

УДК 622.831: 622.834

**РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ  
ОТВАЛОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ**

**С. П. Бахаева, В. А. Гоголин, И. А. Ермакова**

*Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,  
E-mail: baxaevs@mail.ru, ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия*

Рассмотрены вопросы повышения эффективности и безопасности открытых горных работ при формировании отвалов сухих пород поверх намывных глинистых отложений. Анализ напряженно-деформированного состояния отвала разреза “Кедровский” проведен методом конечных элементов в рамках модели линейно-деформируемой среды на основании инженерно-геологической, маркшейдерско-геодезической и гидрогеомеханической информации. В результате моделирования получены поле перемещений отвала и его основания, а также распределение значений критерия прочности Кулона–Мора. Выявлены наиболее опасные участки, склонные к прорыву глинистых пород, выполнен прогноз смещений отвала при дальнейшем увеличении его объема. Разработанная модель позволяет оперативно прогнозировать потерю устойчивости отвала.

*Отвал, слабое основание, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, смещение, критерий прочности Кулона–Мора*

При открытой разработке угольных месторождений возникает необходимость поиска решений по размещению значительных объемов вскрышных пород с минимальными затратами и ущербом для окружающей среды. Одним из направлений сохранения природного ландшафта является размещение отвалов сухих пород поверх намывных отложений. В течение ряда лет такой опыт используется на горнодобывающих предприятиях Кузбасса.

В частности, Кедровский угольный разрез начиная с 1958 г. использовал естественные углубления в рельефе для складирования пульпы, образующейся в результате смыва залегающих над угольными пластами четвертичных отложений. Таким образом в пойме реки Чесноковка был образован гидроотвал № 3, который на момент окончания эксплуатации (1979 г.) занимал площадь около 292 га и имел вместимость 48 млн м<sup>3</sup> с мощностью намывных отложений до 45 м. В таком состоянии гидроотвал был законсервирован, причем под ним находились запасы угля объемом около 37 млн т.

После проведения научно-исследовательских работ, инженерно-геологических изысканий и дополнительных геологоразведочных работ на площади гидроотвала № 3 техническая служба разреза в 2000 г. приняла решение об извлечении целика угольного пласта из-под намывных отложений. Возникла необходимость повторного смыва пульпы. Наиболее остро встал вопрос о выборе места для ее складирования. Свободных площадей рядом не было, поэтому на площади гидроотвала построили ограждающую перемычку (дамбу) из скальных вскрышных пород.

Строительство перемычки велось по технологии бульдозерного автоотвала. Отсыпаемые авто-транспортом породы активно погружались в намывной массив, просадки составляли до 3–4 м в месяц. Вдоль перемычки образовались значительные (длина до 20 м, раскрытие до 20 см) продольные и поперечные трещины. Первоначально ширина перемычки была 40 м, позднее с целью повышения безопасности работ ее увеличили до 100 м.

Ограждающей перемычкой длиной 680 м гидроотвал разделен на две зоны: юго-западную и северо-восточную. В юго-западной проводились смыв намывных пород гидромониторами и подготовка угольных пластов к извлечению, а в северо-восточной формировался новый гидроотвал [1]. Таким образом, со всех сторон ограждающая перемычка испытывала влияние нагрузок и воздействий, обуславливающих ее напряженно-деформированное состояние: сверху — гравитационных сил скальных вскрышных пород; снизу — избыточных поровых давлений, вызванных низким проницаемостью суглинистых пород; со стороны верхового откоса — активных сил, действующих в основании сооружения по схеме плоского сдвига; со стороны низового откоса — воздействие намывного массива за счет смыва пульпы средствами гидромеханизации. Для изучения гидрогеомеханических процессов, происходящих в теле и основании ограждающей перемычки, организован комплексный мониторинг, включающий следующие виды наблюдений: инженерно-геологические (бурение скважин с отбором монолитов грунтов и изучение изменений их физико-механических свойств), маркшейдерско-геодезические (заложена маркшейдерская наблюдательная станция в виде продольных и поперечных профильных линий, закрепленных поверхностными и глубинными реперами); геофизические (организован геоэлектрический контроль фильтрационных процессов методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и элетропрофилирования (ЭП) [2, 3]); гидрогеомеханические (установлена станция гидрогеомеханического контроля, состоящая из системы датчиков порового давления типа ПДС конструкции “Спецэнергоавтоматика”) [4]; геоэлектрические [5].

