

УДК 004.42(047)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БОРТОВ КАРЬЕРА С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Исаева Г.С., Шамбетов З.С.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

1. Учет сейсмического воздействия

Была разработана методика учета сейсмического воздействия на устойчивость склонов и бортов карьера. Общий подход заключался в использовании представления возникновения неустойчивости склона и оползания части склона по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Это представление является наиболее часто используемым в литературе и на практике, в связи с физической обоснованностью и математической строгостью описания данного представления.

При учете сейсмического воздействия на устойчивость склонов наиболее распространенным подходом являлся подход, где принималось, что вес массива склона увеличивается на определенный множитель, описываемый как коэффициент сейсмичности, который, естественно, зависит от интенсивности сейсмического воздействия, выраженного в баллах.

Ниже приводится таблица со значениями коэффициента динамической сейсмичности [1].

Таблица 1 Динамические характеристики сейсмического воздействия в зависимости от интенсивности, выраженного в баллах.

Балльность	Коэффициент сейсмичности, μ	Скорость, 10^{-2} м/с	Ускорение, 10^{-2} м/с^2
4	0	0.5 - 1	7 – 12
5	0.005	1 - 2	15 – 25
6	0.01	2.1 – 4	26 – 50
7	0.025	4.1 – 8	51 – 100
8	0.05	8.1 – 16	101 – 200
9	0.10	16.1 – 32	201 – 400
10	0.25	32.1 - 64	401 - 800

Сущность определения устойчивости склона или борта карьера заключается в нахождении так называемого коэффициента устойчивости, который выражается отношением сил удерживающих склон от разрушения и сил сдвигающих, пытающихся этот склон разрушить. Обычно разрушение ранее устойчивого склона возникает из-за изменившихся физико-механических свойств массива, составляющего склон, либо склон разрушается под влиянием внешних факторов, либо под воздействием обеих причин одновременно.

Особая роль в изменении физико-механических свойств массива отводится атмосферным воздействиям, особенно осадкам, как в виде дождя, так и снега в холодное время года, а также воздействию грунтовых вод, при их наличии в массиве склона.

Внешнее воздействие характеризуется сейсмическим воздействием, являющимся значительным в сейсмоактивных регионах, к коим относится и территория Кыргызстана. Поэтому учет влияния сейсмического воздействия на устойчивость бортов карьера и склонов гор является необходимостью при расчете коэффициента

устойчивости, каким бы методом этот коэффициент устойчивости ни определялся [2].

Итак, при учете сейсмического воздействия на устойчивость склонов, принимается, что удельный вес пород составляющих склон увеличивается на коэффициент сейсмичности μ (таблица 1). Данный подход приводит при вычислении коэффициента устойчивости по круглоцилиндрической поверхности скольжения к увеличению сдвигающей силы. Однако, он также приводит к возрастанию удерживающей силы, поскольку в выражении для удерживающих сил входит нормальная компонента сил с весом пород склона умноженного на тангенс угла внутреннего трения материала пород массива. В случае значительной величины угла внутреннего трения, составляющая с его участием может вносить значительный вклад в силы препятствующие разрушению склона.

Наш подход, основанный на учете ускорений массива пород при прохождении сейсмической волны, позволяет более полно и физически более обоснованно подойти к вопросу сейсмического воздействия на устойчивость склона или борта карьера. При прохождении сейсмической волны массив склона подвергается сейсмическому ускорению. Это ускорение может быть направлено как в горизонтальном направлении, так и в вертикальном направлении. Поскольку рассматриваемые нами объекты, как правило, имеют размеры порядка сотни метров, то при прохождении сейсмической волны можно считать, что весь рассматриваемый нами объект - склон подвергается ускорению в одной фазе. То есть мы предполагаем, что весь массив как бы движется синхронно, как единое целое, не так чтобы отдельные его части подвергались бы различному ускорению, вплоть до того что один конец склона ускорялся в одном направлении, а другой в противоположном. Такое воздействие характерно для

намного более протяженных объектов, примерно составляющих размеры более одного километра.

