

УДК 551.311.3: 551.506.5: 551.510.41

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВЫНОСА АЭРОЗОЛЯ С
ХВОСТОХРАНИЛИЩА БАЛХАШСКОГО ГОРНО-
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА**

Доктор геогр. наук М.Е. Бельгибаев

Канд. геогр. наук М.Ж. Бурлибаев

О.С. Галаева

Канд. ф.-м. наук О.Е. Семенов

А.П. Шапов

Проведены измерения вертикальных потоков массы аэрозолей с территории хвостохранилища Балхашского горно-металлургического комбината при ветровом и конвективном подъеме частиц с поверхности. Во время пыльной бури длительностью 16 часов при скоростях ветра 10...12 м/с с хвостохранилища вынесена масса частиц в 1000...1200 т. Повседневно действующий, в тёплый период года, конвективный вынос мелкодисперсных частиц достигает 100 т в сутки. Частицы содержат тяжёлые металлы.

Озеро Балхаш — одно из крупнейших бессточных озёр Земли. Оно формирует благоприятный для проживания людей климат, обеспечивает населению условия для хозяйственной деятельности. Кроме природных богатств, создаваемых водоемом, в регионе сосредоточены большие запасы минерального сырья, уже давно используемого на благо человека. В Балхаше находится крупнейший металлургический комбинат с предприятиями по добыче руды. Балхашский горно-металлургический комбинат (БГМК) обеспечивает работой большую часть населения города. К сожалению, деятельность БГМК имеет не только важное социально-экономическое значение, но и оказывает значительные негативные экологические нагрузки на природную систему региона, ухудшает условия для проживания людей. На комбинате многое делается для уменьшения вредного влияния выбросов производства. В 1995 г создана система оборотного водоснабжения производства с прекращением сброса загрязненных вод в озеро. Проводятся работы по улавливанию выбросов SO_2 в атмосферу. Эти мероприятия улучшают качество воздушной среды и воды в озере.

Однако острой экологической проблемой остается хвостохранилище комбината, расположенное западнее г. Балхаша на берегу озера. На хвостохранилище складироваются твердые отходы производства обогатительной фабрики комбината, поступающие туда по пульпопроводу. При выплавке меди от 70 до 90 % первичного сырья переходит в отвалы. В хвостохранилище накоплено до 1200 млн т отходов, содержащих значительное количество тяжелых металлов [2, 8]. Большая часть этих отходов медеплавильного производства подвергается выветриванию и выносятся за пределы хвостохранилища.

До настоящего времени измерений ветрового выноса массы накопленных на хвостохранилище отходов не было. Поэтому по заданию Министерства охраны окружающей среды экспедиция КазГидромета в августе 2002 года определила вертикальные потоки массы частиц от поверхности хвостохранилища в атмосферу. Были получены необходимые для расчетов другие метеорологические характеристики приземного слоя атмосферы. Исследован дисперсный состав частиц поверхностного слоя хвостохранилища. Были взяты образцы породы отвалов для определения содержания некоторых тяжелых металлов. Эти анализы выполнены Ж.М. Жаппаровой.

Работе экспедиции была оказана оперативная и благожелательная помощь и поддержка руководителей и работников Балхашского горно-металлургического комбината, городской экологической службы. Всем им авторы приносят искреннюю благодарность.

Физико-географическое описание хвостохранилища

Хвостохранилище БГМК расположено на запад от комбината и непосредственно примыкает к нему (рис.1). С юга оно отделено от зал. Торангылык плоской песчаной полосой, заросшей невысоким камышом. Ширина этой полосы 250. . . 300 м. С севера и запада к хвостохранилищу примыкают открытые пространства степи Бетпакдала. Расстояние от восточной стороны хвостохранилища до жилого массива г. Балхаш составляет 2,5. . . 3 км. Площадь хвостохранилища составляет 22 км², вместе с прудом-испарителем – 40 км².

Хвостохранилище представляет собой территорию, ограниченную насыпной дамбой отсыпанной грубообломочным материалом с мелкоземным наполнителем. Высота дамбы составляет от 15 м на востоке до 5 м на западе. Толщина отложений породы в хвостохранилище меняется, соответственно, от 14 до 4 м. По вершине дамбы проложены трубы пульпопровода, по которым порода подается на хвостохранилище. По дисперс-

ному составу порода представляет собой средний песок. По данным [2, 8] в состав породы входят гранодиориты, диабазовые порфириты, вторичные кварциты, кварцы и серициты. По всему периметру хвостохранилища, вдоль наружного откоса дамбы, проложен дренажный канал. Площадь хвостохранилища представляет собой относительно ровную, осложненную технологическими карьерами (рис. 2) и барханами, поверхность. Западную часть хвостохранилища занимает пруд-отстойник. Площадь его составляет примерно одну треть от всей площади хвостохранилища. Площади, подверженные золотой переработке, а так же ровные поверхности, сложенные несвязанным грунтом и представляющие опасность развития процессов дефляции, составляют 10 – 12 км².