В результате складирования пульпы в 2004 г. произошел мгновенный отрыв и перемещение суглинистых грунтов в забой гидромонитора. Расстояние от гидромеханизированного забоя до границы отрыва намывного массива составило 700 м. Поверхности заколов по линии отрыва грунтов были практически вертикальными. От места отрыва грунтов, в сторону перемычки, зона деформаций в виде заколов, крупных трещин распространялась на 20–30 м, мелких трещин — до 80 м. Этот случай послужил причиной прекращения сброса пульпы за ограждающую перемычку в северо-восточную зону.

Вследствие естественной фильтрации воды и ее испарения северо-восточная зона гидроотвала стала представлять собой слой глинистых пород мощностью около 40 м. В 2008 г. с целью снижения затрат на отвалообразование вскрышных пород принято решение по отсыпке бульдозерного отвала в северо-восточной зоне гидроотвала № 3 (далее в тексте — отвал “Северный”). К 2011 г. завершено формирование второго яруса автоотвала до отметки +255 м и третьего яруса с отметкой верхней площадки +275 м.

Анализ результатов инструментальных наблюдений за 2008 г. показал, что смещения ограждающей перемычки не увеличились (по отношению к 2007 г.) и были не опасны для сооружения данной конструкции. Сдвигения как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости носили сезонный характер и определялись в основном климатическими условиями. Влияние автоотвала на ограждающую перемычку не было явно выражено. Однако в 2009 г. максимальные смещения, вызванные отсыпкой автоотвала, активизировались и составили: горизонтальное — 22.986 м, вертикальное (оседание) — 1.170 м, скорость полного вектора смещений (в пространстве) — 3 288 мм/сут.

В последующие годы смещения пород уменьшились и составили в 2010 г.: горизонтальные — 13.255 м, вертикальные — 0.782 м, скорость полного вектора смещения — 887 мм/сут; а в 2011 г. — соответственно 15.2 м, 2.0 м, 58 мм/сут, но оставались весьма значительными. С момента формирования автоотвала с восточной стороны ограждающей перемычки ее смещение в горизонтальной плоскости достигло 52 м.

Активизация процессов смещения привела к необходимости поиска новых способов и средств отвалообразования, способных повысить как его эффективность, так и безопасность работы оборудования и обслуживающего персонала. Одним из подходов решения этой проблемы является использование вибрационной техники, позволяющей исключить работу в опасной приконтурной зоне отвала [6], другим — временное изменение фронта отвальных работ, отсыпка породы на значительном удалении от приконтурной зоны отвала, что также обеспечивает консолидацию отвальных пород и затухание деформаций.

Для предотвращения смещений отвальных пород в 2012–2014 гг. формирование автоотвала “Северный” продолжено путем его расширения в северо-восточном направлении. В связи с разворотом фронта отвальных работ и их значительным (около 700 м) удалением от ограждающей перемычки скорость активных смещений в 2012 г. уменьшилась до 6 мм/сут, в 2013 и 2014 гг. — до 3 мм/сут.

С целью управления безопасностью ведения отвальных и горных работ за состоянием намывного массива гидроотвала и автоотвала ведется комплексный мониторинг, позволяющий собрать достаточно представительный объем информации о состоянии и поведении отвала на слабом основании. Однако эмпирические данные, основанные на натуральных наблюдениях, не всегда могут в должной степени эффективно прогнозировать поведение отвала, из-за чего при ведении отвальных работ возникали критические ситуации, в частности в 2009 г., когда полный вектор смещения составил 23 м.

Таким образом, для повышения эффективности открытых горных работ [7], а также для обеспечения их безопасности и экономической целесообразности требуется построение адекватной физической модели рассматриваемого объекта, учитывающей силовые воздействия и естественные граничные условия [8].

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

С целью оперативного прогнозирования состояния автоотвала и его основания по результатам комплексного мониторинга выполнено моделирование методом конечных элементов (МКЭ) [9] отвала вскрышных пород “Северный” Кедровского разреза, расположенного на слабом глинистом водонасыщенном основании — намывном массиве гидроотвала № 3 (рис. 1).

