

# Прикладные проблемы

УДК 551.324:551.510.42:553

## Запылённость атмосферы и ледников в районе месторождения Кумтор (хр. Акшыйрак, Тянь-Шань)

© 2012 г. В.А. Кузьмиченко

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

Статья принята к печати 1 августа 2011 г.

Ледник, приземный слой атмосферы, пробоотборник воздуха, пыль, снежный покров.  
Air sampler, dust, glacier, snow cover, surface layer of air.

Промышленная разработка золоторудного месторождения Кумтор, начатая в 1996 г., неизбежно сопровождается выделением дополнительного количества пыли в атмосферу. Проанализированы результаты многолетних измерений количества пыли в приземном атмосферном воздухе и разовые измерения количества пыли в сезонном слое снега на близлежащих ледниках. Установлено незначительное влияние производственно-хозяйственной деятельности в районе разработки месторождения на увеличение запылённости приземного слоя атмосферы и близлежащих ледников.

### Введение

Крупнейшее в Киргизии золоторудное месторождение Кумтор, расположенное на северо-западном склоне хр. Акшыйрак (высота 4000–4500 м), открыто советскими геологами в конце 1970-х годов (рис. 1). Подготовка месторождения к открытой разработке началась в октябре 1994 г., а 31 декабря 1996 г. была отлита первая партия золота. Промышленную разработку месторождения ведёт киргизско-канадская компания «Кумтор Оперейтинг Компани» (КОК). Разработка месторождения сопровождается выбросами пыли в приземный слой атмосферы и на поверхность близлежащих ледников (Сары-Тор, Давыдова, Лысый – соответственно № 357, 359, 360 по Каталогу ледников СССР [1]). Основные техногенные источ-

ники пыли – технологические взрывы на карьере (рис. 2) и работа тяжёлой горной техники на карьере, камнедробилке, отвалах и дорогах (рис. 3).

Технологические взрывы на карьере, во всяком случае в холодное время года, которое длится здесь до девяти месяцев, практически не сопровождаются выбросами пыли. Это объясняется тем, что для взрыва бурится достаточно большое число скважин и цель бурения – не выброс горной породы, а лишь её дробление на месте. Так, демонстрируемый нами взрыв (см. рис. 2) проведён в 209 скважинах с общей



Рис. 1. Местоположение золоторудного месторождения Кумтор в Киргизии

Fig. 1. Location of Kumtor Gold Mine in Kyrgyzstan



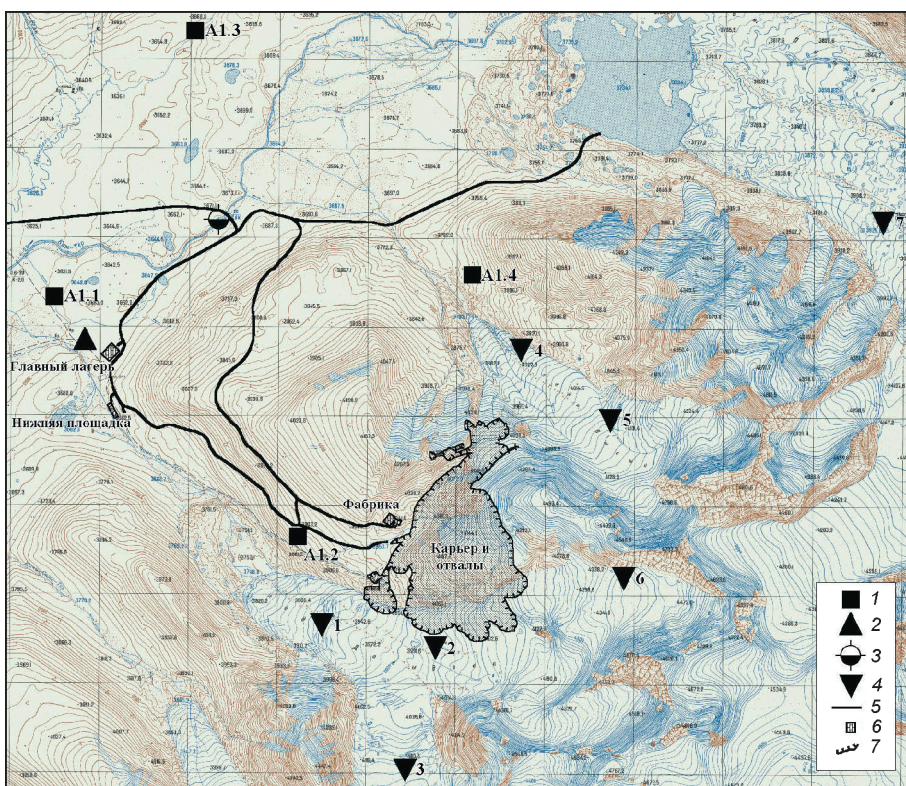
Рис. 2. Технологический взрыв в карьере (фото от 18 марта 1998 г. с расстояния 750 м)

Fig. 2. Technological explosion in the quarry (photo March 18, 1998, from a distance of 750 m)



**Рис. 3.** Пыль от работы тяжёлой горной техники в карьере и на отвалах горной породы (фото от 29 июля 2004 г. с противоположного борта долины ледника Давыдова)

**Fig. 3.** Dust caused by the operation of heavy mining equipment in the quarry and gob piles (photo 29 July, 2004, taken from the opposite side of the Davydov Glacier valley)



**Рис. 4.** Местоположение некоторых пунктов измерений и основных объектов КОК на фрагменте топографической карты масштаба 1:25 000, соответствующей состоянию местности на лето 1977 г.:

1 – стационарный объёмный пробоотборник воздуха; 2 – метеостанция Тянь-Шань–Кумтор; 3 – гидрологический пост; 4 – точки отбора проб сезонного снежного покрова на ледниках в мае 1998 г.; 5 – основные автомобильные дороги; 6 – основные сооружения КОК; 7 – контур карьера и отвалов горной породы по состоянию на начало 1998 г.