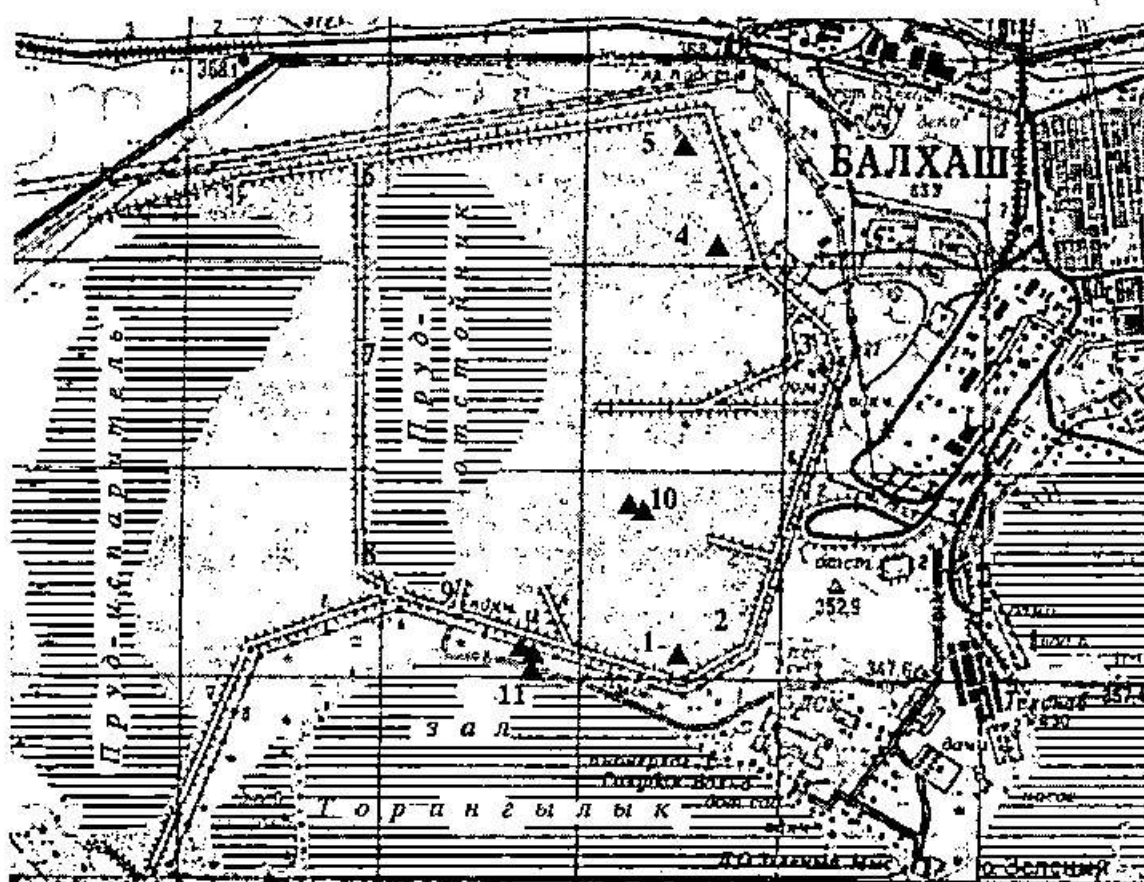


Рис. 1. План хвостохранилища БГМК. 1 – 10 места отбора проб на химический анализ; ▲ места отбора проб на дисперсный анализ. Сторона квадрата сетки равна 2 км.

Золотые формы рельефа распространены в восточной части хвостохранилища и наиболее развиты в юго-восточной его четверти (рис. 2). Часть площади на северо-востоке хвостохранилища покрыта легкими суглинками, которые так же подвержены дефляции: на начальном этапе в виде выветривания и разрушения слоев, затем частицы транспортируются ветром.