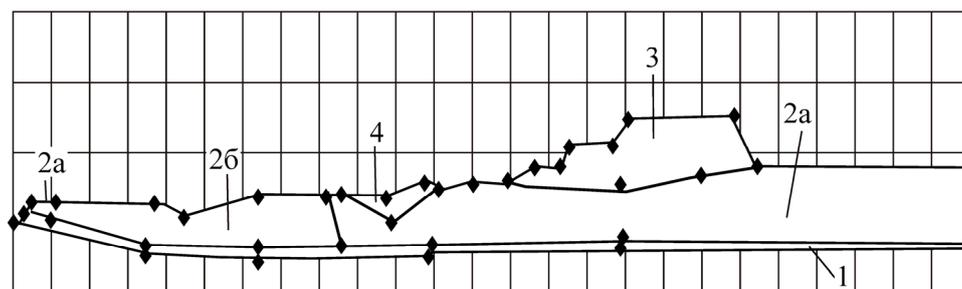


Рис. 1. Поперечное сечение отвала вскрышных пород, расположенного на слабом водонасыщенном основании (пояснения в тексте)

Геологический “слоистый” разрез отвала представлен породами:

— слой естественного суглинка 1 полутвердой консистенции мощностью 1.0–5.6 м, насыщенный водой и расположенный на скальном основании;

— намывной грунт (слои 2а и 2б) представляет собой техногенный суглинок, образованный при размыве дисперсных вскрышных пород, транспортировка которых в гидроотвал осуществлялась по пульпопроводу. Мощность грунта составляет 12.2–40.9 м. Характеристика намывного грунта: 2а — суглинок мягко- и тугопластичной консистенции, насыщен водой, показатель текучести  $I_L = 0.40 - 0.59$ ; 2б — суглинок, реже глина, текучей и тегучепластичной консистенции, насыщен водой, показатель текучести  $I_L = 0.71 - 1.72$ ;

— насыпной грунт (слой 3) представлен глыбовым и дресвяно-щебенистым грунтом, образован за счет сухой отсыпки вскрышных скальных пород (песчаника, аргиллита и алевролита). Грунт уплотнен с помощью тяжелого автотранспорта. Мощность слоя 11–15 м;

— насыпной грунт (слой 4) представлен суглинком дресвянистым, отсыпан сухим способом, залегает локально, достигая мощности 22.5 м.

В процессе инженерно-геологических исследований установлено, что на всей площадке гидроотвала сформировался техногенный водоносный горизонт, приуроченный к намывным грунтам, поверхность которого залегает на глубине 11–15 м под насыпным грунтом. После бурения скважины на всю мощность насыпных и намывных грунтов наблюдался самоизлив воды через кромку обсадной трубы у границы слоя 3, что указывает на наличие напорных подземных вод.

Задача решалась в упругой постановке; приняты условия плоской деформации, поскольку протяженность отвала значительно больше его линейных размеров в поперечном сечении. Реализация модели выполнена методом конечных элементов с использованием лицензионной программы “Elcut-professional”, разработанной ООО “Тор” (г. Санкт-Петербург, Россия).

Расчетная область задачи совпадает с поперечным сечением отвала (рис. 1). Рассматриваемый отвал представлен блоком 3, который находится на слабом водонасыщенном основании (гидроотвале) — блоки 2а и 2б. Под намывными грунтами 2а и 2б расположен блок 1, нижняя граница которого совпадает с поверхностью скальных пород.

Предполагалось, что слоистый отвал нагружен собственным весом и имеется полное сцепление слоев. Граничные условия — отсутствие нагрузок по контуру отвала. На глинистое водонасыщенное основание, которое в общем случае не горизонтально, передается собственный вес отвала, а также действует подпор воды. Основание намывного массива, представленное скальными породами (нижняя граница расчетной области), жестко защемлено. Каждый структурный элемент расчетной области имеет свои деформационные и прочностные параметры: модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$  и пределы прочности на сжатие  $\sigma_c$  и растяжение  $\sigma_t$ .

Значения модуля  $E$  приняты на основании отчетов по инженерно-геологическим изысканиям. Коэффициент  $\nu$  выбирался по данным СП 22.13330.2011: для крупнообломочных грунтов  $\nu = 0.27$ ; для песков и супесей  $\nu = 0.30 - 0.35$ ; для суглинков  $\nu = 0.35 - 0.37$ ; для глины  $\nu = 0.38 - 0.45$ .

Меньшие значения  $\nu$  относятся к большей плотности грунта [10]. С учетом имеющихся результатов исследований к расчету приняты показатели грунтов, приведенные в таблице. Выявлено, что модуль Юнга слабого водонасыщенного основания (блоки 2а и 2б) в 3–5 раз ниже, чем у других блоков отвала.

