

Прикладные проблемы

УДК 551.324:622.693.25

Отвалы горной породы на леднике Давыдова (хр. Акшыйрак, Тянь-Шань)

© 2012 г. В.А. Кузьмиченок

Институт водных проблем и гидроэнергетики Национальной Академии наук Киргизской Республики, Бишкек
iwp@ists.kg

Статья принята к печати 24 февраля 2011 г.

Выдавливание льда, ледник, отвал горной породы, подвижка ледника.
Dump of rock, glacier, glacier squeezing out, glacier surge.

Подготовка и промышленная разработка золоторудного месторождения Кумтор сопровождается складированием пустой горной породы на поверхность ледника Давыдова. Общая масса складированной на ледник горной породы на конец 2010 г. превысила 200 млн т. Такая большая масса горной породы на леднике коренным образом перестраивает его режим. В работе рассмотрены два аспекта этой перестройки: провоцирование подвижки ледника Давыдова и выдавливание льда из-под отвалов.

Введение

Кумтор — крупнейшее золоторудное месторождение Киргизии, расположенное в нивально-гляциальной зоне (высоты 4000–4500 м) на северо-западном склоне хр. Акшыйрак. Оно было открыто в конце 1970-х годов. Подготовка площадки и строительство объектов на месторождении начались в октябре 1994 г. Промышленная разработка месторождения ведётся с 1996 г. киргизско-канадской компанией «Кумтор Оперейтинг Компани» (КОК). С 1995 г. отвалы горных пород весьма интенсивно складировуют на поверхность ледников. Так, в 2002 г. перемещено 16,8 млн м³ пустой породы, т.е. ежедневная цифра превышала 50 тыс. м³. Горные породы складировуются главным образом на поверхность ледника Давыдова. На начальном этапе разработки некоторое количество горных пород размещали на внеледниковой поверхности, а также на ледниках Лысый и № 360 по Каталогу [2]. Кроме того, для формирования карьера с допустимыми углами наклона бортов был почти полностью удалён висячий ледник № 359 [2] (северо-восточная часть карьера).

На рис. 1 дана картосхема формирования отвалов по годам. На конец 2003 г. отвалы перекрыли около 1,2 км² поверхности ледника Давыдова. К концу 2013 г. проектируется довести площадь отвалов на леднике до 3,8 км², что составит 34% общей площади ледника на 1986 г. Мощность отвалов горных пород на леднике Давыдова часто намного больше 50 м. Наиболее заметные последствия воздействия горной породы на ледник — провоцирование подвижек ледника и выдавливание ледникового льда из-под отва-

лов. Известно, что ледник Давыдова испытал незначительную подвижку во второй половине 1970-х годов [14]. Анализ материалов топографических съёмок этого ледника, выполненных в 1932 [5], 1943 [10], 1955 [7] и 1977 гг. [10] (рис. 2), не позволяет предполагать, что ледник Давыдова испытывал какие-либо подвижки между 1932 и 1977 гг. Однако подвижки ледника в начале XXI в., обусловленные складированием горных пород, заметны и визуально, и по результатам измерений. Выдавливание льда из-под отвалов обусловлено более высокой плотностью горных пород (2,6 т/м³) по сравнению с ледниковым льдом (0,9 т/м³). Проанализируем оба эти явления, используя совокупность необходимых данных.

Исходные данные

Топографические съёмки. На леднике Давыдова или только в его нижней части неоднократно велись специализированные топографические съёмки. Первая из них — тахеометрическая съёмка конца ледника в 1932 г. [5]. В период подготовки и проведения Международного геофизического года (1955–1957 гг.) на конце ледника проведена фототеодолитная съёмка [7]. Во второй половине 1970-х годов на основе аэрофотоснимков ледники хр. Акшыйрак были закартированы по состоянию на 1943 и 1977 гг. [10]. Кроме того, составлена карта изменений ледников [11]. В 1986–1987 гг. выполнена топографическая съёмка рельефа ложа ледника радиолокационным методом (технология полевых работ описана в работе [12], математическая обработка результатов — в [13]). По космическому изображе-

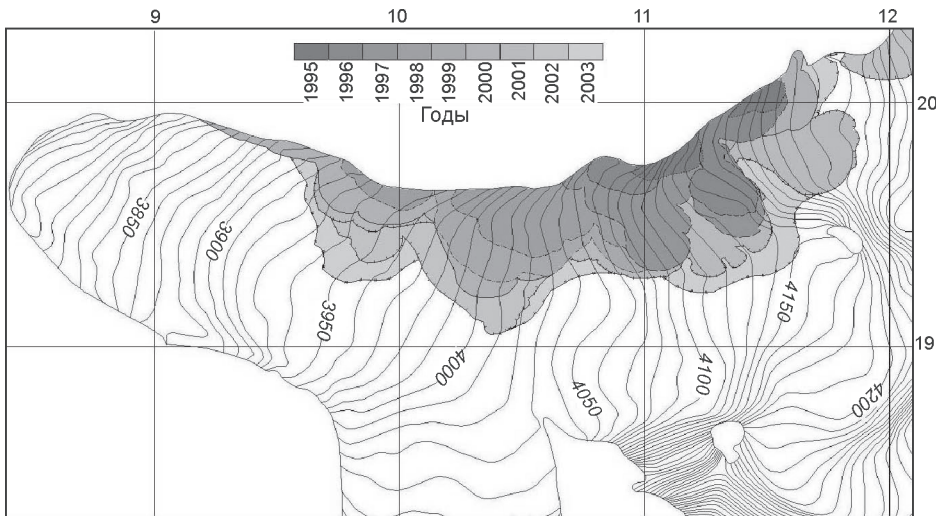


Рис. 1. Отвалы пустой горной породы разных лет на леднике Давыдова (координаты в км приведены в локальной системе координат КОК)

Fig. 1. Dumps of rock of various years at the Davydov Glacier (the coordinates in km listed in the local system of KOC)

