

ОБОСНОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ СМЕЩЕНИЯ ЛЕДНИКА ДАВИДОВ

Чукин Б.А., Ким Э.А., Чукин Р.Б

ИГиОН НАН КР

Для выполнения исследований о распределении напряженно-деформированного состояния ледника Давыдов на основе численного моделирования необходимо понять механизмы смещений ледников. По нашему представлению, процессы смещения масс ледника, происходящие при отработке бортов карьера, идентичны механизму поведения пульсирующих ледников.

Анализ ранее выполненных исследований по пульсирующим ледникам сформировал следующее понимание причин, вызвавших их подвижки. «Условия для глыбового скольжения ледника по ложу возникают в тех случаях, когда напряжения сдвига во льду τ_0 превышают предельное сопротивление скольжению, которое чаще всего определяется пределом длительной прочности льда $\tau_{дл}$. Как только напряжения сдвига превысят предел длительной прочности, деформации льда переходят в стадию ускоряющейся ползучести, при которой возможны нарушения сплошности ледяного массива и разрушение льда. На участке, где $\tau_0 > \tau_{дл}$, происходит расслабление льда, наблюдаются смещения по поверхности скола внутри ледяного массива и по поверхности ложа. Суммарные силы сдвига превышают силы сопротивления скольжения, а их избыток передается на

расположенные ниже по склону более устойчивые участки ледника» /1/.

Можно выделить три необходимых условия, при сочетании которых возможна пульсация ледника:

1. Наличие относительно пологого участка ложа под нижней частью ледника, где затруднено глыбовое скольжение льда вниз по склону.
2. Наличие участка с относительно повышенным уклоном ложа, где усилия сдвига у ложа превышают величину предела длительной ползучести льда и способствуют возникновению продольных напряжений сжатия в леднике ниже этого участка (т.е. скорости смещений на участке сжатия замедляются).
3. Достаточно интенсивное поступление льда из области аккумуляции, приводящее к условию повышения напряжений сдвига.

Одним из характерных признаков пульсирующего ледника является наличие сформированного моренного вала. Потерявшая опору ледяная масса ускоряет свое движение и перемещается вниз по ложу. Силы сопротивления движению, которые увеличиваются по мере перемещения льда на более пологий участок ложа, не затормозят и не остановят движения льда. В процессе перемещения вниз по склону вместе с моренным материалом формируется моренный вал.

С нашей точки зрения, наличие моренного вала определяет характер движения ледника в целом. При его наличии скорости смещений будут ниже. В случае проведения горных работ, связанных с удалением моренного вала, произойдет увеличение скоростей смещений ледника, что можно предотвратить проведением разгрузочных мероприятий. На основе различных точек зрения широкого круга специалистов о причинах и факторах, повлиявших на

увеличение скоростей смещений ледника, о методах и подходах решения задач были сделаны следующие допущения:

- прочностные свойства деформируемого слоя льда у ложа подбираются на основе численного моделирования на основании данных мониторинга за смещениями;
- для исследований определены четыре расчетных сечения и их наименования, согласовано их плановое расположение (рис.1);
- вода движется по каналам, сформированным по контакту ледника с мореной, при этом морена, как показали визуальные наблюдения, остается в сухом состоянии;
- гидростатическое взвешивающее давление воды действует на основание ледника и имеет максимальное значения напора 40 метров.