Блок грунта (по рис. 1)	$E$ , МПа	$\nu$	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
1	24	0.35	2.03
2а	10.5	0.45	1.79–1.83
2б	9	0.45	1.83–2.02
3	40 (35–50)	0.27	2.5 (2.2–2.5)
4	10.5	0.30	1.98–2.08

Критерий прочности Кулона – Мора задавался в виде неравенства [11]:

$$\sigma_M = \sigma_1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \sigma_2 < \sigma_t,$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — наибольшее и наименьшее главные напряжения.

Для глины прочностные параметры выражались через угол внутреннего трения  $\varphi$  и сцепление  $C$  следующими зависимостями:

$$\sigma_c = 2C \cos \varphi / (1 - \sin \varphi); \quad \sigma_t = 2C \cos \varphi / (1 + \sin \varphi),$$

где  $C$  — сцепление;  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунтов.

При моделировании напряженно-деформированного состояния отвала вскрышных пород на слабом водонасыщенном основании выделены следующие характерные точки (рис. 2в): за начало координат принята точка  $O$ , с левой стороны от которой расположен ранее отсыпанный отвал (2008–2010 гг.), с правой — сформированный за 2011–2012 гг. и планируемый на 2013 г.; отрезками  $DE$ ,  $FG$ ,  $HI$ ,  $AB$  обозначены откосные участки между ярусами отвала;  $DA$  — поверхность отвала вскрышных пород;  $BC$  и  $IK$  — поверхность слабого водонасыщенного основания, представленная намывным массивом глинистых пород.

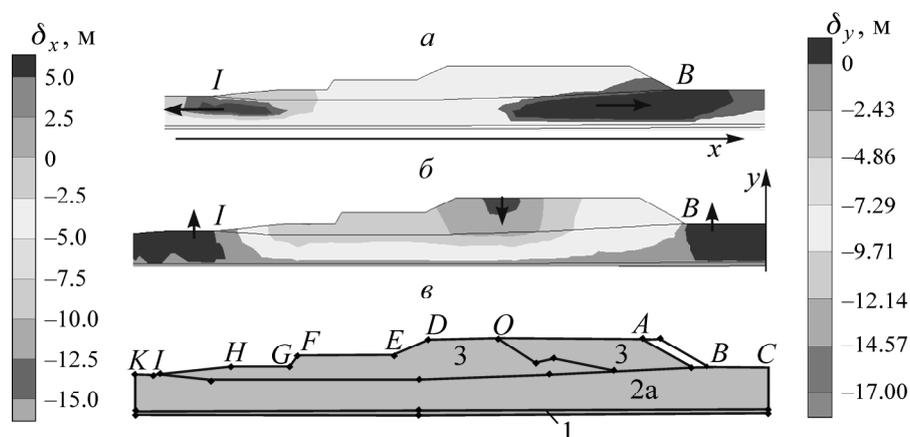


Рис. 2. Распределение горизонтальных  $\delta_x$  (а) и вертикальных  $\delta_y$  (б) перемещений; профиль отвала с характерными точками (в)

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРОГНОЗ ПОВЕДЕНИЯ ОТВАЛА

**Распределение горизонтальных перемещений  $\delta_x$**  точек расчетной области (рис. 2а). При анализе результатов следует учесть, что ось  $Ox$  направлена вдоль поверхности отвала вскрышных пород вправо, поэтому горизонтальные перемещения точек правого крыла расчетной области являются положительными, а левого — отрицательными.

Наибольшие значения горизонтальных перемещений  $\delta_x$  наблюдаются у границ отвала, в районе точек  $B$  и  $I$ . Под этими точками в намывном массиве формируются области наибольших горизонтальных перемещений с различными знаками.

Наибольшее значение горизонтальных перемещений  $\delta_x$  ( $-13.9$  м) на поверхности отвала наблюдается у его начала в области точки  $I$ . Непосредственно под этой точкой в намывном массиве локализуется область (фиолетового цвета), в которой горизонтальные перемещения достигают  $-20.5$  м. От этой области вправо происходит уменьшение абсолютных значений горизонтальных перемещений. Под центральной частью отвала горизонтальные перемещения точек равны нулю. Для точек, лежащих правее этой области, отмечается увеличение горизонтальных перемещений до  $8.0$  м у основания отвала, с правой стороны в районе точки  $B$ . Под этой точкой на глубине  $25-30$  м расположена область (красный цвет), где горизонтальные смещения достигают  $13$  м.