Таким образом, сейсмическое воздействие учитывалось нами в форме дополнительного ускорения направленного либо горизонтально, либо вертикально. Естественно сейсмическая волна при прохождении изменяет направление ускорения в течение периода колебания волны. Поэтому встает вопрос о направлении ускорения, которое необходимо учитывать при вычислении коэффициента устойчивости склона. При рассмотрении горизонтального сейсмического ускорения, наибольшую опасность представляет направление ускорения в сторону от самого склона. Данное направление ускорения приводит как бы к отрыву части склона от основной его массы, что снижает устойчивость склона, противоположное ускорение, напротив как бы придавливает часть склона к основному массиву, приводя с очевидностью к увеличению коэффициента устойчивости склона. Исходя из этого, нами рассматривался случай, когда ускорение сейсмического воздействия направлено в сторону от основной массы массива.

Вертикальное направление ускорения сейсмического воздействия придает эквивалентное увеличение веса массива либо его снижение. В этом случае трудно однозначно ответить на вопрос о его воздействии на устойчивость склона, поскольку изменение веса массива приводит к соответствующим изменениям как в силах удерживающих массив, так и сдвигающих. Поэтому нами было принято, что вертикальное ускорение сейсмического воздействия будет учитываться как в положительном направлении, так и в отрицательном направлении.

Нами была поставлена задача расчета коэффициента устойчивости склона с учетом точного знания тензоров напряжений в рассматриваемом массиве. Для этой цели нами была разработана

методика расчета напряженно-деформированного состояния массива пород на основе метода конечных элементов [3], на ее основе составлена компьютерная программа [4,5], позволяющая рассчитывать смещения, тензоры деформации и тензоры напряжений в массиве пород. В отличие от методов (Феллениус, Бишоп, Янбу, и т.д.) опирающиеся на методику расчета сил смещающих и удерживающих массив с учетом только веса вышележащего массива [6], предлагаемая нами методика основанная на точном знании тензоров напряжений массива склона является физически более объективным и точным.

Таким образом, нами предложена методика расчета коэффициента устойчивости склона или борта карьера по круглоцилиндрической поверхности скольжения, основанной на точном знании тензоров напряжений в массиве пород, что позволяет более точно рассчитать коэффициент устойчивости борта карьера.

Ниже приводится схема учета сейсмического воздействия при вычислении коэффициента устойчивости борта карьера.

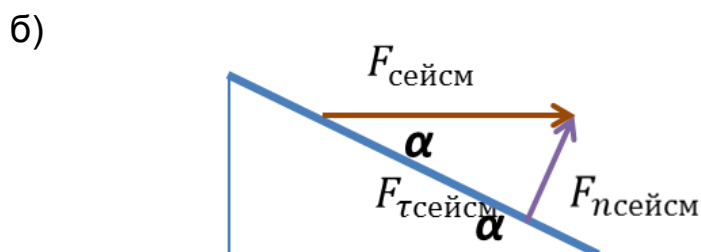
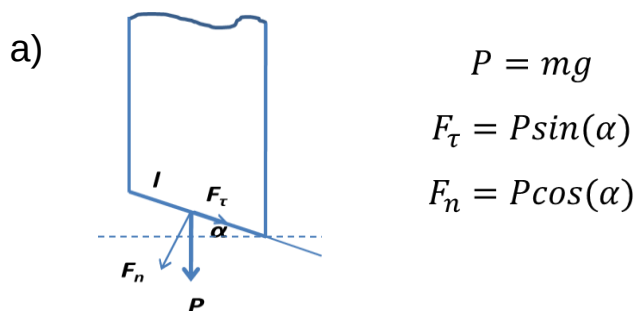
Коэффициент устойчивости склона вычисляется как отношение сил сдвигающих и удерживающих массив, по следующей формуле [7]:

$$K_{уст} = \frac{F_{удерж}}{F_{сдвиг}} = \frac{\sum(C * l + F_n * t * g \varphi)}{\sum F_{\tau}}, \quad (2.1)$$

где l - длина основания i -го элемента, φ и C – расчетные значения характеристик прочности грунта в пределах основания i -го элемента.