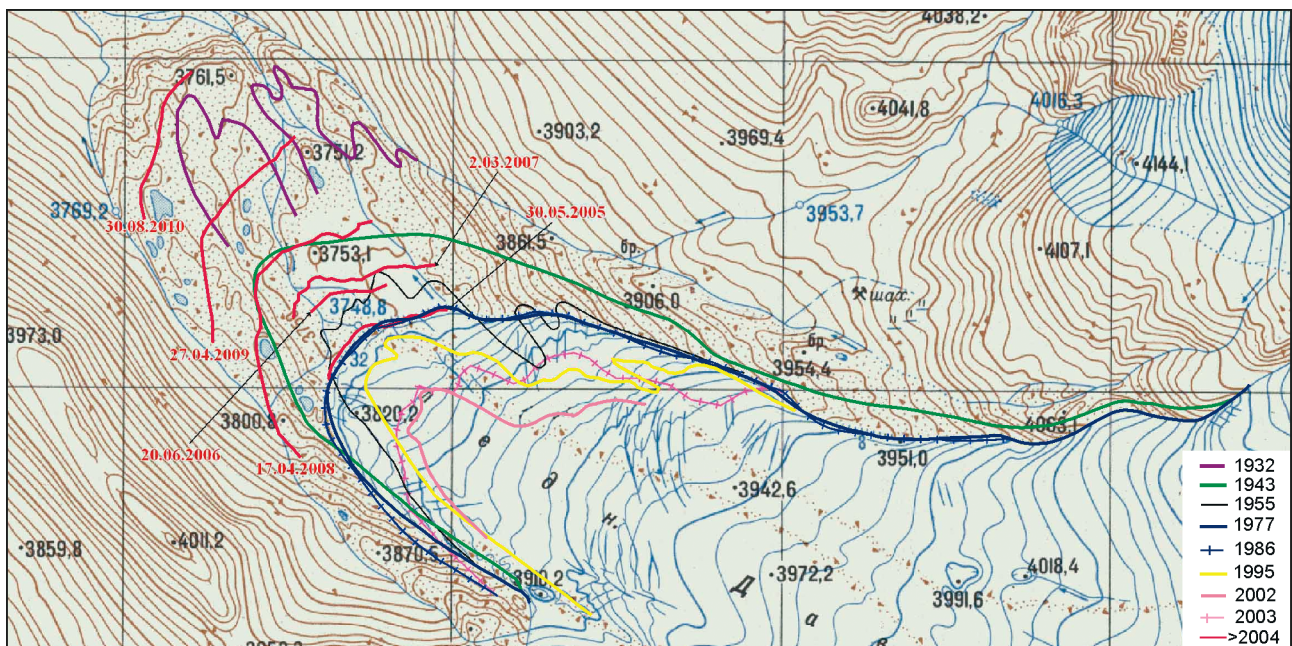


Рис. 2. Разновременные границы ледника Давыдова на фрагменте топографической карты масштаба 1:25 000

Fig. 2. Different time borders of the Davydov Glacier on a fragment of a topographic map of scale 1:25 000

нию ASTER (22 августа 2003 г.) выполнено повторное картографирование ледников хр. Акшыйрак [19].

Топографические съёмки 1943, 1977 и 1987 гг. сопровождалась формированием цифровых моделей рельефа (ЦМР). Кроме того, по заказу КОК коммерческой фирмой в 2003 г. была сформирована ЦМР (шаг 20 м) с использованием космического изображения QuickBIRD 19 сентября 2003 г. Для района исследований имеются топографические карты масштабов 1:5000, 1:10 000 и 1:25 000, правда, несколько устаревшие.

Мониторинговые рейки КОК. С 1995 г. по настоящее время инженерным отделом КОК на отвалах горной породы и на леднике Давыдова устанавлива-

ются мониторинговые рейки для слежения за их пространственным перемещением. На отвалах рейки устанавливаются сразу по завершении отсыпки, на леднике – по мере уничтожения старых рек. Координаты рек измеряются электронными тахеометрами с разной периодичностью (от ежедневных до ежемесячных). Декларируется точность фиксации координат и высот рек в миллиметрах. Однако реальная точность измерения координат (среднеквадратическая погрешность), по оценке автора, составила ± 3 см для каждой из координат. Впрочем, такая точность приемлема для анализа движения рек, выражающегося десятками и сотнями метров.

Автору были предоставлены файлы, содержащие около 9 тыс. результатов измерений, полученных более чем на 800 мониторинговых рейках. После тщательной проверки файлов и зафиксированных траекторий перемещений оставлены 8343 измерения по 777 рейкам (суммарно на отвалах горной породы и на леднике). Главная задача отбраковки – удаление тех результатов измерений, которые указывали на якобы резкий отскок рейки от вполне закономерной траектории движения с последующим возвратом к последней. Время нахождения мониторинговых реек на отвалах и леднике Давыдова составляло от нескольких до более 1300 суток. В единичных случаях длина хорд, замыкающих первое и последнее измерения, достигала 600 м.

Литературные источники. Для данной работы интересны опубликованные результаты измерений поверхностных скоростей движения ледника Давыдова. В качестве основных для ледника Давыдова отметим публикации [1, 7]. В первой из них приведены обобщённые результаты измерения скоростей за небольшой летний промежуток времени, во второй – за год. Практически все измерения выполнены в нижней части ледника (от слияния двух основных составляющих до нижнего конца). Примем, что скорости движения ледника Давыдова ниже слияния двух составляющих меняются от 20 до 35 м/год. Относительно средних суточных летних скоростей можно предполагать, что они изменяются от 5 до 10 м/сут. По-видимому, эти цифры характеризуют среднюю часть языка ледника Давыдова в нормальном (не при подвижке) состоянии.