Графики по профилю отвала от точки  $O$  вправо (рис. 3а) и влево (рис. 3б) позволяют оценить горизонтальные перемещения на каждом характерном участке отвала и своевременно предусмотреть мероприятия по предотвращению опасных деструктивных процессов.

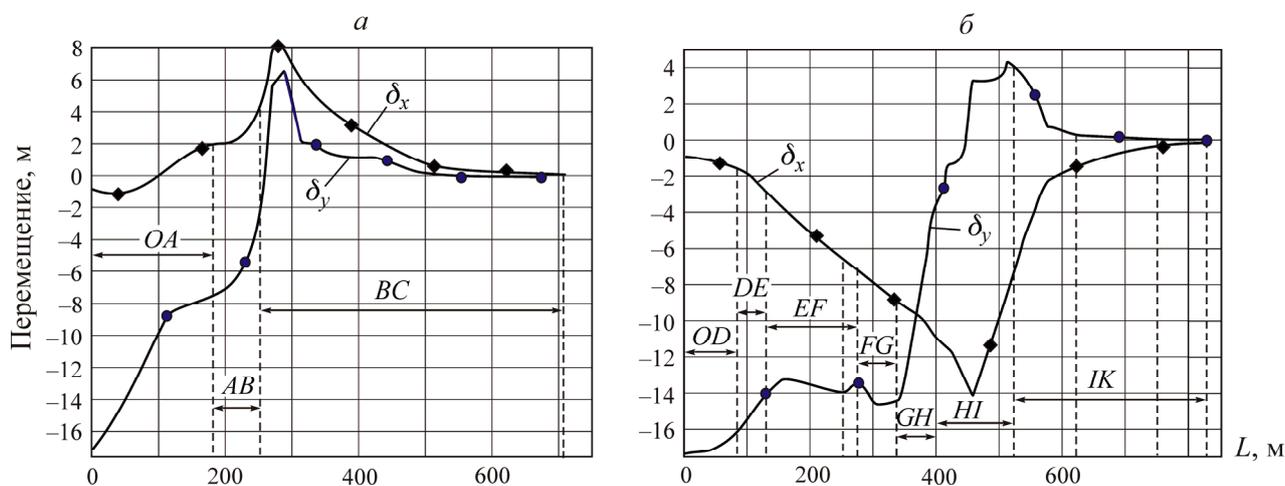


Рис. 3. Горизонтальные  $\delta_x$  и вертикальные  $\delta_y$  перемещения точек на профиле отвала от точки  $O$  вправо (а) и влево (б)

На участке поверхности отвала  $OA$  (рис. 3а) горизонтальные перемещения составляют от  $-1$  до  $2$  м, в откосной части  $AB$  — от  $2$  до  $8$  м, за пределами отвала, на участке  $BC$  — плавно уменьшаются до нуля (на расстоянии  $300-400$  м).

На участке поверхности отвала  $OD$  (рис. 3б) горизонтальные перемещения изменяются от  $-1$  до  $-1.5$  м. Далее на участках  $DE, EF, FG, GH$  происходит равномерное увеличение горизонтальных перемещений от  $-1.5$  до  $-12$  м. На участке  $HI$  отмечен пик горизонтальных перемещений до  $-13.9$  м. За пределами отвала (на расстоянии  $100-200$  м), в области ненагруженного участка намывного массива  $IK$ , происходит резкое уменьшение горизонтальных перемещений до  $0$  м.

Таким образом, можно сделать вывод, что под границами отвала сформирована зона слабых пластичных пород, склонных к перемещению и выдавливанию. Наиболее опасной является левая граница отвала, где прогнозируемое перемещение пород достигает  $20$  м. Полученные при моделировании результаты совпадают (погрешность менее  $10\%$ ) с натурными наблюдениями. В частности, в области левой границы отвала (участок  $HG$ ) в 2009 г. зафиксирован смешанный сдвиг отвала вскрышных пород. При этом произошел плоский сдвиг по подошве отвала — поверхности намывного массива на расстояние до  $23$  м в сторону забоев гидромеханизации и глубинный сдвиг (около  $12$  м) по поверхности, охватывающий оставшуюся часть подошвы с формированием вала выпирания в основании смещенного участка отвала.