Нормальные и тангенциальные силы представим как величины, состоящие из двух слагаемых:

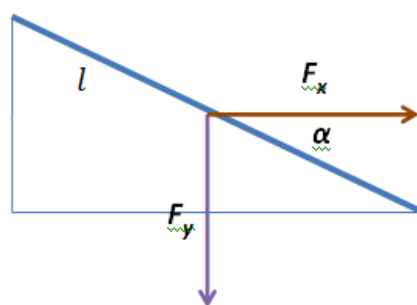
$$\begin{aligned} F_n &= F_{n0} + F_{nсейсм} \\ F_{\tau} &= F_{\tau0} + F_{\tauсейсм} \end{aligned} \quad (2.2)$$



$$F_{\text{сейсм}} = ma_{\text{сейсм}}$$

$$F_{t\text{сейсм}} = F_{\text{сейсм}} \cos(\alpha)$$

$$F_{n\text{сейсм}} = -F_{\text{сейсм}} \sin(\alpha)$$



$$F_x = (\sigma_{xx} \sin(\alpha) + \sigma_{xy} \cos(\alpha)) * l$$

$$F_y = (\sigma_{yy} \cos(\alpha) - \sigma_{xy} \sin(\alpha)) * l$$

$$F_t = F_x \cos(\alpha) + F_y \sin(\alpha)$$

$$F_n = F_x \sin(\alpha) + F_y \cos(\alpha)$$

2. Интерфейс программы расчета устойчивости склонов и бортов карьера по методу круглоцилиндрической поверхности скольжения

На рисунке 1 показан интерфейс разработанной программы расчета устойчивости склонов и бортов карьера по методу круглоцилиндрической поверхности скольжения. В программе предусмотрены различные алгоритмы расчета коэффициента устойчивости, выбор которых осуществляется пользователем в зависимости от предпочтений последнего. Надо отметить, что различные методы расчета устойчивости по круглоцилиндрической поверхности скольжения дают результаты отличающиеся максимум на 10%. Поэтому все расчеты, выполненные в данной работе были выполнены наиболее простым методом – методом Феллениуса.

Особенность метода заключается в том, что в нем используется равновесие моментов относительно центра окружности скольжения и взаимодействием между отсеками, на которые при расчете устойчивости подразделяется исследуемый склон, пренебрегается.

На рисунке 1 показаны элементы управления процедурой расчета: внесение начальных данных, как по свойствам массива склона, так и геометрических характеристик склона.

Основная характеристика геометрического характера заключается в задании профиля склона, поскольку расчет проводится в плоском, двумерном приближении. Из физико-механических свойств пород массива склона программа использует следующие свойства: плотность пород, сцепление, угол внутреннего трения. Это основные характеристики при расчете коэффициента устойчивости по методу круглоцилиндрической поверхности скольжения.