Подвижки ледника

На хр. Акшыйрак имеются ледники, склонные к подвижкам. На рис. 3 показаны ледники, о которых достоверно известно, что они испытывали подвижки. На эту же картосхему дополнительно нанесены наиболее крупные тектонические разломы района [15]. Видно, что выделенные ледники, как правило, приурочены к разломам. Таким образом, можно предположить, что подвижки ледников в основном связаны с повышенным геотермальным потоком через зоны разломов и, следовательно, с увеличением содержания воды на ложе. Более одной подвижки зафиксировано только для ледника Безымянный: в стадии подвижки этот ледник фиксировался на материалах съёмки 1957 г. [7], на аэрофотоснимках 1977 г. и на космическом изображении 2003 г. Это позволяет предположить, что ледник Безымянный пульсирует с периодичностью 20–25 лет. Если ледник Давыдова тоже подвержен периодическим пульсациям, то можно утверждать, что его период пульсации, по-видимому, превышает 45 лет.

Визуальные признаки. Ежегодные посещения автором месторождения Кумтор не оставляли сомне-

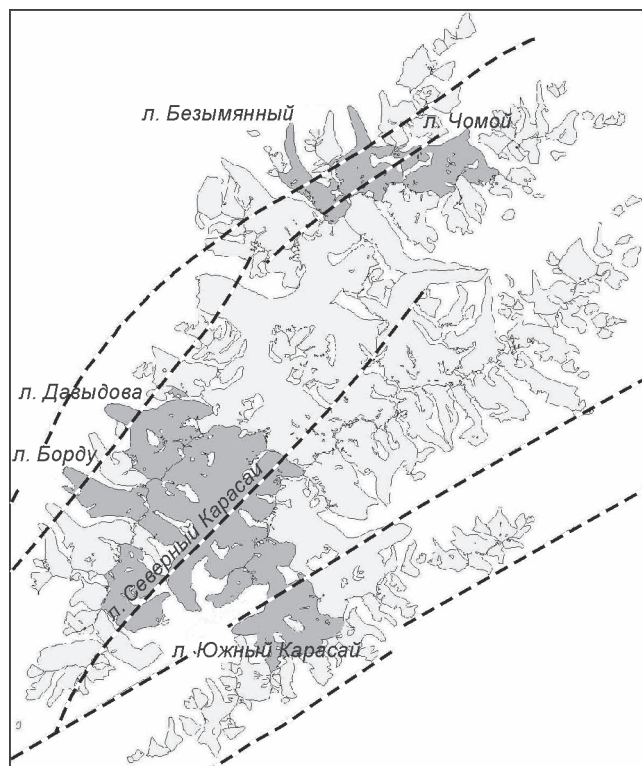


Рис. 3. Склонные к подвижкам ледники хр. Акшыйрак и крупные геологические разломы

Fig. 3. Glaciers of Akshyirak ridge, apt to surges, and major geological faults

ний в реальности происходящих подвижек языка ледника Давыдова просто по его внешнему виду. Признаки этого – вспучивание и растрескивание языка ледника, а также продвижение его фронта вниз по долине. Эти признаки хорошо видны на рис. 4 и не требуют комментариев.

Анализ скоростей движения. Автором сделаны многочисленные попытки анализа перемещений мониторинговых реек КОК. Рейки, расположенные на леднике и на отвалах горной породы, рассматривались отдельно. Остановимся на наиболее общих результатах анализа.

На первом этапе изучались изменения средних годовых скоростей движения реек. Для этого были отобраны рейки с периодом существования не менее 550 суток. Таких реек на леднике 35, на отвалах 45. Для них вычислялись средние годовые горизонтальные движения на скользящих 365-дневках с шагом в 10 дней (вычислялись средние значения за 365 дней, а эти 365 дней последовательно сдвигались на 10 дней). На шкале времени вычисленные скорости позиционировались последней датой интервала. Оказалось, что для ряда реек на леднике среднегодовые горизонтальные скорости к моменту их уничтожения (середина июля 2003 г.) изменялись от 150 до 400 м/год, а для

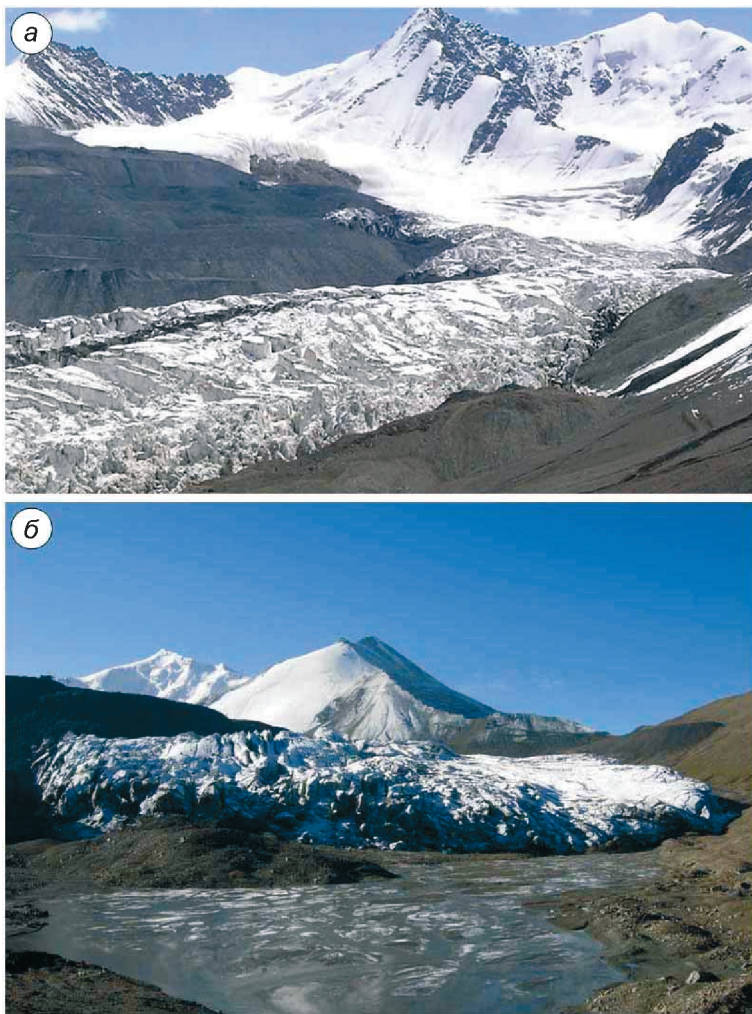


Рис. 4. Видимые признаки подвижек ледника Давыдова:

a – вспучивание и растрескивание языка ледника (фото 27 июля 2004 г.); *б* – приближение конца языка ледника к конечной морене малого ледникового периода (фото 5 августа 2008 г.)