**Распределение вертикальных перемещений**  $\delta_y$  точек расчетной области (рис. 2б). При анализе результатов следует учесть, что ось  $Oy$  направлена вверх, поэтому вертикальные перемещения вниз имеют отрицательные знаки, а вверх — положительные.

Графики  $\delta_y$  позволяют оценить вертикальные перемещения точек профиля отвала и его основания относительно точки  $O$  вправо (рис. 3а) — в сторону развития отвала вскрышных пород и влево (рис. 3б) — в сторону намывного массива.

Анализ вертикальных перемещений свидетельствует о том, что отвал под тяжестью собственного веса проседает, опускается в слабое водонасыщенное основание, причем наибольшее опускание наблюдается под ее центральной частью. С уменьшением высоты отвала вертикальные перемещения уменьшаются до нуля, а у основания отвала отмечаются положительные вертикальные перемещения, что связано с выдавливанием слабых глинистых пород из-под отвала и подтверждается результатами комплексного мониторинга [3].

**Распределение значений критерия прочности Мора** показано на рис. 4. Наибольшие критические значения критерия прочности Кулона–Мора (области желтого цвета) наблюдаются в нижней части отвала, примыкающей к глинистому основанию. В этих областях возможно развитие поверхностей скольжения, что может привести к потере устойчивости отвала.

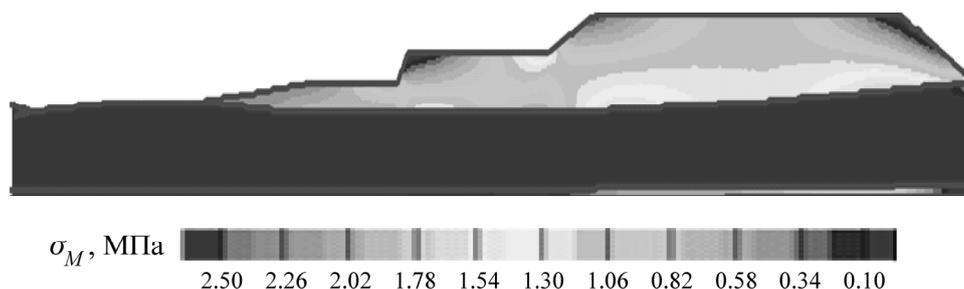


Рис. 4. Распределение значений критерия прочности Кулона – Мора

Выявление этих областей позволяет объяснить значительные горизонтальные и вертикальные смещения точек поверхности отвала над этими зонами, которые способствовали созданию критической ситуации в 2009 г. (значения смещений приведены выше).

**Прогноз поведения отвала.** Анализ данных, полученных при моделировании отвала, позволяет говорить об адекватности модели и выполнить прогноз поведения отвала при его дальнейшей отсыпке.

Согласно программе развития горных работ, дальнейшая отсыпка отвала в сезон гидромеханизации с мая по октябрь 2013 г. предусматривала увеличение его ширины в сечении на величину  $\Delta = 30$  м (рис. 5а). В целях безопасности ведения работ интерес представляли возможные дополнительные горизонтальные перемещения границы отвала и его основания. На рис. 5б показаны расчетные горизонтальные перемещения точек на линии  $B'C$ . Максимальные прогнозируемые горизонтальные перемещения пород при реализации плана по дальнейшей отсыпке отвала составили 1.14 м. Такая величина горизонтальных перемещений указывала на незавершившийся процесс консолидации пород в районе ограждающей перемычки. Поэтому для предупреждения угрозы безопасности в приоткосной зоне отвала выполнена корректировка программы развития горных работ на 2013–2014 гг. и отсыпка отвала в северо-восточном направлении не проводилась.