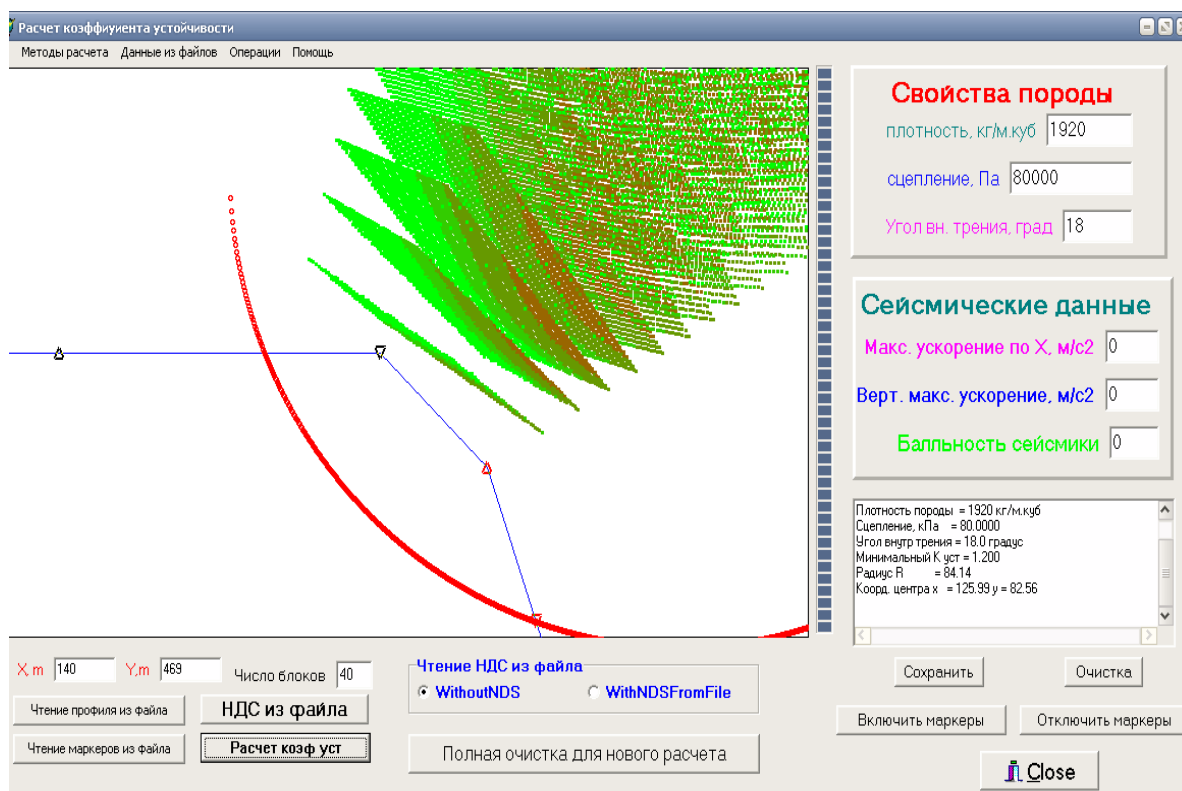


Рис. 1 - Интерфейс программы.

Кроме указанных основных характеристик массива пород требуется знать упругие свойства пород: модуль упругости Юнга – E и

коэффициент Пуассона – ν . Данные свойства пород массива необходимы при расчете напряженно-деформированного состояния массива пород склона.

На поверхности окна программы предусмотрены специальные области для внесения или изменения указанных выше характеристик и свойств. Также, при расчете коэффициента устойчивости склона при учете сейсмического воздействия предусмотрены поля внесения данных сейсмического воздействия: балльность землетрясения, величины ускорения и скорости сейсмического воздействия.

Имеется основное поле для показа процесса расчета коэффициента устойчивости, где демонстрируется радиус окружности скольжения с минимальным значением коэффициента устойчивости, а также показаны центры других окружностей, причем цвет этих точек зависит от соответствующего значения искомого коэффициента. Чем оно ниже, тем точка окрашена в более красный цвет. Если значения коэффициента больше единицы, центр соответствующей окружности окрашен в более зеленый цвет.

3. Результаты расчета устойчивости борта карьера в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия

Выполнен расчет коэффициента устойчивости склона в зависимости от угла наклона склона со следующими характеристиками. Плотность породы – 1920 кг/м^3 , Модуль упругости – 3500 МПа , коэффициент Пуассона – 0.25 , Сцепление – 80 кПа , угол внутреннего трения – 18° .

Из рисунка 2 видно, что с увеличением угла наклона склона коэффициент устойчивости уменьшается. Разница в значениях коэффициента устойчивости для расчета с использованием точных значений поля напряженно-деформированного состояния склона и

метода расчета устойчивости по круглоцилиндрической поверхности скольжения невелика.

Тенденции поведения их значений идентичны. Метод расчета устойчивости с использованием НДС склона дает несколько большие значения коэффициента устойчивости во всем диапазоне изменений угла наклона склона. Однако разница эта не превышает в максимальном различии 5%. Надо отметить, что коэффициент устойчивости для всех рассчитанных углов наклона склона имеет значение не менее единицы. То есть, для заданных параметров склона и свойств материала склон будет находиться в устойчивом состоянии для всех рассчитанных углов склона.

