

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.271.333: 624.131.5

**С. М. Простов, Е. В. Костюков, С. П. Бахаева,
М. А. Кузнецов, Р. Ю. Сорокин, А. В. Щупаковский**

ПРОГНОЗ БЕЗОПАСНОГО СОСТОЯНИЯ НАМЫВНОГО МАССИВА УЧАСТКА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

С 2002 г. НФ "КУЗБАССНИИОГР" совместно с ГУ КузГТУ ведутся инструментальные геолого-геофизические и маркшейдерские наблюдения¹ за геомеханическими и гидродинамическими процессами, протекающими в массиве намыв-

серого цвета, плотными, полутордой консистенции.

Безопасное состояние массивов, сложенных слабыми водонасыщенными породами, определяют на основании расчетов устойчивости. В соответствии с нормативно-

сивов из слабых водонасыщенных пород определяют расчетами устойчивости методом алгебраического суммирования сил по наиболее напряженной криволинейной поверхности. Положение вероятной поверхности скольжения определяют

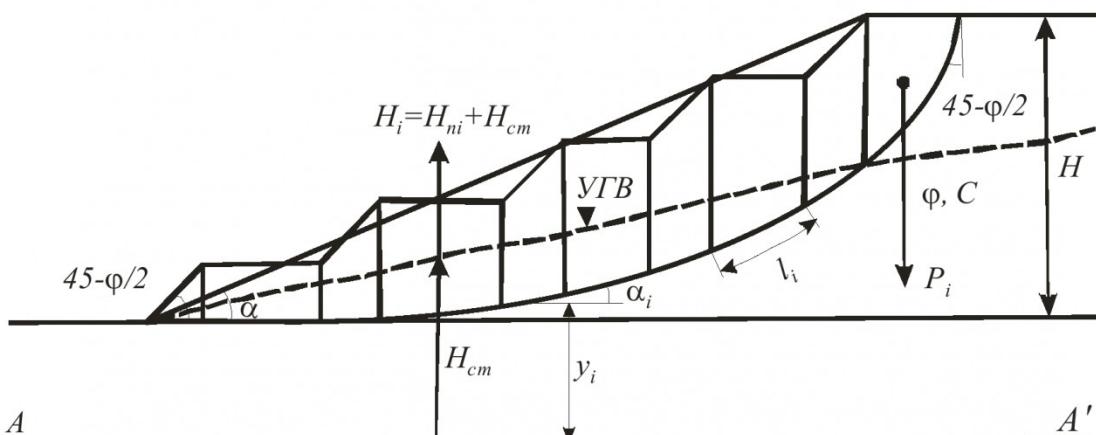


Рис. 1. Схема к расчету гидростатических и гидродинамических сил, действующих в пределах призмы обрушения: УГВ – уровень грунтовых вод; H_{ni} – избыточное поровое давление; H_{cm} – статический уровень напора; α – результирующий угол наклона откоса

ных глинистых пород гидроотвала №3 Кедровского угольного разреза и сооруженной на нем перемычки из насыпных пород [1]. Намывной грунт представлен двумя основными слоями влагонасыщенных суглинков: мягкой и тугопластичной консистенции; текуче- и текучепластичной консистенции. Верхний слой основания намывного массива сложен влагонасыщенными суглинками, аллювиальными

методическими документами величина коэффициента запаса устойчивости для намывных массивов должна составлять не менее 1,2 [2]. Несоответствие параметров откосов условиям устойчивости приводит к развитию оползней, которые по положению поверхности скольжения относительно основания делятся на подподошвенные, подошвенные и надподошвенные. Трем выделенным типам потенциальных оползней соответствуют расчетные схемы и методики расчета оптимальных параметров объекта.