**Fig. 4.** Location of some measurement points and basic facilities of KOC on a fragment of a topographic map of 1:25 000 scale, corresponding to the condition of the area as in summer 1977: 1 – fixed volumetric air sampler; 2 – meteorological station of Tien Shan–Kumtor; 3 – hydrologic post; 4 – sample selection points of seasonal snow on glaciers in May 1998; 5 – basic roads; 6 – main structures of KOC; 7 – contour lines of the quarry and piles of rock at the beginning of 1998

массой взрывчатого вещества 14 т. Серия фотоснимков, сделанных автором 18 марта 1998 г., показывает, что максимальная высота верхней границы облака взрыва достигает 120 м. Если бы взрыв был наземным, то теоретически высота верхней кромки пылевого облака превысила бы 570 м [4, 8]. Кроме того, жёлтый цвет взрывного облака говорит, что это – продукты самого взрыва, а не пыль горных пород, которые имеют здесь в основном чёрную окраску.

На рис. 3 видно, что даже в разгар летнего сезона выделение пыли при эксплуатации тяжёлой горной техники относительно невелико. Отметим также, что

КОК для пылеподавления периодически поливает грунтовые автомобильные дороги в относительно тёплое время года. Кроме того, экологический отдел в структуре компании анализирует и отслеживает экологическую ситуацию в районе месторождения. Часто проводят проверки государственные и общественные экологические организации.

Проанализируем содержание пыли в атмосферном воздухе и на поверхности ледников в районе месторождения Кумтор. На рис. 4 приведено расположение некоторых пунктов измерений и основных объектов КОК.

### Исходные данные

В работе использованы самые разные материалы. В районе месторождения, примерно 8 км от него, с 1929 г. функционировала метеостанция Тянь-Шань (высота 3634 м) гидрометеорологической службы Киргизии с достаточно полной программой наблюдений (см., например, [9]). С 19 августа 1996 г. вместо станции Тянь-Шань начала функционировать автоматическая метеостанция Кумтор (в настоящее время называется Тянь-Шань—Кумтор), расположенная в 2,25 км по азимуту 120° от старой на высоте 3660 м. Перенос метеостанции, смена измерительного оборудования, а также применение других методов измерений и математической обработки неизбежно повлекли небольшой разрыв многолетнего ряда метеонаблюдений, но будем надеяться, что приведение нового ряда к старому гидрометеослужбой Киргизии выполняется достаточно обоснованно. Мы анализировали как старый, так и новый ряд метеоизмерений, по возможности раздельно; в одном случае использовались результаты измерений на близлежащих метеостанциях — Акшыйрак и Каракольская (средние число дней с пыльной бурей).

Гидрологические измерения на ручье Кумтор (исток р. Нарын), рядом с метеостанцией Тянь-Шань, ранее велись только в 1943—1947 гг. в летнее время. С 2000 г. и по настоящее время работы по измерению расхода воды в этом ручье с помощью специально сооружённого бетонного лотка выполняет экологический отдел КОК. Измеряется и уровень воды в озере, прилегающем к леднику Петрова, из которого отбирается вода на промышленно-бытовые нужды.

Содержание пыли в атмосферном воздухе измеряется КОК с 1997 г. на четырёх стационарных пробоотборниках воздуха большого объёма. Измерения ведутся один раз в шесть дней путём непрерывного прокачивания воздуха через фильтры в течение суток одновременно на всех четырёх пунктах. Масса осевших на фильтре твёрдых частиц пересчитывается в микрограммы на кубический метр воздуха (мкг/м<sup>3</sup>). Кроме того, с конца 1997 г. по настоящее время сотрудники экологического отдела КОК берут пробы снега на химический анализ.

Для измерения содержания пыли в сезонном слое снежного покрова на близлежащих к месторождению ледниках 5—9 мая 1998 г. автором были отобраны специальные пробы.

### Анализ содержания пыли в приземном слое атмосферы

**Результаты измерений.** Анализировались все имеющиеся результаты измерений с помощью объёмных пробоотборников воздуха с 1997 по 2008 г., т.е. за полные 12 лет. Всего выполнено 2841 измерения. Некоторые обобщённые результаты этих изме-

рений даны в табл. 1. Обратим внимание, что в летние месяцы (июнь—август) с положительной среднемесячной температурой воздуха содержание пыли в воздухе примерно в два раза ниже, чем в остальное время. Этот факт, на первый взгляд довольно неожиданный (количество пыли в воздухе увеличивается, когда поверхность весьма обширной окрестности покрыта снегом), может свидетельствовать, что основное количество пыли в район поступает со значительно удалённых и бесснежных зимой территорий. Результаты измерений на пунктах достаточно коррелированы попарно между собой (табл. 2).

Результаты 18 измерений (0,6%) превысили ПДК (500 мкг/м<sup>3</sup>). Зафиксированные случаи превышения ПДК приведены в табл. 3. Максимальное содержание пыли составило 810 мкг/м<sup>3</sup> (превышение ПДК на 62%). Три случая превышения ПДК зафиксировано на пункте А1.1, тринадцать — на А1.2, два — на А1.3. На пункте А1.4 случаев превышения ПДК не было. Все случаи превышения ПДК характерны для холодного времени года. Отметим, что содержание твёрдых частиц в воздухе г. Бишкек в 60—100% случаев превышает ПДК в 3—8 раз [10]. Других сопоставлений общего характера выполнить невозможно, так как мониторинг качества атмосферного воздуха ведётся только в пяти городах Киргизии: Бишкек, Ош, Карабалта, Чолпон-Ата и Токмок [2].

На следующем этапе предварительной статистической обработки результатов измерений вычислялись различные среднеарифметические значения содержания взвешенных частиц в атмосферном воздухе и среднеквадратические отклонения от средних. При этом подробно проанализированы различные комбинации расхождений этих средних значений. Использовалась методика статистической проверки гипотезы о равенстве центров распределения нормальных совокупностей [12], в которой рассматриваются нормированные разности этих центров:

$$Z = \frac{|m_1 - m_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}},$$

где  $m_i$  — среднеарифметическое значение (математическое ожидание) в выборке  $i$ ;  $\sigma_i$  — среднеквадратическое отклонение от среднего;  $n_i$  — число измерений.