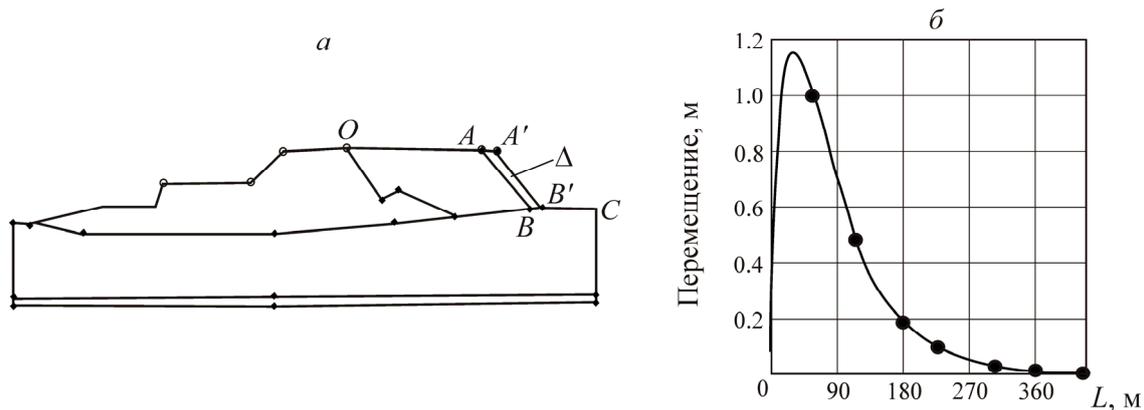


Рис. 5. Расчетная область при дальнейшей отсыпке отвала (а) и график дополнительных горизонтальных перемещений точек на поверхности по линии  $B'C$  (б)

Результаты натурных наблюдений геодезическими методами с использованием навигационной системы GPS/ГЛОНАСС по окончании сезонов гидромеханизации 2013–2014 гг. показали, что максимальные значения горизонтальных перемещений ограждающей перемычки составили 61–75 мм.

Оперативный прогноз состояния автоотвала и его основания, выполненный методом конечных элементов техногенной геологической среды — отвала вскрышных пород “Северный” Кедровского разреза, расположенного на слабом (глинистом) водонасыщенном основании, позволил своевременно принять меры по развороту фронта отвальных работ и исключить угрозу потери устойчивости отвала и безопасности ведения работ.

### ВЫВОДЫ

Формирование отвалов вскрышных пород на слабом основании из намывных глинистых пород может сопровождаться потерей устойчивости отвала и угрозой безопасности ведения горных работ. Требуется всесторонний анализ состояния отвала и его основания, дающий возможность моделировать его поведение.

Моделирование напряженно-деформированного состояния отвала на слабом основании методом конечных элементов, реализованное в программе “Elcut-professional”, позволяет установить области, склонные к выдавливанию, получить поля перемещений отвала и его основания, а также оценить максимальные вертикальные и горизонтальные перемещения при смешанном сдвиге. Адекватность предлагаемой постановки задачи подтверждается совпадением расчетных и наблюдаемых перемещений отвала с погрешностью менее 10 %.

Полученная модель дает представление о поведении отвала при увеличении его объема на стадии планирования работ, что способствует повышению эффективности и безопасности отвалообразования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. И., Вегнер В. Р., Протасов С. И., Бахаева С. П. Опыт отработки намывных четвертичных пород с площади гидроотвала № 3 ОАО “Разрез Кедровский” // ГИАБ. — 2004. — № 3. — С. 268–273.
2. Кузнецов М. А., Бахаева С. П., Серегин Е. А., Простов С. М. Изучение деформаций намывного массива в прибортовой зоне карьера // Безопасность труда в пром-сти. — 2007. — № 5. — С. 57–59.

3. Бахаева С. П., Простов С. М. Комплексный мониторинг техногенных грунтовых массивов угольных разрезов // Безопасность труда в пром-сти. — 2011. — № 4. — С. 20–24.
4. Гальперин А. М., Кутепов Ю. И., Кириченко Ю. В., Киянец А. В. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях. — М.: Горная книга, 2012. — 336 с.
5. Простов С. М., Хямяляйнен В. А., Бахаева С. П. Взаимосвязи электрофизических свойств глинистых пород с пористостью и влагонасыщенностью // ФТПРПИ. — 2006. — № 4. — С. 47–58.
6. Левенсон С. Я., Гендлина Л. И. Проблема безопасности при формировании породных отвалов и создание технических средств для ее решения // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 168–174.
7. Ческидов В. И., Норри В. К., Зайцев Г. Д., Ботвинник А. А., Бобыльский А. С., Резник А. В. Повышение эффективности технологий открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 107–122.
8. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
9. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 221 с.
10. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент Пуассона](http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_Пуассона).
11. Разрушение. Т. 2: Математические основы теории разрушения: пер. с англ. / ред. Г. Либовиц. — М.: Мир, 1975. — 764 с.

*Поступила в редакцию 11/V 2015*