Fig. 4. Visible signs of surge of the Davydov Glacier: *a* – swelling and cracking of the glacier lobe (photo 27.07.2004); *b* – the lobe approaching the end moraine of the Little Ice age (photo 5.08.2008)

реек на отвалах – до 360 м/год. Существенный рост среднегодовых горизонтальных скоростей фиксируется в апреле–мае 2002 г. (последняя дата осреднения). Видно, что среднегодовые горизонтальные скорости движения ледника Давыдова увеличились на порядок.

Для исследования среднесуточных скоростей движения ледника и отвалов мы оставили лишь те рейки, которые, наряду с наиболее длинными траекториями перемещений, имели значительный период измерений. Таких реек на леднике отобрано четыре, а на отвалах – две. В табл. 1 приведены общие сведения об отобранных рейках. Геодезические измерения фиксируют пространственное положение реек на определённую дату, а не собственно скорости их перемещения. Поэтому была предпринята упрощённая математическая обработка результатов измерений методом скользящего интегрирования уравнения параболы на трёх смежных временных интервалах. Результаты этих вычислений даны на рис. 5. Видно, что обе рейки на отвалах и рейки № 76 и 96 на леднике в течение всего отрезка времени имели среднесуточные скорости,

превышающие нормальные. В марте–апреле 2002 г. началась первая существенная подвижка ледника Давыдова, которая достигла своего максимума в августе этого же года. В апреле–мае 2003 г. произошла вторая подвижка. В подвижки вовлекался не весь язык ледника, а только погребённая под отвалами и прилегающая к ним части. В дальнейшем локальные подвижки ледника Давыдова фиксировались в декабре 2006 г., в августе и декабре 2007 г., в мае–июне и сентябре 2008 г. Скорость продвижения нижнего конца ледника вниз по долине иногда превышала 30 м/мес. На рис. 2 видно, что с 22 июля 2002 г. (GPS-измерения) по 30 августа 2010 г. (тахеометрическая съёмка) язык ледника Давыдова продвинулся вниз по долине примерно на 1,1–1,5 км.

Выдавливание льда отвалами

Естественные обвалы горной породы на поверхность горных ледников – явление обычное. Правда, масса обвалившейся горной породы не достигает сотен миллионов тонн, как в рассматриваемом

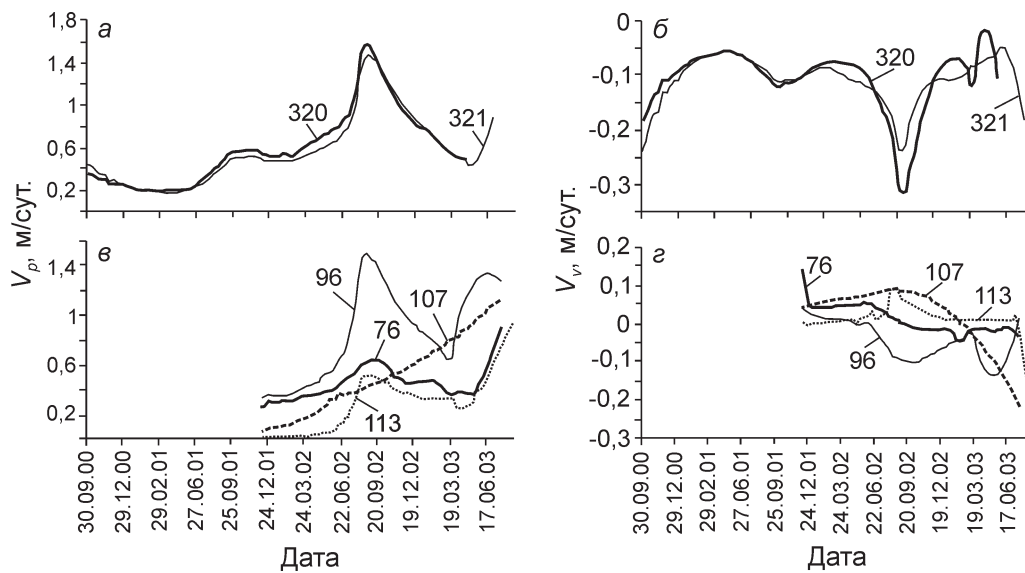


Рис. 5. Среднесуточные скорости движения избранных мониторинговых реек КОК:

а, б – рейки на отвалах; *в, г* – рейки на леднике; *а, в* – скорости по горизонтали; *б, г* – скорости по вертикали

Fig. 5. Average daily speeds of movement of selected monitoring rods: *a, б* – rods at dumps; *в, г* – rods on the glacier; *a, в* – horizontal speeds; *б, г* – vertical speeds

случае. Обвалы больших объёмов происходят не часто. Так, в работе [3] описывается случай, когда на ледник Халде (Кавказ) обрушилась боковая морена, образовавшая на поверхности ледника вал длиной 300 м и толщиной 15 м. Отметим, что с 1968 по 1973 г. этот вал сместился на 270 м (средняя скорость движения составила 58,7 м/год), а превышение гребня над поверхностью увеличилось на 5 м [3], т.е. эта огромная масса горной породы так и не погрузилась в тело ледника.