Гипотеза о равенстве центров распределения двух выборок отвергается, если  $Z > Z_p$  при заданной вероятности  $p$ . Значения  $Z_p$  вычисляются с использованием известной в теории вероятностей функции Лапласа. С помощью подобной проверки статистических гипотез можно лишь отвергнуть проверяемую гипотезу, но нельзя доказать её справедливость. Однако именно это

Таблица 1. Среднее содержание пыли (мкг/м<sup>3</sup>) в атмосферном воздухе на пунктах измерений по годам и месяцам

Год	Пункт				Среднее
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	
<i>По годам</i>					
1997	116,6	161,1	114,6	48,7	118,0
1998	86,9	113,3	48,0	43,0	72,7
1999	68,0	113,7	37,6	40,9	64,5
2000	60,8	83,4	36,9	39,7	55,7
2001	55,4	77,4	35,1	35,0	51,0
2002	67,3	87,0	48,6	42,2	61,4
2003	81,0	100,3	38,7	40,8	65,3
2004	80,1	116,6	45,2	47,3	72,5
2005	99,2	152,3	39,5	45,3	84,5
2006	98,8	91,0	50,9	46,1	71,8
2007	44,9	66,8	46,8	53,6	53,0
2008	97,0	41,2	39,5	34,6	53,1
<i>Среднее</i>	80,2	100,5	48,8	42,9	68,5
<i>По месяцам</i>					
I	67,2	125,8	42,9	49,8	72,2
II	112,6	132,5	50,8	67,4	91,6
III	117,8	107,7	57,6	58,5	86,0
IV	86,4	99,6	70,3	54,5	78,5
V	63,9	76,5	62,0	53,2	64,2
VI	39,6	56,9	22,8	25,1	36,3
VII	50,3	78,8	35,6	24,2	47,4
VIII	48,6	65,1	33,9	28,5	44,0
IX	93,5	91,5	56,8	39,8	70,3
X	91,2	100,1	58,0	34,7	71,0
XI	111,1	138,3	51,2	45,3	86,5
XII	78,9	133,6	42,1	40,7	74,1

Таблица 2. Парные коэффициенты корреляции (*r*) результатов измерений пыли на пунктах

	<i>N*</i>			<i>r</i>		
	A1.2	A1.3	A1.4	A1.2	A1.3	A1.4
A1.1	705	694	673	0,493	0,502	0,559
A1.2		703	683		0,393	0,409
A1.3			673			0,741

\**N* – число совместных измерений.

и важно в нашем случае – доказать, что различия анализируемых средних величин количества пыли в атмосферном воздухе статистически значимы и не могут быть объяснены ошибками измерений или какими-либо иными случайными погрешностями. Некоторые выводы из этого анализа таковы: 1) среднее количество пыли в воздухе, зафиксированное в 1997 г., значительно отличается от этого показателя для остальных периодов измерений; 2) среднее количество пыли в летние месяцы значительно отличается от среднего количества пыли в остальные месяцы года; 3) средние значения количества пыли значительно отличаются для пар пунктов A1.1–A1.4, A1.2–A1.3

Таблица 3. Зафиксированные в 1997–2008 гг. превышения ПДК пыли в атмосферном воздухе по результатам измерений КОК

№ п/п	Пункт	Дата измерений	Содержание пыли, мкг/м <sup>3</sup>
1	A1.1	28.02.1997	626
2	A1.2	30.03.1997	606
3	A1.3	11.04.1997	766
4	A1.2	29.04.1997	525
5		20.10.1997	542
6		7.12.1997	742
7		13.12.1997	581
8		25.12.1997	541
9		31.12.1997	573
10		15.10.1998	531
11		2.11.1998	569
12		18.02.1999	622
13		15.11.1999	799
14	A1.1	4.04.2003	502
15	A1.3	4.05.2005	516
16	A1.2	1.10.2005	522
17		30.11.2005	810
18	A1.1	4.12.2005	581

и A1.2–A1.4. Отметим, что в 1997 г. зафиксирована рекордно малая годовая сумма атмосферных осадков за весь период наблюдений (96 мм).

**Анализ закономерностей.** Для анализа возможных зависимостей количества пыли в атмосферном воздухе, измеренного на протяжении 12 лет в четырёх пунктах измерений в районе месторождения Кумтор, были апробированы многочисленные метеорологические параметры и их среднесезонные значения, приведённые в [9]. Достаточно хорошее объяснение межгодовой изменчивости среднего количества пыли в воздухе можно сделать путём сопоставления её с годовой суммой атмосферных осадков, полученной на метеостанции Тянь-Шань–Кумтор.

Чтобы установить внутригодовую изменчивость содержания пыли в воздухе (среднемесячных значений количества пыли) на начальном этапе исследований, было рассмотрено достаточно большое число разных метеопараметров. Анализ полученных аппроксимирующих уравнений указывает на наличие не противоречащих здравому смыслу закономерностей: уменьшение количества пыли с увеличением парциального давления водяного пара и суммы атмосферных осадков; увеличение количества пыли с ростом среднего числа дней с пыльной бурей и повторяемости ветра северных, северо-восточных, юго-западных и западных направлений. Увеличение количества пыли, выпадающей на земную поверхность в дни с пыльной бурей, подтверждается и результатами других измерений. Так, в работе [3] отмечается, что в дни с пыльной бурей (мглой) в долине р. Чонкызылсу выпадало в 2,6 раза больше пыли, чем в ясные дни.