Параметры намывных мас-

сивов из слабых водонасыщенных пород определяют расчетами устойчивости методом алгебраического суммирования сил по наиболее напряженной криволинейной поверхности. Положение вероятной поверхности скольжения определяют

следующими условиями (рис. 1): в верхней части откоса эта поверхность проходит под углом $45^\circ + \phi/2$ к линии горизонта; в нижней части она составляет с поверхностью откоса угол $45^\circ - \phi/2$. По этим условиям строят ряд (не менее 3–4) плавных криволинейных поверхностей, из которых выбирают наиболее напряженную.

Учет гидростатических и гидродинамических сил в расчетах устойчивости производят следующим образом. На геологическом разрезе определяют наиболее напряженную поверхность скольжения. В массиве

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту №05-05-64100

Технические характеристики аппаратуры САП-1М

| | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Рабочий диапазон измерения периода | – 400..2000 мкс |
| Амплитуда входного сигнала..... | – не менее 2 мВ |
| Количество каналов | – 10 |
| Погрешность измерения..... | – не более 0,1% |
| Амплитуда импульса возбуждения... | – не менее 80 В (при $Un = 4$ В) |
| Объем памяти..... | – до 64500 отсчетов |
| Период измерения..... | – от 6 с до 24 час |

находят положение депрессионной поверхности и линий равных напоров, для чего используют данные натурных измерений или аналитические расчеты. Если в массиве ожидается возникновение избыточного порового давления, то его учитывают в расчетах путем увеличения напоров на величину водного столба соответствующей высоты. Для каждого блока полученной призмы определяют силу гидростатического взвешивания

$$\Phi_i = \gamma_b (H_i - Y_i) \alpha_i / \cos \alpha_i \quad (1)$$

где H_i – средний напор в пределах блока, м; Y_i – средняя ордината скольжения в пределах блока (ее отсчитывают от произвольно выбранной горизонтальной плоскости AA'), м; α_i – ширина блока, м; γ_b – удельный вес воды, кН/м³.

Коэффициент запаса устойчивости откоса в этом случае определяют по формуле

$$\frac{\sum_{i=1}^n (P_i \cos \alpha_i - \Phi_i) \operatorname{tg} \varphi + C_i l_i}{\Sigma P_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

где P_i – вес пород блока вместе с заключенной в нем водой; φ и C – угол внутреннего трения и сцепление; l_i – длина i -го участка кривой скольжения; n – число блоков.

В случае, если силы сцепления и трения не могут быть представлены отдельными характеристиками сцепления C и угла внутреннего трения φ , расчет устойчивости производят в следующем порядке:

– в серединах оснований блоков, на которые разбивается призма, определяют касатель-

ные τ_c и нормальные σ_n напряжения по формулам

$$\sigma_n = h_i \gamma \cos^2 \alpha_i ; \quad (3)$$

$$\tau_c = 0,5 h_i \gamma \sin 2\alpha_i , \quad (4)$$

где h_i – высота отдельного блока, м; α_i – угол наклона основания блока, град; γ – удельный вес породы, кН/м³;

– расчетную поверхность с отмеченными серединами оснований блоков развертывают в горизонтальную прямую и в каждой отмеченной точке по оси ординат откладывают отрезки, соответствующие касательным напряжениям τ_c , концы которых соединяют; площадь, ограниченная осью абсцисс и этой кривой, выражает сумму сдвигающих сил, действующих по расчетной поверхности;

– по графикам сопротивления сдвигу пород при соответствующих нормальных напряжениях определяют сопротивления сдвигу, величины которых также откладывают по оси ординат и соединяют между собой; площадь этой эпюры выражает сумму удерживающих сил $\Sigma \tau_y$, а коэффициент запаса устойчивости рассчитывают по отношению

$$n = \Sigma \tau_y / \Sigma \tau_c . \quad (5)$$

Для инструментальных наблюдений за поровым давлением жидкости в намывном слое были оборудованы три контрольные скважины. Для мониторинга применяли скважинный автоматический периодомер САП-1М конструкции ВНИМИ, предназначенный для измерения в автоматическом режиме периодов колебаний струнных датчиков давления типа ПДС,

накопления результатов измерения в энергонезависимой памяти и последующем выводе их на компьютер [3].