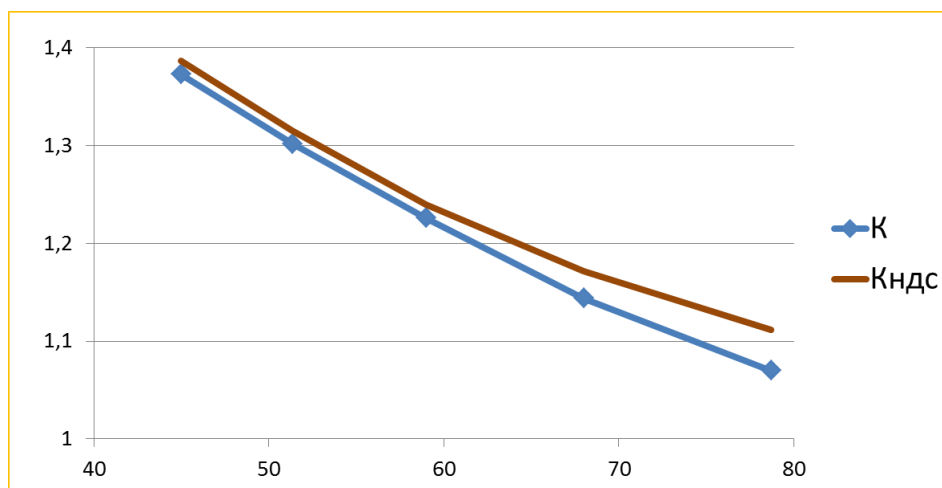


Рис. 2 - Коэффициент устойчивости склона в зависимости от угла наклона склона.

На рисунке 3 приведена полученная зависимость коэффициента устойчивости в зависимости от свойства пород – сцепления. Расчет был выполнен со следующими характеристиками. Угол наклона склона – 51° , Плотность породы – 1920 кг/м^3 , Модуль упругости – 3500 МПа , коэффициент Пуассона – 0.25 , угол внутреннего трения – 18° .

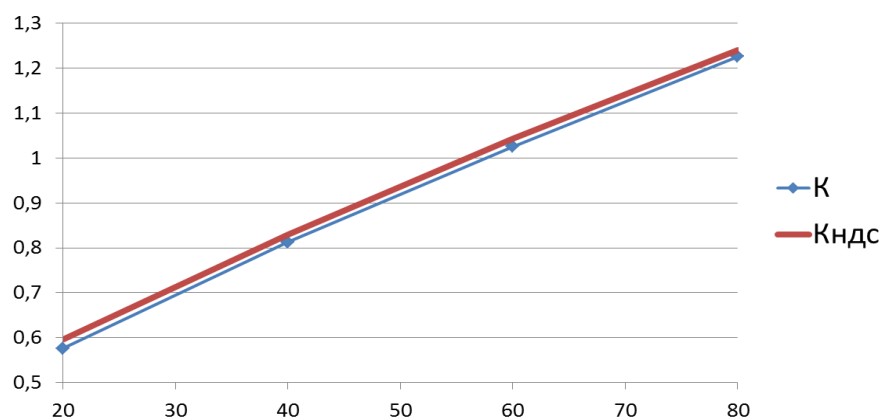


Рис. 3 - Коэффициент устойчивости склона в зависимости от коэффициента сцепления пород массива склона.

Как видно из рисунка, значение коэффициента устойчивости возрастает с увеличением значений сцепления. Если при значениях сцепления массива меньше 60кПа коэффициент имеет значения меньше единицы, то при значениях сцепления превышающих это значение коэффициент устойчивости превышает критическое значение равное единице. Это означает, что склон из неустойчивого состояния переходит в устойчивое. Надо полагать, что значение сцепления равное примерно 60кПа является критическим для заданных параметров расчета устойчивости склона. Как и было ранее отмечено, значения рассчитанных коэффициентов устойчивости склона с использованием точных значений напряженно-деформированного состояния массива дают очень близкие результаты с расчетами коэффициента устойчивости по круглоцилиндрической поверхности скольжения.

На рисунке 4 показаны результаты расчета коэффициента устойчивости склона при изменении балльности сейсмического воздействия на склон. Исходными данными для расчета были следующие характеристики склона: Угол склона – 51° , Плотность породы – 1920 кг/м^3 , Модуль упругости – 3500 МПа , Коэффициент Пуассона – 0.25 , Сцепление – 80 кПа , Угол внутреннего трения – 18° .