Таблица 4. Оценка вклада различных факторов (%) в общее среднее содержание пыли, зафиксированное на различных пунктах измерений в разные годы\*

Год	Пункт															
	А1.1				А1.2				А1.3				А1.4			
	М	У	Б	В	М	У	Б	В	М	У	Б	В	М	У	Б	В
1997	33,1	29,6	12,2	25,1	38,3	27,4	11,2	23,2	23,2	34,0	14,0	28,8	22,0	36,8	9,0	32,2
1998	42,0	10,8	15,4	31,8	47,5	9,8	13,9	28,8	30,6	12,9	18,4	38,0	27,9	13,4	19,1	39,5
1999	42,5	9,8	15,6	32,2	48,0	8,8	14,1	29,1	31,0	11,7	18,7	38,6	28,3	12,2	19,4	40,1
2000	43,6	7,3	16,0	33,0	49,2	6,6	14,4	29,8	32,1	8,8	19,3	39,8	29,3	9,2	20,1	41,5
2001	42,4	10,0	15,5	32,1	47,9	9,1	14,0	29,0	30,9	12,0	18,6	38,4	28,2	12,5	19,4	39,9
2002	41,9	11,0	15,4	31,7	47,4	10,0	13,9	28,7	30,5	13,2	18,4	37,9	27,8	13,7	19,1	39,4
2003	41,6	11,7	15,2	31,5	47,1	10,6	13,8	28,5	30,2	14,0	18,2	37,6	27,5	14,6	18,9	39,0
2004	41,8	11,2	15,3	31,7	47,3	10,1	13,9	28,6	30,5	13,4	18,3	37,8	27,8	13,9	19,0	39,3
2005	42,0	10,8	15,4	31,8	47,5	9,8	13,9	28,8	30,6	12,9	18,4	38,0	27,9	13,4	19,1	39,5
2006	41,5	11,8	15,2	31,5	47,1	10,7	13,8	28,5	30,2	14,1	18,2	37,5	27,5	14,6	18,9	39,0
2007	42,4	9,9	15,6	32,1	48,0	9,0	14,1	29,0	31,0	11,9	18,6	38,5	28,3	12,4	19,4	40,0
2008	42,5	9,8	15,6	32,1	48,0	8,9	14,1	29,0	31,0	11,8	18,7	38,5	28,3	12,2	19,4	40,1
Среднее	41,4	12,0	15,2	31,4	46,9	10,9	13,8	28,4	30,2	14,2	18,1	37,5	27,6	14,9	18,4	39,1

\*Факторы: М – местоположение; У – увлажнение; Б – пыльные бури; В – ветер.

Для возможного учёта при дальнейшем моделировании по топографической карте были определены: удаления пунктов измерений количества пыли в воздухе от центра карьера месторождения, от ближайших точек основных дорог; высоты пунктов; азимуты из центра карьера на пункты и некоторые другие параметры. Чётких закономерностей количества пыли от этих параметров установлено не было, поэтому при дальнейшей математической обработке мы использовали некую условную характеристику местоположения пунктов измерений – ранг, который для каждого из пунктов принимался равным среднему количеству пыли в воздухе, зафиксированному за время измерений (1997–2000 гг.), делённому на минимальное значение (пункт А1.4). Таким образом, ранг местоположения пункта измерений А1.1 оказался равным 1,97; пункта А1.2 – 2,78; пункта А1.3 – 1,41; пункта А1.4 – 1,00. Видимо, можно говорить, что ранг местоположения пунктов измерений характеризует как степень влияния разработки месторождения, так и иные факторы, не выявленные из результатов измерений и не учитываемые далее отдельно.

Дальнейшая математическая обработка предусматривала поиск наилучшей статистической зависимости зафиксированных среднемесячных значений количества пыли в воздухе на различных пунктах в разные годы от описанных ранее параметров. Апробирование состояло в вычислениях методом наименьших квадратов многочисленных аппроксимирующих уравнений с различными комбинациями аргументов (параметров). Наилучшим по ряду критериев (среднеквадратическая погрешность аппроксимации исходной выборки, максимальное по абсолютной величине остаточное отклонение) было признано уравнение

$$W_{a,m,s} = -89,37 + 37,76R_s + 5742,7/P_a + 69,9N_m + 1,45L_m \quad (1)$$

где  $W_{a,m,s}$  – среднее количество пыли в воздухе, зафиксированное на пункте  $s$  в месяце  $m$  года  $a$ , мкг/м<sup>3</sup>;  $R_s$  – ранг местоположения пункта измерений  $s$ ;  $P_a$  – сумма атмосферных осадков года  $a$ , мм;  $N_m$  – среднее число дней с пыльной бурей месяца  $m$ ;  $L_m$  – средняя суммарная повторяемость ветра юго-западного и западного направлений в месяце  $m$ , %.

Уравнение (1) позволяет статистически оценить вклад различных факторов в зафиксированное общее количество пыли в атмосферном воздухе. Второе слагаемое в правой части уравнения (1) учитывает фактор местоположения пункта измерений и служит верхним пределом для оценки его влияния на запылённость воздуха. Третье слагаемое характеризует степень влияния количества годовых атмосферных осадков на среднее содержание пыли в воздухе (фактор увлажнения); четвёртое и пятое слагаемые – соответственно факторы пыльных бурь и ветра. Рассчитанные по уравнению (1) статистические оценки возможного вклада всех четырёх факторов в измеренное количество пыли в воздухе приведены в табл. 4.

**Анализ изменений запылённости во времени.** Чтобы оценить возможные изменения характеристик запыления атмосферного воздуха во времени, выполним методом наименьших квадратов аппроксимацию временных рядов ( $n$  измерений) линейной и квадратичной функциями:

$$X = a_0 + a_1 Y; \quad (2)$$

$$X = b_0 + b_1 Y + b_2 Y^2 \quad (3)$$

где  $X$  – характеристика запыления;  $Y$  – год;  $a$  и  $b$  – неизвестные коэффициенты.

Для оценки значимости выполненных аппроксимаций можно сравнить дисперсии [12] среднеарифметических значений  $\sigma_1^2$  и погрешностей аппроксимаций  $\sigma_2^2$ . Если мы имеем две независимые дисперсии  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$ , то их соотношение  $\sigma_1^2/\sigma_2^2 = F$  можно использовать при проверке гипотезы о равенстве дисперсий. Если полученное значение соотношения  $F$  равно или больше критического значения  $F_2$ , то статистическая гипотеза о равенстве двух дисперсий отвергается и аппроксимацию можно признать значимой по сравнению с естественным случайным разбросом измерений и наоборот. Таким же образом можно сопоставлять две разные аппроксимации.

Для определения критической области в математической статистике используется  $F$ -распределение (Фишера—Снедекора), которое зависит только от числа степеней свободы  $k_1$  и  $k_2$  и плотность вероятности которого выражается уравнением [7]

$$P_F(f) = \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{k_1/2} \frac{\Gamma\left(\frac{k_1+k_2}{2}\right)}{\Gamma(k_1/2)\Gamma(k_2/2)} f^{(k_1-2)/2} \left(1 + \frac{k_1}{k_2} f\right)^{-(k_1+k_2)/2}, \quad (4)$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция.