Принцип измерения аппаратуры САП-1М заключается в подаче короткого высоковольтного импульса на обмотку возбуждения датчика и измерении периода свободных затухающих колебаний, наводимых струной датчика в обмотке, после снятия импульса возбуждения. Период колебаний зависит от внешнего давления на мембранию датчика. Устройство запоминает результаты измерений во внутренней энергонезависимой памяти, что позволяет записывать данные по 10 каналам с периодом измерения 1 час в течение 268 суток. Данные могут быть в любой момент считаны в компьютер по стандартному последовательному интерфейсу RS-232. Устройство имеет два режима работы: "Регистрация" и "Компьютер". В режим "Компьютер" устройство автоматически переходит при подключении кабеля связи к разъему на блоке питания. В этом режиме управляющая программа в компьютере позволяет программировать, тестировать устройство и считывать накопленные данные. В режим "Регистрация" устройство переходит при включении питания, если кабель связи не подключен, или автоматически после отключения кабеля от разъема на блоке питания. В режиме "Регистрация" устройство производит опрос датчиков с заданным периодом от 6 с до 24 ч. Список опрашиваемых датчиков (каналов) записывается при программировании режима работы. В остальное время устройство находится в "ждущем" режиме, потребляя минимальную энергию. Расположение датчиков в скважинах на опытном участке показано на рис 2.

Ниже приведены результаты расчетов по прогнозу устойчивости намывного массива, выполненные по результатам комплексных геолого-

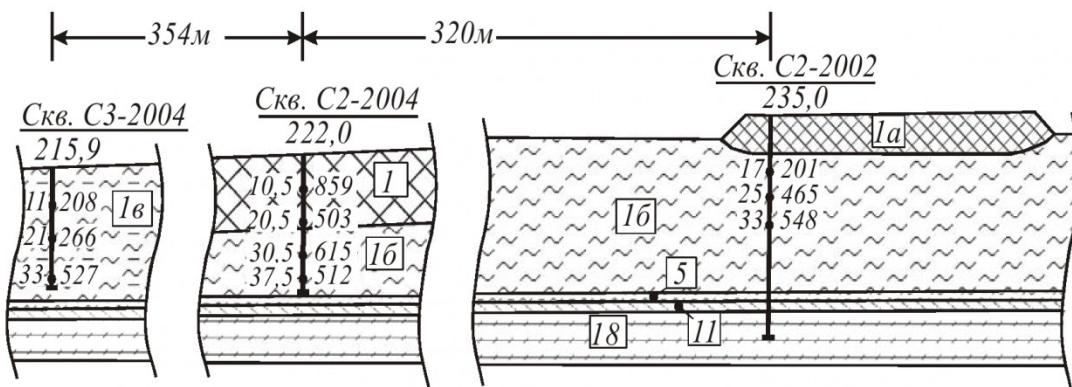


Рис 2. Схема расположения датчиков порового давления в скважинах:

1 - техногенный грунт, представлен суглинком дресевяным, твердым;

1a - насыпной грунт, представлен глыбовым и дресевяно-щебнистым грунтом;

16 - намывной грунт представлен суглинком мягкой и тугопластичной консистенции, насыщенным водой; 18 - намывной грунт, представлен суглинком текуче- и текучепластичной консистенции, насыщенным водой; 5 - суглиник серого цвета, аллювиальный, полутвердой консистенции, плотный, насыщенный водой; 11 - аргиллит серый, выветрелый до глины твердой, очень плотный, маловлажный, с включением щебня до 20%; 18 - скальный грунт, представлен аргиллитом прочным, трещиноватым; справа от места установки датчика – номер датчика, слева - глубина установки датчика

инструментальных исследований.

По данным проведенных инженерно-геологических изысканий и маркшейдерских из-

аний.