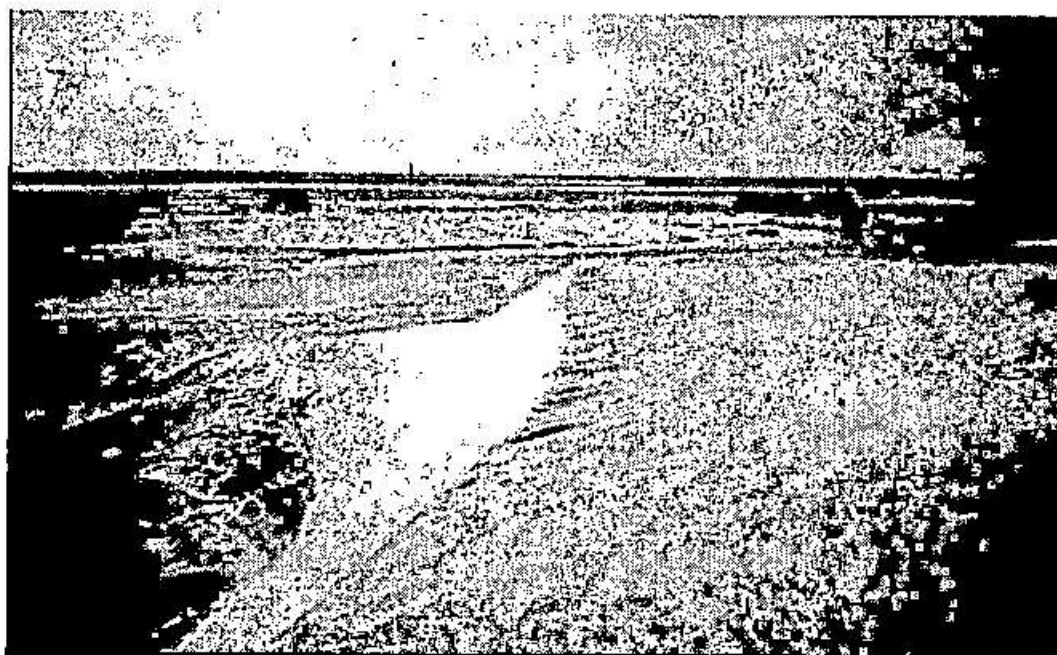


Рис. 2. Барханы в восточной части хвостохранилища.

В северо-восточной части хранилища, где поверхность сложена суглинками, сформировались полигональные ячейки, напоминающие поверхность такыра. Но это псевдотакыры, так как они недолговечны и разрушаются под влиянием дефляции. Разрушительным эоловым процессам подвержена не только поверхность хвостохранилища – на южном склоне дамбы повсеместно видны эоловые отложения со следами дефляции в виде ряби. Дренажный канал местами засыпается эоловыми наносами из хвостохранилища. Песчаная поверхность прибрежной равнины залива Торангылык покрыта плащом эоловых отложений толщиной от 2 до 5 см.

Дисперсный состав породы хвостохранилища и его изменение с высотой переноса

Интенсивное развитие эоловых процессов в восточной части хвостохранилища, говорит о том, что дисперсный состав "хвостов" благоприятен для процессов выветривания. Для характеристики дисперсного состава породы хранилища были отобраны образцы из поверхностного слоя, подвергающегося выветриванию, и в "разорванном" пульпопроводе, по которому порода поступала к местам складирования. Образцы взяты по восточной части периметра хранилища, в точках 1, 4 и 5 (рис.1), в месте проведения метеорологических измерений (точка 10), примерно в центре его юго-восточной четверти. На рис.3 представлены графики накопленной функции распределения частиц породы, отобранной в различных пунктах хвостохранилища.