За критическую область принимают два интервала: «больших» значений –  $F > F_2$  и «малых» значений –  $0 < F < F_1$  при уровне значимости  $q/100$ . Поскольку при вычислении соотношения  $F$  в числитель подставляется бóльшая дисперсия, то интерес представляет собой только интервал «больших» значений, а задаваемую значимость нужно делить на два. Таким образом, если задавать 10%-й уровень значимости, то критическое значение  $F_2$  можно найти из уравнения

$$\int_0^{F_2} P(F) dF = 0,95.$$

Число степеней свободы  $k_i$  в нашем случае определялось по следующему правилу:  $k_1$  равно  $n-1$ ,  $k_2$  равно  $n$  минус количество неизвестных коэффициентов в аппроксимирующем уравнении.

Последовательно для разных характеристик выполнялись аппроксимации (2) и (3) методом наименьших квадратов и далее вычисляли  $F$  и  $F_2$  по (4). Аппроксимацию можно было признать значимой, если  $F > F_2$ . Вычислительные процедуры были реализованы: на всей совокупности исходных измерений количества пыли в атмосферном воздухе; на среднемесячных значениях; на среднегодовых значениях; на значениях вклада фактора М (местоположение пункта измерений) в общее среднегодовое количество пыли. В вычислениях в качестве аргумента (времени) использовались условные «кумторовские» дни, первым днём которых мы приняли 1 января 1995 г.

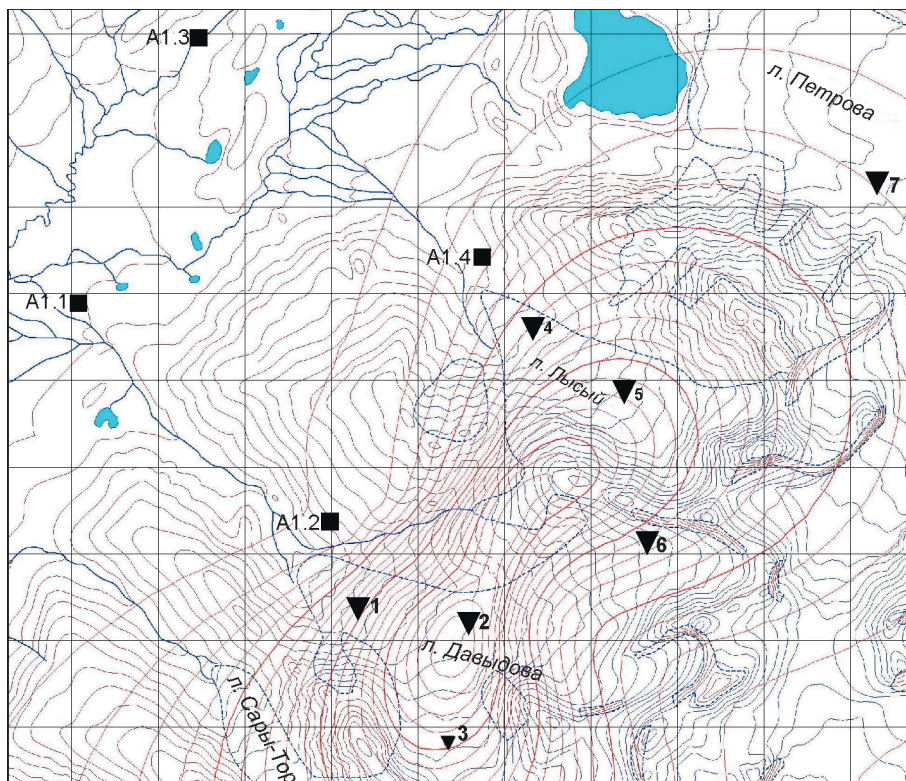
При критическом значении  $F_2 = 1,12$  значимых аппроксимаций суточных результатов нет ни на пунктах измерений, ни на средних по всем пунктам значениях. Отметим, что большинство полученных коэффициентов линейной регрессии  $a_1$  отрицательны, что, с некоторой натяжкой, можно трактовать как тенденцию к уменьшению количества пыли в атмосферном воздухе во времени с примерной скоростью  $0,01$  мкг/м<sup>3</sup> в сутки.

По результатам аппроксимации среднемесячных значений количества пыли в атмосферном воздухе для всей совокупности пунктов измерений КОК критические значения соотношения дисперсий  $F_2$  составляют 1,63 и 1,64 (соответственно для линейной и квадратичной аппроксимации). Значимыми можно признать только линейную и квадратичную зависимости изменений среднего мартовского количества пыли от времени измерений, а также квадратичную зависимость для октября с отрицательными значениями  $a_1$  и  $b_1$ . Близки к значимым аппроксимации для апреля, июня и сентября. Так, для апреля близкой к значимой можно было бы признать линейную аппроксимацию со значением скорости изменения количества пыли  $-8,8$  мкг/м<sup>3</sup> в год.

Полученные результаты указывают также на отсутствие статистически значимых зависимостей смоделированных нами вкладов фактора местоположения пунктов измерений КОК в зафиксированные на них среднегодовые количества пыли в атмосферном воздухе от времени как для каждого пункта измерений, так и для средних для них совокупностей. Укажем лишь, что преобладают отрицательные коэффициенты линейной регрессии  $a_1$  со средним значением  $-0,5$  мкг/м<sup>3</sup> в год. Это также, с некоторой степенью условности, можно трактовать как тенденцию к уменьшению вклада фактора М в среднегодовое количество пыли в атмосферном воздухе во времени. Отметим также, что бóльшая часть коэффициентов  $a_1$  и  $b_1$  во всех аппроксимируемых уравнениях имеет отрицательные значения (уменьшение запылённости во времени).

### Исследование запылённости ледников

**Моделирование запыления территории.** При проектировании мест отбора проб снежного покрова на ледниках численно смоделировано поле возможного запыления территории в результате горных работ на карьере и отвалах (пыление с площади) месторождения. Предполагалось, что каждая точка карьера и отвала выделяет равное количество пыли в единицу времени и эта пыль при штиле выпадает на месте, а при ветре разносится по территории в направлении ветра на расстояния, пропорциональные скорости и повторяемости в данное время. Количество выделенной пыли и коэффициент пропорциональности задавались условно.