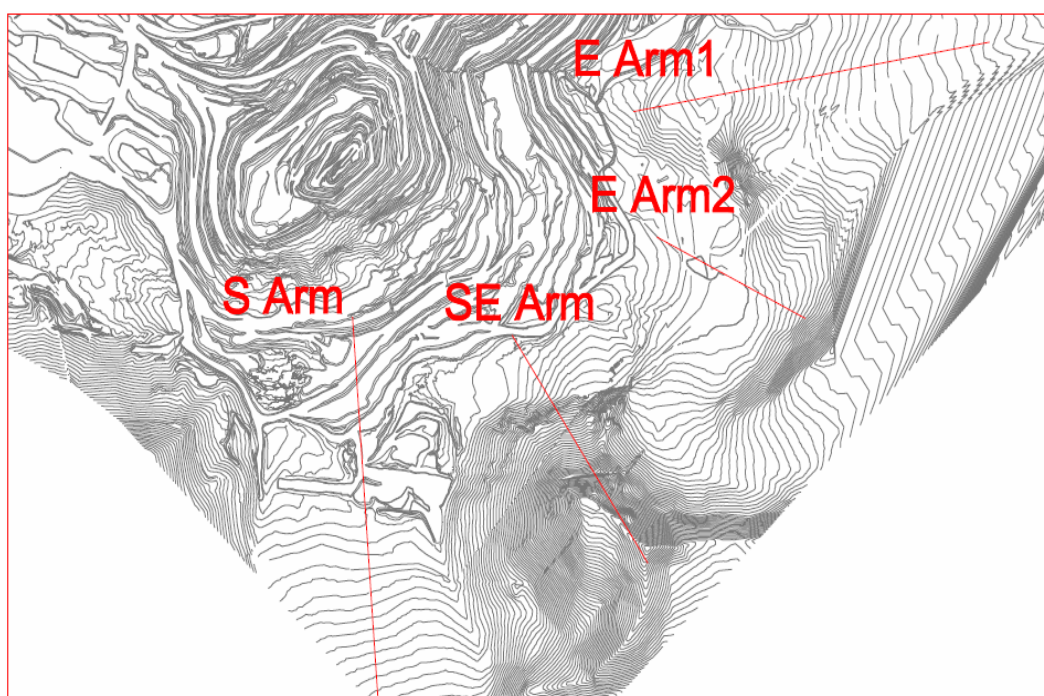


Рис. 1 - Плановое расположение и наименования расчетных сечений.

Моделирование процессов смещения ледника производилось на основании численного моделирования с использованием лицензионной программы FLAC 7.0 в плоской постановке.

Ввиду влияния отработки бортов карьера на смещение ледника учет поэтапности отработки является обязательным условием моделирования. Поэтапность отработки моделировалась путем изменения контура борта карьера с января по май 2012 г. на основании реальных данных. А изменение контура борта карьера с июня по декабрь моделировалось на основании проектных решений.

На основании ранее выполненных наблюдений по инклинометрам установлено, что смещение ледника происходит в результате деформирования льда у ложа ледника (на контакте с мореной). Нами была принята концепция, что за счет деформирования в контактной области во льду образуется прослой спрочностными свойствами ниже, чем у основной массы ледника. Определение прочностных свойств ледового прослоя осуществлялось путем подбора расчетных смещений и скоростей смещений к реально наблюдаемым смещениям и скоростям смещений ледника. Выбирались те прочностные свойства, при которых отклонения расчетных значений от наблюдаемых были минимальными. Данная методика является общепризнанной для составления расчетных моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние бортов карьера и служит основанием для проведения прогнозных вычислений. Можно добиться высокого совпадения расчетных значений смещений с наблюдаемыми смещениями путем варьирования прочностных свойств ледового прослоя от этапа к этапу отработки. Но нами для вариации прочностными свойствами было принято следующее условие. При построении расчетных моделей по сечениям и для проведения прогнозных вычислений осуществлять только снижение прочностных свойств ледового прослоя во времени. То есть мы исходили из соображений, что лёд, испытывающий большие деформации, не способен восстанавливать свои прочностные свойства. Данное

утверждение базируется на результатах проведенных экспериментов со льдом. В результате исследованиями, проводившими эксперименты, были сделаны следующие выводы: сопротивление по мере нарастания деформаций сдвига увеличивается линейно и достигает максимума при относительной деформации 0,5% – 2%, после чего начинает уменьшаться: сначала резко, а затем более плавно.

Величины максимального сопротивления сдвигу тем больше, чем быстрее происходит сдвиг. Уменьшение сопротивления сдвигу связано с явлением «расслабления» кристалла из-за роста количества дислокаций. Данные представления об изменении способности льда сопротивляться сдвигу в зависимости от величины деформации сдвига легли в основу наших предпосылок.

Как отмечалось ранее, построение расчетных моделей базируется на анализе данных мониторинга за смещениями. Для выполнения анализа данных мониторинга за смещениями бортов карьера в расчетных сечениях была составлена специальная программа. Программа позволяет выделить коридор заданной ширины вдоль линии расчетного сечения. В наших расчетах ширина коридора составляла 100 м. Все точки мониторинга, попавшие в коридор за заданный период, разгружаются в Excel файл.

Для выявления факторов, влияющих на скорость смещения ледника, базовой моделью стала модель сечения S Arm. Исследования проводились на основе теории планирования эксперимента /2,3/.

Отличительной особенностью планирования эксперимента от классического эксперимента является возможность одновременного варьирования всеми выбранными факторами, по специальным правилам.

Одной из задач, которая решается с помощью планирования эксперимента, является выявление значимости варьируемых факторов на функцию отклика. Для составления матрицы планирования эксперимента и анализа экспериментальных планов была использована программа STATISTICA. Для исследований был выбран центральный композиционный план.

В качестве варьируемых факторов, влияющих на скорость смещения ледника, были выбраны:

1. Угол наклона ложа ледника;
2. Генеральный угол отработки ледника;
3. Гидростатическое давление на контакте ложа с ледником.

В качестве функции отклика была выбрана скорость смещения точки, находящейся на пересечении кровли ледника с генеральным углом отработки ледника.