Коэффициент запаса устойчивости определяли для следующих условий: при фактическом поровом давлении; с от-

скольжения AC , поскольку первый участок находится ближе к забою, чем второй. Вместе с тем, величина n по поверхности AD меньше, чем по другим по-

Таблица 1

Изменение коэффициента запаса устойчивости намывного массива в зависимости от порового и гидростатического давления воды

| Поверхность скольжения | Коэффициенты запаса устойчивости n | | |
|------------------------|--|--|---|
| | С учетом порового давления и гидростатического давления воды | Без учета порового давления, но с учетом гидростатического давления воды | Без учета порового давления и гидростатического давления воды |
| AB | 1,33 | 1,66 | 2,28 |
| AC | 1,73 | 2,38 | 3,35 |
| AD | 1,28 | 2,03 | 2,72 |

мерений намывного массива построен разрез по линии скв. С2-2002 (т. D) – скв. С2-2004 (т. С) – скв. С3-2004 (т. В) – забой гидромонитора №4, отметка 200 м (т. А) (рис. 3). По результатам пьезометрических измерений построены изогипсы порового давления. С использованием описанной выше методики и полученных в результате испытаний образцов физико-механических свойств пород построен ряд потенциальных поверхностей скольжения. Получившиеся области вероятного спłyва, ограниченные поверхностями скольжения, разбиты на блоки, для каждого из которых определяли поровое давление, действующее в его основа-

существием порового давления, но с учетом действия гидростатического давления поровой воды; с отсутствием порового давления и воды в расчетной зоне массива.

Основные результаты расчетов приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, фактические коэффициенты запаса устойчивости превышают минимально допустимый ($n = 1,2$), то есть намывной массив находится в устойчивом состоянии. Влияние гидродинамических и гидростатических сил приводит к снижению величины n соответственно в 1,25 и 1,71 раз. В частности, величина n по поверхности скольжения AB меньше, чем по поверхности

верхностям, несмотря на то, что она является самой удаленной от забоя и более пологой. Это обусловлено тем, что поверхность скольжения AD проходит в области действия высоконапряженного ядра, которое и выводит эту часть массива из устойчивого состояния.

Слаболитифицированные мягкие глинистые грунты техногенных намывных массивов преимущественно характеризуются водно-коллоидными структурными связями, прочность которых в значительной степени зависит от влажности. В естественном напряженном состоянии нагрузки, возникающие в массиве, воспринимаются скелетом грунта и водой, находящейся в порах и на границах зерен.

дящейся в порах. Ведение гидромеханизированных работ по смыву гидроотвала приводит к неизбежному деформированию прилегающего к забою массива в виде спльва. По теоретическим представлениям д.т.н., проф. Ю. И. Кутепова (ВНИМИ) при деформациях в массиве возникают растягивающие напряжения, которые приводят к нарушению его сплошности и

разрушению скелета грунта, поэтому та часть нагрузок, которая ранее воспринималась скелетом, передается на воду, заключенную в порах. В результате этого в грунте возникает избыточное поровое давление. Соответственно, период, предшествующий спльву массива, будет характеризоваться максимальными напряжениями в скелете твердой фазы массива.

Процесс формирования спльва от момента увеличения растягивающих напряжений (начальный этап) до полного формирования поверхности скольжения и спльва массива характеризуется продолжительным периодом времени, что делает этот процесс прогнозируемым. Эта идея и заложена в основу мониторинга безопасности намывных массивов участ-