**Рис. 5.** Теоретическое поле разности пыли, образующейся при горных работах на карьере и отвалах КОК, по прилегающей территории.

Изолинии проведены через 0,05 в усл. долях ед.; утолщены изолинии 0,25, 0,5 и 0,75; обозначения пунктов измерений аналогичны рис. 4

**Fig. 5.** Theoretical field of dust spacing over the surrounding area, generated due to mining operations of КОК. Isolines are drawn in conventional units' fractions (in 0.05); isolines 0.25, 0.5 and 0.75 are thickened; identifications of measurement sites are analogous to identifications on Fig. 4

Математическая модель ветра реализована на основе средних многолетних результатов измерений на метеостанции Тянь-Шань. Конечно, в высокогорной местности ветровой режим более сложен [11], однако данные для учёта местной (горно-долинная, ледниковая) циркуляции воздуха в районе отсутствуют. Для исходных характеристик ветрового режима методом наименьших квадратов найдены наилучшие аппроксимации. При этом условные уравнения метода наименьших квадратов предварительно интегрировались, так как исходные данные (румб, месяц, градация скорости) характеризуют не конкретные значения аргументов, а некий интервал. Для частот ветра по направлениям лучшим оказался полином Фурье третьего порядка, по времени – 4-й степени, а по скорости – кусочно-линейные функции.

Интегрирование по времени (с начала сентября по конец апреля – далее везде «холодный период») и по территории с использованием полученных аппроксимирующих функций выполнялось с шагом 1 день и 50 м соответственно. Полученное теоретическое поле запыления территории в неких условных единицах (от 0 до 1) приведено на рис. 5. Конечно, оно весьма приближённо и условно, но позволяет при отборе проб снега не пропустить зоны предполагаемого максимума запыления.

**Измерения.** Пробы снега холодного периода на ледниках отбирались с 5 по 9 мая 1998 г. На относительно ровных запроектированных местах, с предпо-

ложительно нулевым балансом метелевого переноса снега, проходили наклонный шурф длиной 3–4 м. Далее из его стенки, расположенной вверх по склону, с помощью прозрачного пробоотборного цилиндра (внутренний диаметр 120 мм) отбирали по три пробы на расстоянии примерно 1 м друг от друга и измеряли толщину сезонного слоя снега. Отобранные пробы упаковывали в разные полиэтиленовые пакеты, доставляли в лабораторию при обогатительной фабрике КОК и в тот же день растапливали, определяя объём воды. Талая вода фильтровалась в вакуумной установке через предварительно акклиматизированные и взвешенные фильтры (фильтр № 2, 150 мм, фирмы «Whatman Inc.»). Фильтры с осадком в течение суток акклиматизировались в термокамере «Bod Incubator» фирмы «НАСН». Взвешивание фильтров без пыли и с ней выполнялось на электронных весах SNR фирмы «Mettler Toledo» с точностью до 0,0001 г. Разность двух масс интерпретировалась как масса пыли. Сведения о точках отбора проб и результаты измерений представлены в табл. 5.

Наличие трёх проб из одной точки позволяло, с одной стороны, сгладить случайные вариации измеряемой величины, а с другой – оценить точность полученных результатов. В связи с малым числом проб в точке и небольшим числом точек классические способы оценки точности использовать нельзя. Поэтому была реализована методика оценки среднеквадратической погрешности одного измерения по со-

Таблица 5. Результаты измерений содержания пыли в сезонном снежном покрове

Точка измерений	Ледник	Дата измерений	Высота точки $H$ , м	Средняя толщина снега $z_m$ , см	Средняя плотность снега $\rho_m$ , г/см <sup>3</sup>	Содержание пыли, г/км <sup>2</sup> , в пробах			
						1	2	3	среднее
1	Давыдова	5.V.1998	3892	20	0,304	1,23	1,48	1,63	1,44
2		6.V.1998	4025	17	0,313	2,32	2,66	4,34	3,11
3			4150	46	0,283	4,32	4,39	4,70	4,47
4	Лысый	7.V.1998	3920	16	0,330	2,47	2,27	2,74	2,49
5			4090	22	0,307	3,37	3,11	2,96	3,15
6	Давыдова	8.V.1998	4370	41	0,304	7,43	7,65	8,17	7,75
7	Петрова	9.V.1998	3950	23	0,354	8,71	5,02	6,15	6,63

вокупности размахов измерений в малых выборках по формуле [12]

$$\sigma \approx \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m\alpha_n},$$

где  $R_i$  – размах выборки  $i$ ;  $m$  – число малых выборок;  $\alpha$  – математическое ожидание  $R/\sigma$  (выбирается из таблицы в [12] по значению  $n$ );  $n$  – число измерений в выборке.

Среднеквадратическая погрешность одного измерения, вычисленная таким образом, составила 0,68 г/м<sup>2</sup>, а среднеквадратическая погрешность среднего из трёх измерений может быть оценена, равной 0,39 г/м<sup>2</sup>.

**Анализ результатов.** Таким образом, среднее содержание пыли, осевшей в слое снега за холодный период его накопления, в точках 1–5 изменяется от 1,44 до 4,47 г/м<sup>2</sup>. Аналогичные значения (от 1,05 до 4,43 г/м<sup>2</sup>) получены и по результатам измерений на семи ледниках Иссык-Кульской котловины за холодный период 1969/70 г., расположенных недалеко от месторождения [5]. В точках 6 и 7 содержание пыли оказалось большим. Если для точки 6 можно предположить влияние разработки месторождения Кумтор, то для весьма удалённой точки 7 такое предположение не вполне состоятельно. В точке 7 зафиксирована аномально большая плотность снега (см. табл. 5), что позволяет предположить неудачный выбор места расположения точки отбора. Для этой точки характерно усиление метелевого переноса снега, которое и приводит к ветровому его уплотнению, что, в свою очередь, может вызывать снос в точку пыли, первоначально отложенной в другом месте. Для точки 6, кроме наибольшей высоты расположения (см. табл. 5), характерно её близкое положение к крутым выходам скал и осыпей, подверженных морозному выветриванию. В работе [3] отмечается, что вблизи бортов ледников, недалеко от скального обрамления, пыли может выпадать примерно на 30% больше, чем в середине ледника из-за перевевания её со склонов. Этот факт позволяет предположить, что при удалении точки 6 от склона

можно было бы зафиксировать меньшее содержание пыли (примерно 6 г/м<sup>2</sup>). Других данных для сопоставления в районе исследований нет, тем более, что в последние годы внимание стало уделяться не содержанию, а химическому составу пыли [6, 13].