На рис. 2 показана модель FLAC, для выполнения вычислительного эксперимента согласно матрице планирования. Отмечаем, что значение сцепления ледового прослоя в расчетах было принято $C=100000$ Па.

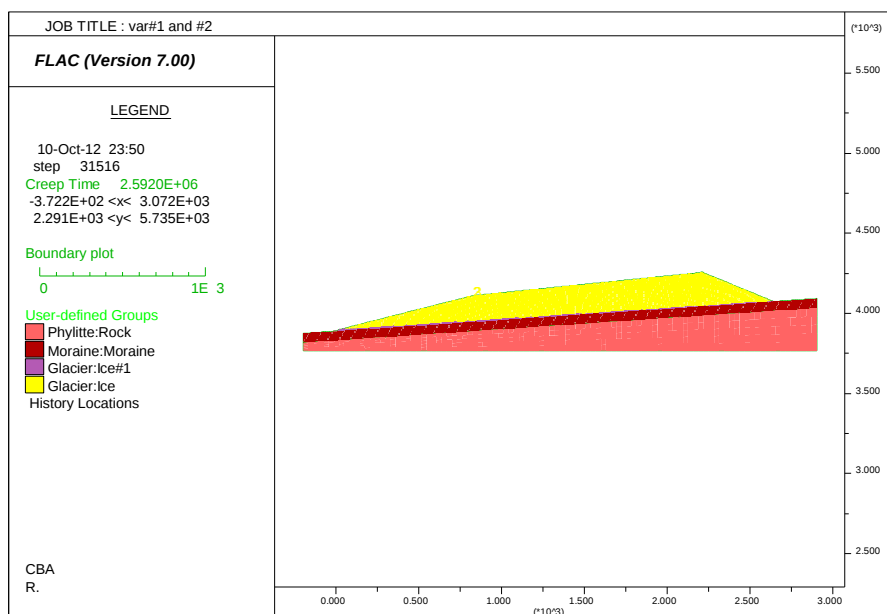


Рис. 2 - Модель для выполнения вычислительного эксперимента согласно матрице планирования.

Для анализа результатов эксперимента используем диаграмму Парето. На рис.3 показана диаграмма Парето. Как видно из рисунка, варьируемые факторы и их взаимодействие распределены в порядке уменьшения значимости (силы влияния) на скорость смещения ледника. Значимые факторы пересекают разделительную линию, соответствующую уровню значимости $p=0,05$. Согласно диаграмме Парето, наиболее значимым фактором является угол наклона ложа ледника. Следующим по значимости идет генеральный угол, как в линейной постановке (L) так и в квадратичной (Q). Невысокая значимость у взаимодействия факторов (1Lby 2L): угла наклона ложа и генерального угла, а также генерального угла и гидростатического давления воды (2Lby 3L). Гидростатическое давление воды, как фактор, влияющий на скорость смещения ледника, отнесен к малозначимому.

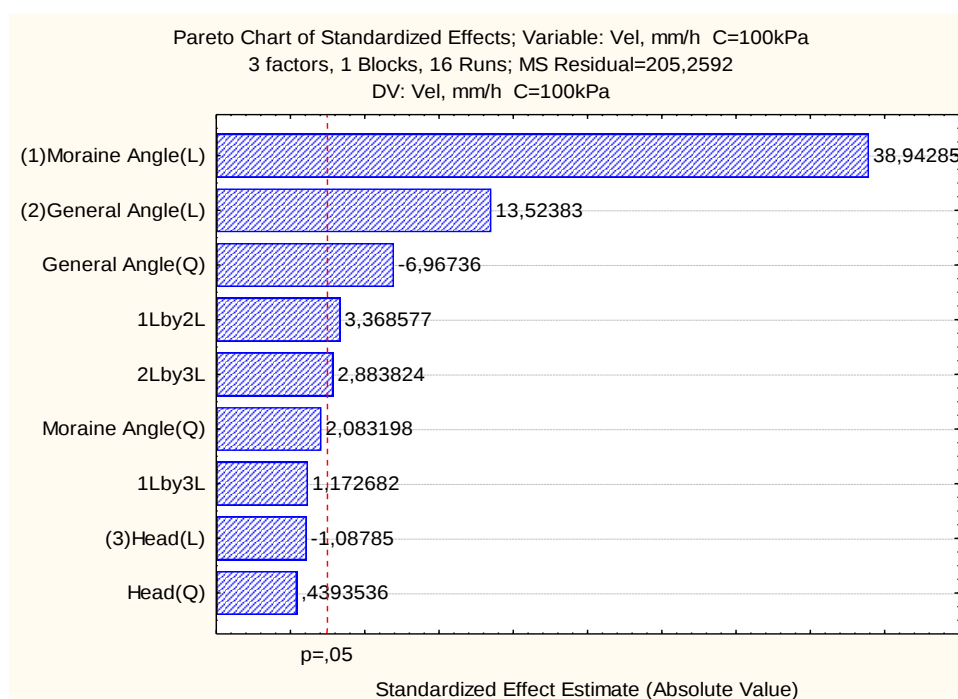


Рис. 3 - Диаграмма Парето с результатами значимости варьируемых факторов.