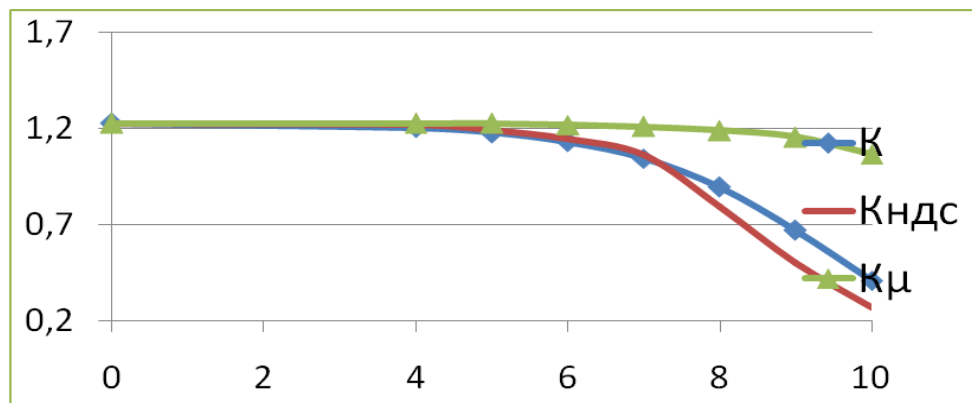


Рис. 4 - Коэффициент устойчивости склона в зависимости от величины сейсмического воздействия

Как видно из рисунка, вначале находящийся в устойчивом состоянии склон при увеличении сейсмического воздействия переходит в неустойчивое состояние. При заданных параметрах склона и свойств пород массива, этот процесс превращения устойчивого склона в неустойчивый происходит при сейсмическом воздействии на склон в семь баллов. Если значения балльности землетрясения ниже четырех, коэффициент устойчивости склона почти неизменен и снижается незначительно, не влияя на устойчивость.

После перехода в неустойчивое состояние при сейсмическом воздействии в семь баллов, склон резко теряет устойчивость, и снижение коэффициента устойчивости носит интенсивный характер. Граница в семь баллов сейсмического воздействия носит резко выраженный характер.

На рисунке 4 еще показано сравнение результатов расчета коэффициента устойчивости с ранее применявшимся методом (зеленая линия с треугольными маркерами), заключающийся в том, что при расчете устойчивости применялся так называемый коэффициент сейсмичности μ . Его роль заключалась в том, чтобы увеличить массу пород массива склона на этот коэффициент

сейсмичности. Причем существовала табулированная зависимость значений коэффициента сейсмичности от величины балльности землетрясения (таблица 1).

Как видно из рисунка 4 коэффициент устойчивости склона, полученный по указанному методу, уменьшает влияние на устойчивость сейсмического воздействия. Причем это снижение значительно, и фактически, если использовать данный метод учета сейсмического воздействия на коэффициент устойчивости, он не выходит на критическое значение ни при каких значениях балльности землетрясения, вплоть до величины в десять баллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработаны математические основы и методика расчета устойчивости склонов и бортов карьера с учетом сейсмического воздействия. На основе разработанной методики созданы:

1. Программа расчета напряженно-деформированного состояния массива борта карьера методом конечных элементов.
2. Программа расчета устойчивости борта карьера по круглоцилиндрической поверхности скольжения с учетом напряженно-деформированного состояния склона и сейсмического воздействия.
3. Получены результаты по расчету устойчивости борта карьера в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 14.13330.2014. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Дата введения 2014-06-01.

2. Фоменко И.К., Захаров В.С., Самаркин-Джарский К.Г., Сироткина О.Н. Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов (на примере Краснополянского геодинамического полигона) // Геориск. 2009. №4. С.50-55.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. - 392 с.
4. Исаева Г.С., Шамбетов З.С. Создание компьютерной программы для исследования устойчивости склонов и бортов карьеров. //Сборник трудов Международной конференции "Проблемы геомеханики и освоения недр". Бишкек, 2011.
5. Культин Н. Основы программирования в Delphi 7. - БХВ-Петербург, 2007. - 608 с.
6. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов /Пер. с англ. В.С. Забавина; Под ред. В.Г. Мельника. - М.: Стройиздат, 1988. 240 с.
7. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М: Недра, 1965. - 378с.