В классической физике ледников [16] или в гляциомеханике [9] обычно не рассматривается выдавливание ледникового льда горной породой, попавшей на его поверхность. Известны только частные случаи математического моделирования, среди которых, например, расчёт соотношения между контактной силой и глубиной вдавливания при неупругом ударе твёрдого шара о поверхность ледяного покрова [18]. В исследовании [8] описывается похожая, но обратная к рассматриваемой здесь задача: перетекание вещества верхней мантии под действием ледовой нагрузки – ледникового покрова типа антарктиче-

ского. Поэтому нам придётся разрабатывать численную модель этого процесса.

Визуальные признаки. Как уже отмечалось, автору статьи процесс выдавливания льда из-под отвалов горной породы очевиден просто из увиденного. Внешние части отвалов часто и достаточно значительно (на десятки метров) со временем уменьшали свою высоту. На контакте склона отвалов и ледника возникали понижения, а в нескольких десятках метров от них – растрескивание и вспучивание льда (рис. 6). Сопоставляя ЦМР поверхности ледника Давыдова 1986 и 2003 гг., можно предположить, что понижение местами превышало 30 м, а вспучивание – 40 м. Характеризует выдавливание льда и смещение срединной морены ледника Давыдова во времени. Так, в результате подвижки в конце 1970-х годов срединная морена ледника к 1989 г. сместилась на 100 м к северу [14], а выдавливание льда отвалами горной породы с 1989 по 2003 г. – на 290 м к югу.

Общие соображения о моделировании. В нашем случае выдавливание льда из-под отвалов характеризуют изменения во времени высот мониторинговых

Таблица 1. Сведения об избранных мониторинговых рейках КОК на отвалах горных пород и на леднике Давыдова

Условный номер рейки N_o^*	Дата измерения: первого Db /последнего De	Продолжительность измерений Kd , сутки	Число выполненных измерений Km	Длина траектории движения S , м	Средняя скорость движения, м/год: по горизонтали V_p /по вертикали V_v
320	07.09.00/19.04.03	954	39	566,314	216,671/–40,090
321	07.09.00/30.06.03	1026	45	582,705	207,298/–40,542
76	25.11.01/19.07.03	601	18	272,588	165,549/4,568
96	02.12.01/19.07.03	594	19	514,215	315,974/–16,99
107	02.12.01/19.07.03	594	9	307,457	188,926/7,939
113	02.12.01/19.08.03	625	19	190,623	111,324/4,365

*Рейки 320 и 321 расположены на отвалах горных пород, остальные – на леднике Давыдова.



Рис. 6. Вспучивание льда вблизи отвалов горной породы:

a – у окончания южной составляющей ледника Давыдова (фото 26 ноября 2007 г.); *б* – у правого борта ледника ниже слияния двух его составляющих (фото 5 августа 2008 г.)

Fig. 6. Swelling of ice near the dumps of rock:

a – at the end of the southern part of Davydov Glacier (photo 26.11.2007; *b* – at the right side of the glacier below the confluence its two components (photo 05.08.2008)

реек КОК, размещённых на отвалах. Уменьшение высот этих реек можно объяснить тремя процессами: 1) уплотнением отвалов во времени; 2) смещением реек вместе с телом ледника вниз по долине; 3) уменьшением остаточной толщины льда под отвалами из-за его выдавливания.

Первоначальную мощность отвала Z_d^0 можно получить из разности высот

$$Z_d^0 = H_d^0 - H_s^0, \quad (1)$$

где H_d^0 – первоначальная высота мониторинговой рейки; H_s^0 – высота поверхности ледника в надире рейки на дату первого измерения.

В этом случае с учётом трёх упомянутых ранее процессов для толщины льда под отвалами в произвольный момент времени Z_g можно записать следующее уравнение:

$$Z_g = H_d - H_b - Z_d^0 - C, \quad (2)$$

где H_b – высота ложа ледника в надире рейки; C – уплотнение отвала.

Уравнение (2) позволяет вычислить остаточную толщину ледникового льда под отвалами горной породы для каждого из моментов измерений на мониторинговых рейках КОК. Далее можно попытаться найти математическое описание процесса выдавливания.

Проблема определения Z_d^0 . Как видно из выражения (1), для определения первоначальной мощности отвала необходимо знать высоту поверхности ледника в надире мониторинговой рейки на дату первого измерения. Однако топографические карты и ЦМР поверхности ледника Давыдова имеются лишь на фиксированные даты, а не на произвольные даты первого измерения реек. Для решения проблемы учёта изменений высоты поверхности ледника Давыдова во времени мы попытались установить закономерности изменений этой высоты на ЦМР поверхности ледника Давыдова 1943, 1977 и 1986 гг. Статистически значимых закономерностей не установлено, поэтому было вычислено лишь среднегодовое изменение высоты поверхности ледника Давыдова в

районе расположения отвалов горных пород. Оно составило $-0,5612$ м/год и далее использовалось для приведения высоты поверхности ледника к дате первого измерения по рейкам.

Нет особых оснований полагать, что предел текущей льды [6] в достаточно большом числе случаев не был преодолен уже в самом начале отсыпки отвалов до момента первого измерения на рейках. Следовательно, первоначальная мощность отвалов, рассчитываемая как разность высот реек и предполагаемых высот поверхности ледника, может быть существенно уменьшена. Каких-либо надёжных исходных данных для решения этой проблемы нет, поэтому на предварительном этапе вычислений остановимся на следующем варианте: первоначальная мощность отвалов равна высоте рейки в момент первого измерения минус высота поверхности ледника в 1986 г., приведённая к дате этого измерения.

Уплотнение отвалов. Предположим, что уплотнение отвалов (уменьшение их мощности) во времени происходит с затуханием, т.е. аппроксимирующая процесс функция должна иметь асимптоту. После апробирования для аппроксимации была избрана дробно-линейная функция вида

$$C = -\frac{a+bt}{1+ct}, \quad (3)$$

где a , b и c — неизвестные коэффициенты; t — время.

