований МГИ и ВИОГЕМ уточнены с учетом пространственного положения поверхностей ослабления в бортовом массиве для определения реологических параметров глинистых пород при наличии или отсутствии погребенных ложбин стока, подземных гряд или обводненных литологических контактов. Определение реологических параметров глинистых пород с учетом влияния петрогенетических и экзогенно-гравитационных структурных элементов массива позволило получить исходные данные для дифференцированной оценки устойчивости откосов в пределах карьерного поля.

Полученные предельно-длительные значения характеристик сопротивления сдвигу использованы при определении

Схематический разрез восточного борта карьера МГОК



Условные обозначения:

- Поверхностные реперы
- Глубинные радиоактивные реперы
- Скважины прессиометрического зондирования
- Проектный контур борта карьера
- Рекомендуемый контур борта карьера
- Статический и динамический уровни подземных вод

Инженерно-геологическая колонка

Возраст пород	литологическая колонка	мощность слоя,м	краткое описание пород	γ тн/м^3	W %	Δ тн/м^3	C_0 кг/см^2	C_∞ кг/см^2	φ град	T_p лет	η_p $\frac{кг\ сут}{см^2\ мм}$	δ
Q		15	суглинок буровато-серый, пылеватый, лессовидный	1,93	18	2,68	0,32	0,20	24	0,142	0,267	0,85
K_{1-2}^{sen-al}		6	песок полимиктовый, разнозернистый	2,00	22	2,65	-	-	35	-	-	-
K_1^{apt-nc}		35	глина бурая, песчаная, тугопластичная	2,11	20	2,69	0,43	0,10	20	0,369	0,204	0,94
J_3^{vlg-cl}		20	глина буровато-коричневая, тугопластичная	2,08	16	2,72	0,75	0,24	16	0,207	0,162	1,00
J_2^{bt}		5	песок светло-серый, буровато-желтый, м/зернистый	1,90	24	2,76	-	-	35	-	-	-
		10	глина черная, плотная, пылеватая тугопластичная	2,00	26	2,71	1,30	0,80	22	0,186	0,115	1,00
		5	песок буровато-желтый, разнозернистый	1,90	24	2,76	-	-	35	-	-	-
D_3		50	глина пестроцветная, песчаная, тугопластичная	2,21	18	2,77	3,00	0,70	12	0,412	0,062	1,00

Рис. 2. Разрез восточного борта карьера и сводная инженерно-геологическая колонка вскрышной толщи Михайловского месторождения КМА

параметров пригрузочной призмы для обеспечения долговременной устойчивости откоса при $\eta = 1{,}2$.

Применяемая программа позволяет определять методом многоугольника сил массу пригрузки для отдельных расчетных призматических блоков через некомпенсированную реакцию из соотношения:

$$P=\frac{E}{tg\varphi_{\infty}} \qquad (11)$$

По результатам расчетов построены графики зависимости углов откосов от времени $\beta(t)$ при H = const для уступов в четвертичных суглинках, апт-неокомских и волжско-келловейс-ких глинах.

Применение предложенного метода расчета устойчивости откосов позволяет благодаря решению квазиобъемной задачи увеличить угол откоса гидровскрышных уступов в четвертичных отложениях на карьере Лебединского ГОКа с 30^0 (фактич.) до 34^0, что обеспечивает уменьшение затрат на гидровскрышные работы на стадии погашения (выходе на конечный контур борта) в размере 894 тыс.р. на километр фронта гидровскрышных работ.

Рассмотрен комплекс необходимых мероприятий в составе геомеханического контроля. С использованием результатов экспериментальных исследований процессов ползучести глинистых пород получены зависимости критических скоростей сдвиговых деформаций приоткосного массива от сдвигающих и нормальных напряжений по вероятной поверхности скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) *Панфилов А.Ю.* Компьютерная обработка съемки оползней на карьерах. Маркшейдерский вестник, 2004. №4, с.60-62.

2) *Galperin A.M., Panfilov A.Y.* Determination from back geomechanical calculations of strength and deformational characteristics of soils in open-pit slopes and hydrofilled massives. //Proceeding of the International Workshop in Geoenvironment and Geotechnics. Milos, Greece, 2005/Ed. Agioutantis Z. Heliotopos Conferences Ltd, Dafni, Athens, Greece, p.131-136.

Коротко об авторах

Панфилов А.Ю. – Московский государственный горный университет.