На рис. 4 показана поверхность функции отклика (скорость смещений ледника) в зависимости от угла наклона ложа ледника и генерального угла отработки ледника. Например, видно, что при малых значениях угла наклона ложа равных значений скоростей можно добиться при двух значениях генерального угла. В то же время, при возрастании угла наклона ложа ледника снижения скоростей можно добиться только за счет уположения генерального угла. Интерес вызывает малозначимость влияния гидростатического давления воды на скорость смещения ледника. Анализ данного явления нами был проверен по нескольким направлениям. В первую очередь, фактор воздействия гидростатического давления в модели FLAC. Приложение гидростатического давления приводит к деформированию сетки вверх на участках, где гидростатическое давление превышает вес вышележащего ледника, что отвечает физике явления. Наиболее очевидным является факт использования

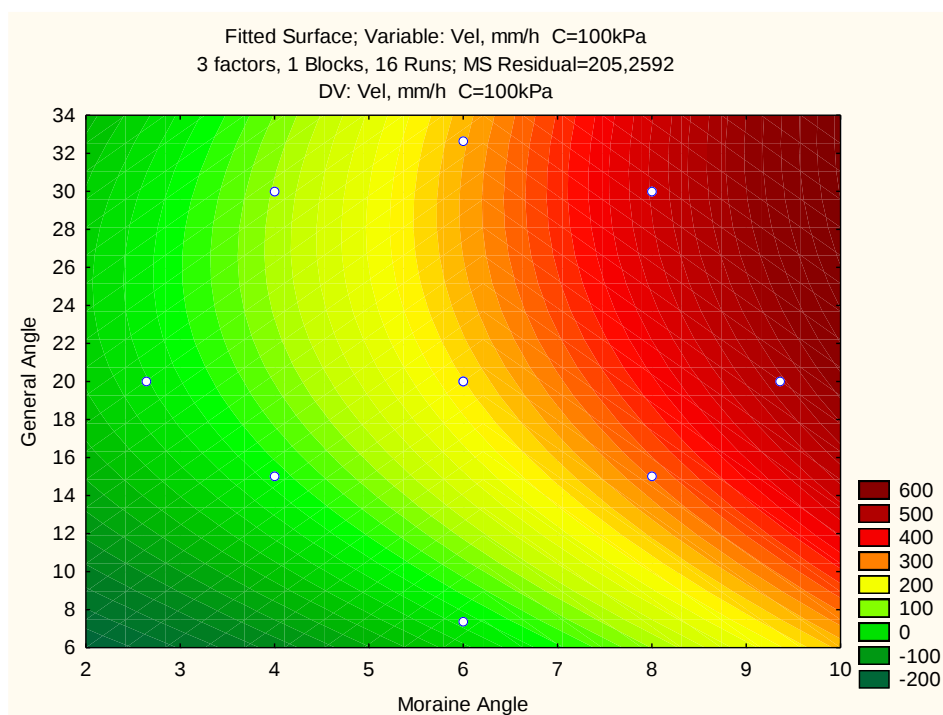


Рис. 4 - Поверхность функции отклика скорости смещений.

модели Мора-Кулона для описания свойств ледника, включая ледниковый прослой. Модель Мора-Кулона имеет вид:

$$\tau = C + (\sigma_n - p) * tg\varphi \quad (1)$$

где – τ величина касательного напряжения – сопротивления,

σ_n – нормальные напряжения к поверхности сдвига,

p – гидростатическое давление воды к поверхности сдвига,

φ – угол внутреннего трения материала.

Ввиду того, что значение угла внутреннего трения для льда в расчетах принималось $\varphi_{\text{л}}=0$, то воздействие на касательные напряжения - сопротивления τ от $(\sigma_n - p) * tg\varphi$ также равны 0.

Значения $\varphi = 0$ нами получены на основании подбора прочностных свойств льда из условий максимального приближения расчетных значений к данным мониторинга за смещениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Маэно. Наука о льде. Перевод с японского А.И. Леонова под ред. д.ф-м.н В.Ф. Петренко. - М.: Мир, 1988.- 231 стр.
2. Ю.П. Адлер, Е.В. Марков, Ю.В. Грановский. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. 278 стр.
3. Н.Джонсон, Ф. Лион. Статика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента //Перевод с английского под редакцией к.т.н. Э.К. Лецкого, д.т.н. Е.В. Марковой. –М.: Мир, 1981. 516 стр.