Понятно, что выражение (3) имеет асимптоту

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} C = -\frac{b}{c}.$$

Для отыскания неизвестных коэффициентов в выражении (3) по методу наименьших квадратов использовались результаты измерений на семи мониторинговых рейках КОК, размещённых на внеледниковой поверхности. Для всех реек получены статистически значимые аппроксимации со среднеквадратическими погрешностями от 0,004 до 0,071 м. Далее значения коэффициентов совместно уточнялись для всей совокупности реек. В результате получено рабочее уравнение, связывающее время, прошедшее с момента завершения отсыпки отвала в данной точке (t_0), и величину уплотнения:

$$C = -\frac{0,04 + 0,039t_0}{1 + 0,019t_0}. \quad (4)$$

В выражение (4) время следует подставлять в сутках, а асимптота A имеет значение, равное $-2,05$ м. Отметим также, что примерно половина уплотнения моделируется по выражению (4) в первые 50 дней.

Вычисление H_b . Для вычисления высот ложа ледника в надире реек на каждую из дат измерений по материалам топографической съёмки рельефа ложа ледника Давыдова радиолокационным мето-

дом в 1986–1987 гг. использовался следующий вычислительный алгоритм: 1) последовательно рассматривалась каждая дата измерений каждой мониторинговой рейки КОК на отвалах горной породы; фиксировались условная дата (порядковый номер дня, начиная с 1 января 1995 г. — «кумторовские» дни) и прямоугольные координаты рейки; 2) по исходным файлам результатов съёмки определялся треугольник, к которому относятся зафиксированные координаты; 3) из уравнения касательной плоскости к трём шаровым сегментам возможного отражения радиоволн треугольника вычислялась высота ложа ледника [13].

Одновременно вычислялась и высота поверхности ледника в 1986 г. на первую дату измерений путём линейной интерполяции в верхнем треугольнике (координаты тех же точек треугольника, но высоты — поверхности). Оценка точности, выполненная автором ранее по точкам радиолокационного зондирования на пересекающихся маршрутах съёмки, позволяет предположить, что среднеквадратическую погрешность вычисления высот ложа для ледника Давыдова можно оценить по формуле

$$\sigma_b = 1,44 + 0,02Z_g, \quad (5)$$

где Z_g — толщина ледника, м.

Результаты предварительных вычислений.

В результате выполненных вычислений сформирован файл, в котором для каждой из 196 отобранных мониторинговых реек КОК на отвалах ледника Давыдова (не менее 30 суток существования) и для каждой даты измерений зафиксированы: условная дата («кумторовская», первые сутки — 1 января 1995 г.); прямоугольные координаты; высота рейки; высота поверхности ледника; остаточная толщина льда. Всего в итоговый файл вошли 4490 результатов измерений.

Из рабочих графиков изменений остаточной толщины льда видно, что для значительной части реек (67) характерно увеличение этого показателя во времени. Однако чаще всего это — разовые увеличения. Все увеличения толщины не выходят за пределы точности радиолокационного зондирования, вычисленного по формуле (5). В принципе, реальное увеличение остаточной толщины льда возможно, когда новый отвал формируется ниже старого, ещё окончательно не выдавившего лёд, и выдавливаемый старым отвалом лёд подтекает под новый. Однако на реальных результатах измерений уверенно такие случаи не зафиксированы.

Кроме того, анализ изменений остаточной толщины льда показывает, что, несмотря на затухание скорости уменьшения остаточной толщины льда, сохраняются существенные значения этих величин. По моему мнению, это подтверждает вывод, что к

моменту завершения отсыпки отвала выдавливание льда уже давно происходило, поэтому в принятые значения начальных высот поверхности ледника нужно вносить поправки. Позже, для выяснения закономерности и асимптотичности затухания скоростей, был выполнен весьма трудоёмкий анализ изменений во времени вычисленных значений Z_g . Одновременно обрабатывались как все данные, так и в группах, сформированных по интервалам скоростей их движения, характеру затухания изменений Z_g , удалению от границы ледника и др. В результате сделаны некоторые частные выводы и отбраковано 12 мониторинговых рек из 196.

Моделирование положения линии налегания отвалов на ложе ледника. Вычисленные значения Z_g для каждой из рек далее последовательно аппроксимировались следующими функциями:

$$Z_g = ae^{bt}; \quad (6)$$

$$Z_g = ae^{ct + dt^2}; \quad (7)$$

$$Z_g = ae^{ft^2}, \quad (8)$$

где a, b, c, d и f – неизвестные коэффициенты.

Если коэффициент a положителен, а коэффициенты b, c и f отрицательны, то эти три функции имеют конечное положительное значение Z_g при $t = 0$ и относятся к убывающим с нулевой асимптотой, что соответствует физическому смыслу решаемой задачи. Относительно функции (7) отметим, что кривая, порождаяемая этой функцией, симметрична относительно вертикальной прямой $t_m = -(c/2d)$ и имеет на этой прямой максимальное значение. Очевидно, здесь необходимо, чтобы эта вертикальная прямая не находилась в положительной области значений t . Поэтому в нашем алгоритме, если t_m получается положительным, то вместо коэффициентов уравнения (7) вычисляются коэффициенты уравнения (8), обеспечивающего максимальное значение Z_g при $t = 0$, а не в положительной области t .

При аппроксимации по методу наименьших квадратов по формулам (6)–(8) одновременно находят наилучшие поправки к H_s^0 для каждой рейки. Значимость аппроксимаций оценивалась по F -критерию (Фишера–Снедекора) [17]. В результате вычислений для 77 из 184 рек получены значимые аппроксимации с использованием одного или двух уравнений (6)–(8). Уравнение (6) подходило для 60 рек, (7) – для 8 рек, а (8) – для девяти. Значения поправок ΔH_s^0 получены в интервале от +35 до –87 м, их среднее значение равно –42,8 м. Положительные значения поправок соответствуют случаям, когда новый отвал формируется на вспученную от старого отвала ледниковую поверхность. Большие по абсолютной величине отрицательные поправки соответствуют случаям отсыпки отвалов

Таблица 2. Число рек КОК, под которыми к концу указанного года был полностью выдавлен глетчерный лед

Год	Число рек КОК N	Накопленное число рек N_k^*
1996	2	2
1997	2	4
1998	3	7
1999	6	13
2000	1	14
2001	11	25
2002	16	41
2003	16	57
2004	38	95
2005	45	140

*Суммированное с начала первого года и до конца текущего.