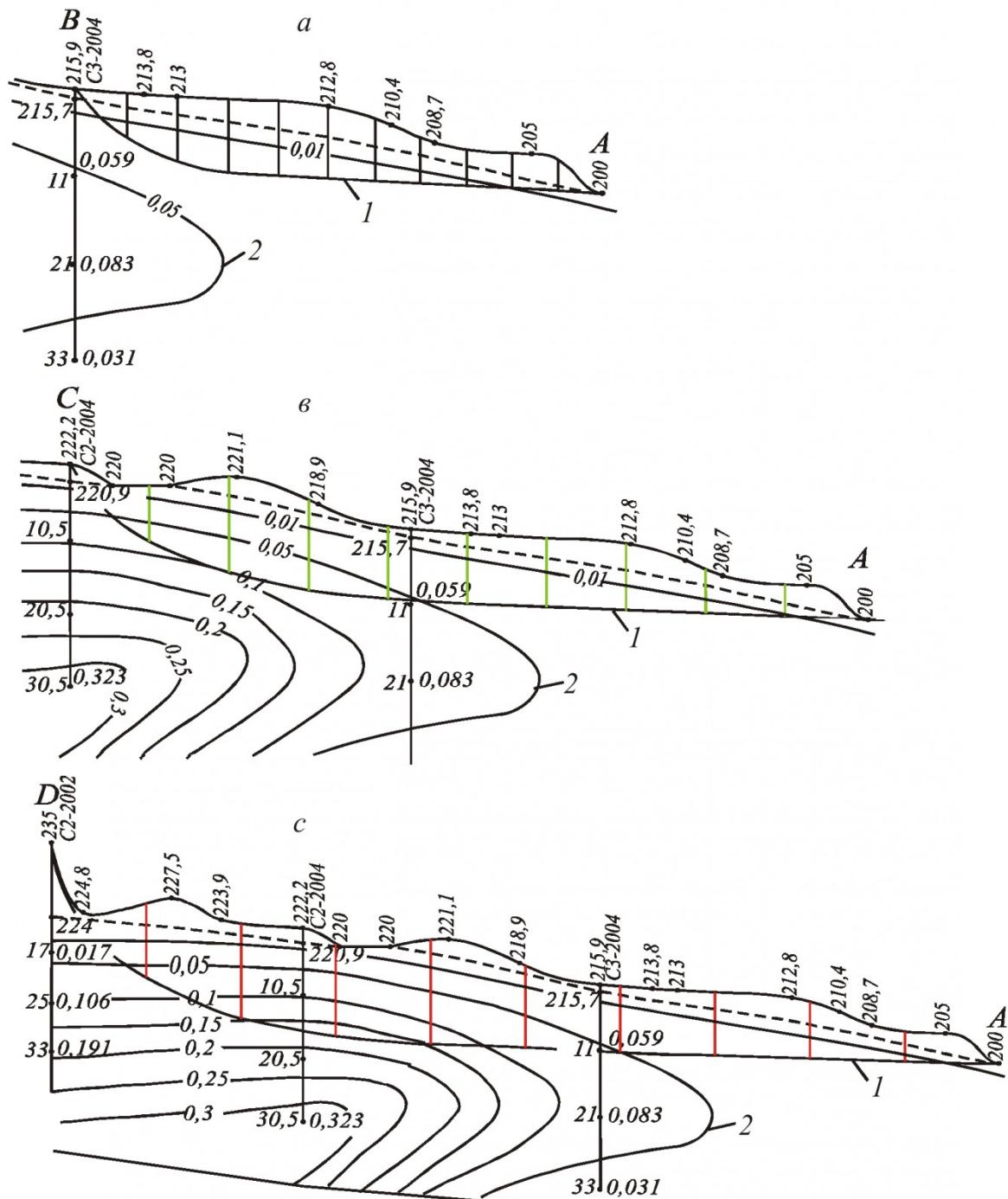


Рис. 3. Расчетные схемы для вероятных поверхностей скольжения AB (а), AC (б), AD (в): 1 – поверхности скольжения; 2 – изолинии порового давления

Максимальные (критические) значения порового давления по блокам при достижении коэффициента запаса устойчивости $n = 1,2$

| Номер блока | Максимальное поровое давление, м. вод. ст. (МПа) | | |
|-------------|---|--------------|--------------|
| | AB | AC | AD |
| 1 | 2,5 (0,025) | 8,8 (0,088) | 3,1 (0,031) |
| 2 | 3,5 (0,035) | 17,9 (0,179) | 11,8 (0,118) |
| 3 | 3,5 (0,035) | 11,3 (0,113) | 16,8 (0,168) |
| 4 | 3 (0,03) | 10,9 (0,109) | 17,3 (0,173) |
| 5 | 3 (0,03) | 8,4 (0,084) | 11,6 (0,116) |
| 6 | 2,5 (0,025) | 6 (0,06) | 7,5 (0,075) |
| 7 | 2,5 (0,025) | 5,4 (0,054) | 4,8 (0,048) |
| 8 | 2 (0,02) | 4,8 (0,048) | 2,7 (0,027) |
| 9 | 2 (0,02) | 4,3 (0,043) | 1,7 (0,017) |
| 10 | 2 (0,02) | 3,8 (0,038) | 0,7 (0,007) |
| 11 | 2 (0,02) | — | — |