Таким образом, измеренное автором в 1998 г. содержание пыли в слое снега холодного периода в семи точках на трёх ледниках вблизи месторождения Кумтор почти не превышает (во всяком случае, статистически достоверно) содержание пыли, установленное в 1969/70 г. на семи ледниках близ расположенной Иссык-Кульской котловины [5]. Тем более, что Иссык-Кульская котловина по сравнению с хр. Акшыйрак – более увлажнённый и, следовательно, менее запылённый район. Так, среднемноголетнее значение годовой суммы атмосферных осадков для метеостанции Ледник Кара-Баткак (высота 3300 м) составляет 819 мм, а для метеостанции Тянь-Шань (высота 3634 м) – 323 мм.

Явных (статистически достоверных) зависимостей измеренного содержания пыли, осевшей на ледниках, от каких-либо параметров (высота, удаление от карьера и отвалов, теоретическая вероятность запыления) обнаружено не было. Искомую зависимость можно проследить лишь для теоретической вероятности запыления при исключении из рассмотрения пункта А1.4, а также точек 6 и 7.

Безусловно, между содержанием пыли в атмосферном воздухе и содержанием пыли, отложенной на ледниках, должна существовать некоторая зависимость, однако у нас есть результаты лишь одного измерения обеих величин за совпадающий промежуток времени – холодный период 1997/98 г. За этот период снегонакопления среднее содержание пыли в атмосферном воздухе по измерениям на четырёх пунктах КОК составляло 109,1 мкг/м<sup>3</sup>, а содержание пыли, отложенной на ледниках, – 4,15 г/м<sup>2</sup>. Поэтому можно предположить, что

$$W_G \approx 0,038W_A, \tag{5}$$

где  $W_G$  – среднее количество пыли, отложенной на поверхность ледников, г/м<sup>2</sup>;  $W_A$  – среднее содержание пыли в атмосферном воздухе, мкг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент 0,038 в уравнении (5) отражает некую статистическую зависимость между объёмом воздуха, который проходит над ледниковой поверхностью за определённый промежуток времени, и количеством отложенной на неё пыли. Уравнение (5) позволяет приближённо оценить среднее содержание пыли в толще снежного покрова холодного периода на ледниках по результатам измерений содержания пыли в атмосферном воздухе.

Как это уже отмечалось ранее для календарного года, содержание пыли в атмосферном воздухе за некоторый промежуток времени должно зависеть от суммы выпавших атмосферных осадков. Выполненный анализ подтверждает наличие искомой статистической зависимости для холодного периода года. Эта зависимость хорошо ( $\sigma$  аппроксимации  $14,5 \text{ мкг/м}^3$ ) описывается следующим уравнением, полученным методом наименьших квадратов:

$$W_w = 157,7e^{0,006326P_w}, \quad (6)$$

где  $W_w$  – среднее содержание пыли в атмосферном воздухе за холодный период,  $\text{мкг/м}^3$ ;  $e$  – основание натуральных логарифмов;  $P_w$  – сумма атмосферных осадков холодного периода, мм.

Зависимость (6) показывает, что при нулевой сумме зимних атмосферных осадков среднее содержание пыли холодного периода в атмосферном воздухе теоретически составит  $157,7 \text{ мкг/м}^3$ , а при её увеличении будет стремиться к нулю. Далее рассчитывалось теоретическое среднее содержание пыли в слое снега холодного периода на поверхности ледников в районе месторождения Кумтор за годы измерений содержания пыли на пунктах КОК. Вычисления выполнены для двух вариантов: I – непосредственно по результатам измерений на пунктах КОК (5); II – по зафиксированной на метеостанции Тянь-Шань-Кумтор сумме атмосферных осадков холодного периода с использованием уравнения (6). Приведём эти данные.

Год	I/II	Год	I/II
1996/97	5,74/5,15	2002/03	3,06/2,31
1997/98	4,15/3,44	2003/04	2,30/2,14
1998/99	3,34/3,75	2004/05	2,92/3,38
1999/2000	3,16/3,33	2005/06	3,37/3,16
2000/01	2,05/2,61	2006/07	2,87/3,93
2001/02	3,25/2,95		

Расчёты показали, что средние теоретические значения содержания пыли за представленные годы (зимы), возможно, лишь иногда превышали значения, приведённые в работе [5] для холодного периода 1969/70 г. на ледниках Иссyk-Кульской котловины. Это подтверждают и данные метеостанции Каракол, согласно которым за холодный период 1969/70 г. в Иссyk-Кульской котловине выпало больше осадков ( $204,4 \text{ мм}$ ), чем в среднем за холодные периоды

111 лет ( $162,1 \text{ мм}$ ). Иными словами, в работе [5], по видимому, зафиксировано более низкое содержание пыли, чем возможное среднемноголетнее. Аналогичное с зимними атмосферными осадками 1969/70 г. наблюдалось ещё на шести метеостанциях Иссyk-Кульской котловины: Балыкчы, Красный Октябрь, Чон-Кызыл-Суу, Покровка, Чолпон-Ата и Чон-Ашу.

Все это не опровергает сделанный вывод о незначительном вкладе производственно-хозяйственной деятельности на месторождении Кумтор на запыление поверхности близлежащих ледников.

### Выводы

1. Запылённость поверхности ледников в районе месторождения Кумтор по результатам измерений содержания пыли в слое снега, сформировавшегося с сентября по апрель 1997/98 г., примерно соответствует естественной для данного района. Чёткой статистической зависимости между установленным содержанием пыли и удалением точки измерений от карьера месторождения найдено не было. С некоторыми допущениями просматривается статистическая зависимость зафиксированного содержания пыли на поверхности ледников от теоретически смоделированных величин площадного источника пыления (карьер месторождения и отвалы горной породы). Техногенный источник пыли, видимо, менее значим по сравнению с естественными.