на участки ледника, ранее подвергшиеся подвижке. Среднеквадратические погрешности аппроксимации варьировали от 0,01 до 6,29 м, однако 55 их значений (71%) не превышали 0,5 м.

Для тех рек, где значения ΔH_s^0 не были вычислены, их получали линейной интерполяцией от ближайших рек с уже вычисленными поправками. Для 23 рек интерполяция оказалась недостаточно надёжной, поэтому они были исключены из дальнейшего рассмотрения. Далее заново, с учётом полученных поправок ΔH_s^0 , вычислялись значения Z_g на все даты измерений. Из аппроксимаций (6)–(8) эти значения определены для всех дат, начиная со времени первого измерения и до 31 декабря 2005 г. по каждой из рек. На основании совокупности полученных результатов установлены даты, когда Z_g становилась меньше 3 м или меньше среднеквадратической погрешности аппроксимации по (6)–(8), если последняя была больше 3 м. Зафиксированные таким образом даты считались моментом времени, когда отвалы полностью выдавливали ледниковый лед. В табл. 2 приведены сведения о количестве рек, для которых зафиксировано полное, с учётом указанного допуска (3 м или среднеквадратическая погрешность), выдавливание льда из-под отвалов на конец указанного в табл. 2 времени. Сведения, полученные при бурении геологоразведочных скважин через толщу отвалов, ледниковый лёд (если он остался) и ниже расположенные горные породы, даны в табл. 3. Анализ результатов моделирования линии налегания отвалов горной породы на ложе ледника к 31 декабря 2005 г. показал, что результаты этого моделирования достаточно хорошо подтверждаются результатами бурения.

Обосновывая принятый допуск на минимальную остаточную толщину льда под отвалами, остановимся на результатах термобурения ледника Давыдова в

Таблица 3. Сведения о скважинах КОК, пробуренных сквозь отвалы горной породы*

Номер скважины	Дата бурения	X	Y	Высота устья скважины H, м	Глубина скважины D, м	Z _г , м
933	04.03.05–17.03.05	19 550,5	10 417,8	4061,0	91,5	0
938	17.03.05–26.03.05	19 223,1	10 018,2	4004,1	115,7	0
947	26.03.05–05.04.05	19 278,7	11 126,5	4119,0	88,0	42,7
953	05.04.05–08.04.05	19 243,1	10 739,6	4100,0	84,5	14,8
956	08.04.05–15.04.05	19 369,3	11 112,7	4121,3	96,7	37,3
960	15.04.05–23.04.05	19 587,1	11 084,5	4122,8	79,5	4,0
965	23.04.05–29.04.05	19 356,7	10 493,7	4060,0	93,8	0
968	29.04.05–03.05.05	19 416,9	10 748,6	4087,0	78,2	0
970	04.05.05–10.05.05	19 690,0	11 061,8	4124,2	62,2	0

*X и Y – прямоугольные геодезические координаты КОК, м; Z_г – толщина ледника.

июле 1985 г. [4]. В работе [4] авторы пишут: «До глубины 102 м средняя скорость чистого бурения составляла 5 м/ч. Ниже, до глубины 108 м, она уменьшилась и на уровне 109 м продвижение иглы прекратилось. Плавное понижение скорости проходки позволяет предположить, что остановка иглы связана не со случайным препятствием, например, с камнем, а с резким увеличением концентрации моренно-обломочного материала в придонной части ледника». Таким образом, глубину 102 м в точке бурения можно считать верхней кровлей придонного слоя льда с повышенным содержанием моренного материала, а глубину 109 м – нижней кровлей этого слоя. Глубже, видимо, следуют либо коренные породы, либо древние моренные отложения, уже практически не содержащие ледникового льда, т.е. ложе современного ледника Давыдова. Таким образом, толщину придонного слоя льда с моренным материалом можно считать равной 6–7 м. Поэтому принятый ранее допуск в 3 м вполне оправдан.

Отметим также, что при радиолокационном зондировании в 1986 г. на расстоянии 3 м от устья скважины, пробуренной в 1985 г., толщина ледника составила 105 м. Заметим, что непосредственно над устьем скважины зондирование сопровождалось высоким уровнем помех, обусловленных, видимо, оставленной в скважине кривой термисторов. Скорректировав результаты нашего зондирования с учётом разности координат и годового слоя таяния льда, получим толщину ледника в 108,5 м. Даже если не принимать во внимание отличное совпадение результатов, всё же надо сделать два вывода: 1) выполненное в 1986 г. радиолокационное зондирование имеет достаточно хорошую точность; 2) результаты нашего зондирования отражают данные о ложе ледника Давыдова, а не о верхней кровле льда с придонной мореной.

Моделирование выдавливания льда в произвольной точке. Именно такая задача и ставилась автору в

Таблица 4. Время (сутки), необходимое для достижения остаточной толщины льда (Δ в м) под отвалами горных пород для точек I–III при первоначальных высотах отвалов H_m после момента их полной отсыпки

H _m , м	Точка I			Точка II			Точка III		
	Δ=10	Δ=7	Δ=5	Δ=10	Δ=7	Δ=5	Δ=10	Δ=7	Δ=5
4300	292	341	388	318	371	421	515	592	664
4320	256	305	351	281	333	382	468	542	613
4340	214	262	307	237	288	336	417	489	558

задании КОК. Для этого в верхней части ледника были заданы точки, примыкающие к новому отвалу, планируемому на ближайшее время. Автор выбрал аналитический способ решения поставленной задачи. Для этого для совокупности полученных ранее значений поправок ΔH_s⁰ подбирались наилучшая аппроксимирующая функция. Апробировалось около сотни уравнений с разными сочетаниями восьми исходных параметров реек. Наилучшим, со среднеквадратической погрешностью аппроксимации 9,4 м, оказалось уравнение

$$\Delta H_s^0 = -569,34 - 0,06979X - 0,07070Y + 0,65251H_s^0 + 0,82986Z_d^0, \quad (9)$$

где X и Y – прямоугольные геодезические координаты КОК, м.