ков открытых горных работ. Приведенные в табл. 1 значения коэффициентов запаса устойчивости определены для фактического состояния массива с учетом натурных наблюдений за поровым давлением по станциям гидрогеомеханического контроля. Из приведенных выше теоретических представлений следует, что основным критерием устойчивого состояния намывного массива является давление воды в порах грунта. Для нахождения критических значений порового давления расчеты устойчивости были повторены, при этом изменяли величину

порового давления в каждом расчетном блоке до тех пор, пока коэффициент запаса устойчивости не становился равным нормативному ($n = 1,2$).

Анализ полученных результатов (табл. 2) показал, что для перехода массива в предельно-напряженное состояние поровое давление должно в среднем увеличиться в 1,2 раза. При этом следует отметить, что при "отдыхе" массива (прекращении гидромеханизированных работ в зимний период, отступлении фронта работ на периферию разрабатываемого участка и т.п.) происходит рассеивание

Таблица 2

порового давление и его снижение.

Так как технически мониторинг порового давления может осуществляться в дискретных точках, а не во всех блоках вдоль поверхности скольжения, были определены критические значения порового давления в точках установки пьезометрических датчиков (рис. 2). Расчетные значения критического порового давления представлены в табл. 3.

Таблица 3

Критические значения порового давления в точках установки скважинных датчиков

| № датчика | Величина порового давления, м. вод. ст. (МПа) |
|--------------|---|
| скв. С2-2002 | |
| 201 | 4,5 (0,045) |
| 465 | 12,5 (0,125) |
| скв. С2-2004 | |
| 859 | 11 (0,11) |
| скв. С3-2004 | |
| 208 | 7 (0,07) |

Приведенные в работе новые подходы к прогнозу устойчивости намывного массива и конкретные результаты их применения будут способствовать безопасности ведения горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, М. А. Маркшейдерско-геофизический мониторинг состояния глинистых горных пород борта Кедровского угольного разреза / М.А. Кузнецов, С.М. Простов, С.П. Бахаева, Е. В. Костюков, Е.А. Серегин // Безопасность жизнедеятельности предприятий угольных регионов : М-лы VI Межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, ГУ КузГТУ. – С. 179–182.
2. Указания по методам геомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Часть II. Обоснование оптимальных параметров отвальных сооружений / М-во угольной пром-ти СССР. Всесоюзн. ордена Трудового Красного Знамени науч.-исслед. ин-т горн. геомех. и маркшейд. дела. – Л.: 1990. – 55 с.
3. Бахаева, С. П. Исследование гидрогеомеханических процессов техногенных массивов / С. П. Бахаева, С. И. Протасов, Е. В. Костюков, А. И. Федосеев, С. В. Практика. – Вестн. КузГТУ. – 2005. – №3. – С. 41–45.

□Авторы статьи:

| | | | |
|---|---|---|--|
| Простов Сергей Михайлович – докт.техн.наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики | Костюков Евгений Владимирович – канд.техн.наук, ст. преп. каф. теоретической и геотехнической механики | Бахаева Светлана Петровна – канд.техн.наук, зам. директора НФ "КУЗБАССНИИОГР" | Кузнецов Максим Аркадьевич – аспирант каф. теоретической и геотехнической механики |
| Сорокин Роман Юрьевич – инженер каф. электро- привода и автоматики | Щупаковский Александр Владимирович – студент гр. ФП-001 | | |