2. Общее (естественные и техногенное) запыление не вызывает существенного усиления таяния сезонного снежного покрова на ледниках и самих ледников в силу своей незначительности. Тем более, что пыль, отложенная на сезонный снежный покров ледников, рассредоточена в её толще, а не сконцентрирована только на поверхности, поэтому эффект существенного уменьшения альбедо на какой-то конкретный момент времени (например, на начало снеготаяния) отсутствует. Если даже пыль, отложенная в сезонном снежном покрове после завершения его таяния, полностью осядет на поверхность льда в месте её образования, то это не приведёт к осяданию увеличению многолетней естественной засорённости её эоловым мелкозёмом. Поэтому летнее таяние льда также практически не усилится.

3. За период с 1997 по 2008 г. среднее содержание пыли в сезонном слое снега на ледниках в районе месторождения Кумтор в зависимости от метеоусловий изменялось от 2 до  $6 \text{ г/м}^2$ , что не экстраординарно для Тянь-Шаня.

4. Содержание пыли, зафиксированное на четырёх объёмных пробоотборниках воздуха (пунктах) КОК на протяжении 12 лет (2841 суточных измерений) в атмосферном воздухе, лишь 18 раз (0,6%) превысило ПДК, но не более чем на 62%. Правда, наи-

большее число случаев превышения ПДК установлено на пункте, наиболее близком к карьеру и отвалам месторождения Кумтор. Однако в летние месяцы превышений ПДК не было. Это подтверждает наш вывод о том, что большая часть пыли в атмосферном воздухе вблизи месторождения привносится издалека, с бесснежных в зимнее время районов Центральной Азии, а не образуется непосредственно в районе разрабатываемого месторождения, т.е. техногенное загрязнение воздуха здесь меньше естественного.

5. Оценка вклада местных факторов (пыль, образующаяся на месте) в общую запылённость атмосферного воздуха по среднегодовым значениям довольно стабильна и составляет от 20 до 50% для разных пунктов (среднегодовое – 25–42%). Такая оценка представляет собой верхний предел (максимум) предположительного вклада производственно-хозяйственной деятельности на месторождении Кумтор. Реальный техногенный вклад составляет не более 20% общего содержания пыли.

6. При анализе возможных изменений во времени (12 лет) содержания пыли в атмосферном воздухе статистически значимых трендов не выявлено. Можно лишь утверждать, что статистически значимый отрицательный тренд среднего по четырём пунктам содержания пыли характерен только для средних месячных значений марта и октября. Заметим, что большинство вычисленных значений трендов отрицательны. Таким образом, можно утверждать, что содержание пыли в атмосферном воздухе в районе месторождения Кумтор за 1997–2008 гг. не увеличивается.

7. Результаты анализа изменений во времени вклада фактора местоположения пункта измерений в среднегодовые значения содержания пыли на пунктах измерений КОК также позволяют утверждать, что статистически значимого тренда за 12 лет измерений (1997–2008 гг.) не обнаружено. Большинство вычисленных значений тренда также отрицательны.

**Благодарности.** Автор признателен сотрудникам экологического отдела и аналитической лаборатории «Кумтор Оперейтинг Компани» за доброжелательную помощь при сборе исходных данных, отборе проб снега с ледников и лабораторных исследованиях.

Работы выполнены по заказу «Кумтор Оперейтинг Компани».

### Литература

1. 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.

2. Второе Национальное сообщение Кыргызской Республики по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Бишкек: Полиграфоформление, 2009. 214 с.
3. Глазовская М.А. Эоловые мелкоземистые накопления на ледниках хребта Терской Ала-Тай // Тр. Ин-та географии АН СССР. 1952. Т. 49. С. 55–69.
4. Действие ядерного оружия. М.: Воениздат, 1963. 683 с.
5. Диких А.Н. Некоторые результаты исследований естественной загрязнённости эоловым мелкоземом поверхности ледников Тянь-Шаня // Гляциол. исследования на Тянь-Шане. Фрунзе: Илим, 1975. С. 81–89.
6. Диких А.Н. Атмосферная циркуляция и химическое загрязнение ледников Тянь-Шаня // Метеорология и гидрология в Кыргызстане. Вып. 2. Бишкек: изд. Кыргызско-Российского Славянского университета, 2002. С. 126–133.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике: Для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 831 с.
8. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии: Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 875 с.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 32. Кыргызская ССР. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 375 с.
10. Павлова И.А. Оценка состояния загрязнения воздушного бассейна Чуйской долины в зимний и летний периоды // Метеорология и гидрология в Кыргызстане. Вып. 2. Бишкек: изд. Кыргызско-Российского Славянского ун-та, 2002. С. 133–140.
11. Подрезов О.А. Горная метеорология и климатология. Бишкек: изд. Кыргызско-Российского Славянского ун-та, 2000. 269 с.
12. Смирнов Н.В., Белугин Д.А. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии. М.: Недра, 1969. 381 с.
13. Усубалиев Р.А. Антропогенная составляющая геохимии ледников Тянь-Шаня // Изв. НАН КР. 1999. № 1. С. 48–51.

### Summary

Industrial development of the Kumtor Gold Mine in the nival-glacial zone of Tien Shan (altitude ranging from 4000 to 4500 m a.s.l.) is inevitably accompanied by the release of some additional amounts of dust in atmosphere. Sampling in 7 points and an analysis of the quantity (weight) of dust in the seasonal snow (September–April) on glaciers show that the dust pollution does not substantially exceed the natural level of dust in Tien Shan. An analysis of almost 3 000 daily measurements of dust in the surface layer of air at 4 points around the gold mine has also shown that the economic activity has no significant impact on dust production. It is likely that the manmade component of overall dust in the immediate vicinity of the deposit and the gob pile does not exceed 20%. No increase in the content of dust and in its anthropogenic component with time has been found. Thus, we suggest that the principal amount of dust in the area is brought during the cold season from snow-free areas of Central Asia.