Далее были получены подходящие аппроксимирующие функции для a и b уравнения (6):

$$a = -140,962 + 0,034246H_s^0 - 0,04472Z_d + 0,97545Z_g; \quad (10)$$

$$b = 4,1997 - 0,0009782H_b + 0,016549U - 0,003697Z_d - 0,08738t_m, \quad (11)$$

где U – угол наклона ложа ледника, градусы; t_m – условное время завершения формирования отвала (в «кумторовских» датах).

Отметим, что для аппроксимации a использовано восемь близлежащих к заданным точкам реек, для b — 60 реек с хорошей аппроксимацией по (6). Результаты моделирования выдавливания льда для заданных точек с использованием уравнений (6), (9)–(11) приведены в табл. 4. Видно, что практически полное выдавливание льда из-под проектируемых новых отвалов для точек I и II может произойти за 1–1,5 года, а для точки III — почти за 2 года.

Заключение

Полученные результаты анализа подвижек ледника Давыдова и моделирования выдавливания ледникового льда отвалами горной породы достаточно обоснованы и объективны. Заметим, что оба эти процесса облегчили разработку месторождения, так как в результате подвижек появились места для новых отвалов, а полное выдавливание льда из-под отвалов позволило в последующие годы углубить карьер месторождения, не опасаясь при этом за сползание в него ледникового льда.

Благодарности. Работы выполнены по заказу компании «Кумтор Оперейтинг Компани». Автор признателен сотрудникам инженерного отдела этой компании за доброжелательную помощь в сборе исходных данных.

Литература

1. Баков Е.Б. Закономерности движения и динамики ледников Центрального Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1983. 157 с.
2. Барбат Ю.П., Святец А.Д., Черкасов Л.Г. Каталог ледников СССР: Т. 14. Средняя Азия. Вып. 1. Сырдарья. Ч. 5. Бассейны правых и левых притоков верховьев р. Нарын. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 80 с.
3. Вартанов Г.С. Особенности движения и колебаний крупных ледников Центрального Кавказа по материалам фотогеодезических съемок 1967–1973 гг. // МГИ. 1981. Вып. 41. С. 180–187.
4. Василенко Е.В., Громыко А.Н., Дмитриев Д.Н., Мачерет Ю.Я. Строение ледника Давыдова по данным радиозондирования и термобурения // МГИ. 1988. Вып. 62. С. 208–215.
5. Воробьев С.П. Атлас ледников Нарынско-Хантенгринской экспедиции // Тр. ледниковых экспедиций: Вып. 2. Тянь-Шань. Верховье Большого Нарына. Л., 1935. 188 с.
6. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
7. Забиров Р.Д., Книжников Ю.Ф. Фототеодолитная съемка ледников Тянь-Шаня в период МГГ. Фрунзе: изд. АН Киргизской ССР, 1962. 101 с.
8. Красс М.С. Математические модели и численное моделирование в гляциологии. М.: изд. МГУ, 1981. 139 с.
9. Красс М.С. Математическая теория гляциомеханики: Итоги науки и техники. Гляциология. Т. 3. М.: изд. ВИНТИ, 1983. 142 с.
10. Кузьмиченок В.А. Технология и возможности стереопографического картографирования изменений ледников (на примере оледенения хребта Ак-Шыйрак) // МГИ. 1989. Вып. 67. С. 80–87.
11. Кузьмиченок В.А. Изменения ледников хребта Ак-Шыйрак с 1943 по 1977 годы. М.: изд. ГУГК СССР, 1990. 1 л. (карта масштаба 1:50 000).
12. Кузьмиченок В.А. Топографическая съемка рельефа ложа горных ледников радиолокационным методом // Геодезия и картография. 1990. № 11. С. 18–23.
13. Кузьмиченок В.А., Василенко Е.В., Мачерет Ю.Я., Москалевский М.Ю. Толщина льда и подледный рельеф ледника Абрамова по данным низкочастотного радиозондирования // МГИ. 1992. Вып. 75. С. 63–68 (плюс три карты).
14. Кузьмиченок В.А. Математическое моделирование ледникового гистерезиса // МГИ. 2008. Вып. 105. С. 29–34.
15. Линеаменты и кольцевые структуры: Природные ресурсы Киргизской ССР. М.: изд. ГУГК СССР, 1987. 10 л. (карта масштаба 1:500 000).
16. Патерсон У.С.Б. Физика ледников. М.: Мир, 1984. 472 с.
17. Смирнов Н.В., Белугин Д.А. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии. М.: Недра, 1969. 381 с.
18. Храпатый Н.Г., Березовский А.А. Внедрение твердого тела в лед // Тр. ААНИИ. 1984. Т. 386. С. 56–62.
19. Aizen V.A., Kuzmichenok V.A., Surazakov A.V., Aizen E.M. Glacier changes in central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote sensing data // Annals of Glaciology. 2006. V. 43. P. 1–13.

Summary

Since 1995, a barren rock has been formed at the Davydov Glacier, due to the works at the Kumtor Gold Mine. By the end of 2010, total amount of the rock, stockpiled on the glacier, apparently exceeded 200 million tons, the height of dumps of rock sometimes exceeded 50 meters. The most noticeable effects of this are provoking local surges of the Davydov Glacier and squeezing glacier ice out of the dumps of rock. For a detailed analysis of both processes, we also used the results of periodic geodetic measurements (over 8000) of monitoring rods (about 800 rods) of the gold mining company. A number of local surges of the glacier has been found, the first of which began in March–April 2002. To analyze glacier squeezing out of the dumps of rock, mathematical modeling of that process has been done. It was established that in most cases, the glacier is almost completely squeezed out of for 1–2 years.