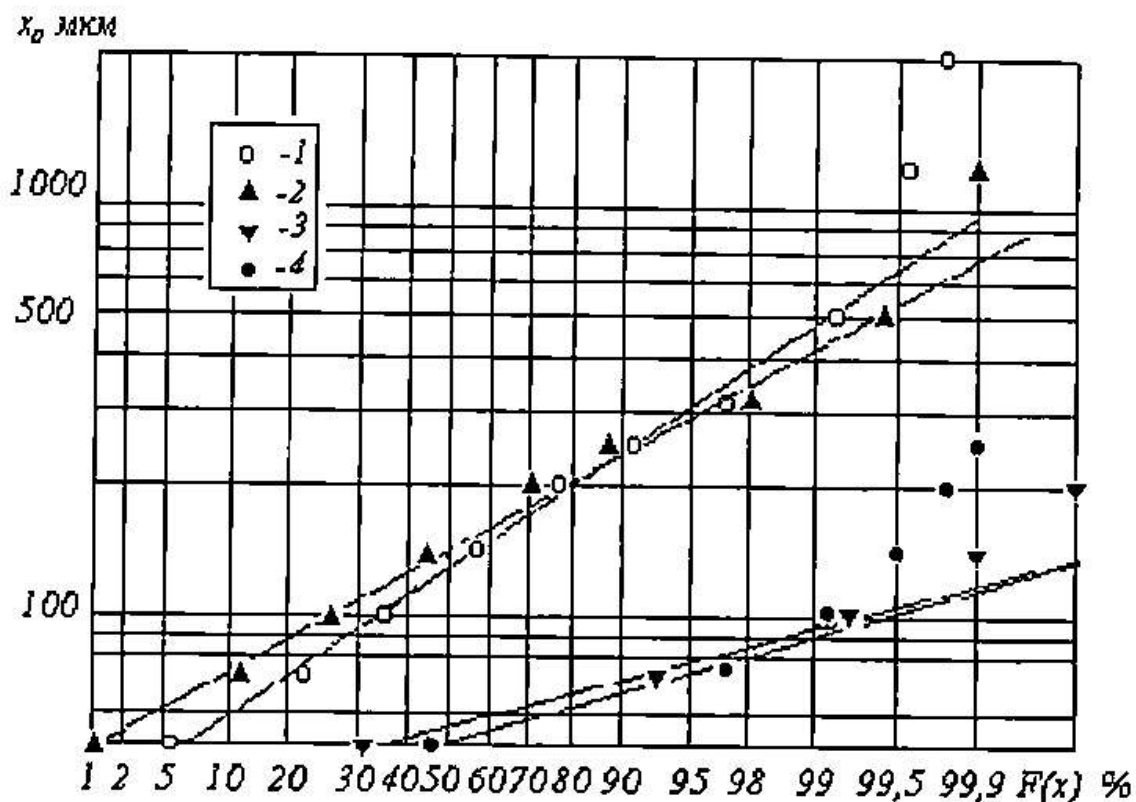


Рис. 3. Интегральные кривые распределения частиц измельченной породы в различных пунктах хвостохранилища, и уловленных на высотах 0,5 и 2 м. 1 – недеформируемая поверхность в пункте наблюдений, 2 – бархан в пункте наблюдений, 3 – на уровне 0,5 м, 4 – на уровне 2 м.

У всех исследованных проб эмпирические точки на вероятностной клетчатке для кривых с умеренной асимметричностью удовлетворительно располагались около прямой линии. Отклонения от прямой отмечались в области крупных размеров частиц и не превышали, в основном, одного процента. Поэтому функцию распределения частиц измельченной горной породы хвостохранилища по размерам можно аппроксимировать логарифмически-нормальным распределением с плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{0,434}{\sigma_{lgx} x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lg x - \lg x_0)^2}{2\sigma_{lgx}^2} \right], \quad (1)$$

где x — размер песчинок; x_0 — их средний геометрический размер; σ_{lgx} — среднее квадратическое отклонение логарифмов размеров частиц.

Для образца, отобранного из пульпопровода (проба №1, табл. 1), и представляющего, по существу, исходный материал, поступающий на хвостохранилище, средний геометрический размер частиц измельченной породы $x_0 = 170$ мкм, среднее квадратическое отклонение логарифмов размеров $\sigma_{lgx} = 0,41$. Средний геометрический размер частиц породы равен наиболее часто встречающимся размерам естественных пустынных песков. Отличается она от этих песков значительно большей дисперсией – у песков пустынь σ_{lgx} не превышает значений 0,12 ...0,25. Возможность описания размеров частиц измельченной горной породы логарифмически-нормальным распределением свидетельствует о том, что процесс её дробления подчиняется схеме А.Н. Колмогорова [7]. Большая дисперсия породы объясняется повышенным содержанием в ней мелкодисперсных и очень крупных частиц. Содержание частиц < 100 мкм, потенциально способных к турбулентному диффузионному подъему на значительные высоты и выносу за пределы хвостохранилища и его защитной зоны, достигает 30 %, примерно такой же является доля крупных частиц, непосредственно прыгающих над самой поверхностью хранилища на высоте нескольких миллиметров, остальные частицы могут сальтировать в слое до 25...50 см.

Таблица 1

Параметры распределения частиц песка по размерам в пробах, отобранных в различных местах хвостохранилища БГМК

№ пробы	Характеристика песков и места отбора проб	Параметры распределения	
		x_0 мкм	σ_{lgx}
Песок, отобранный в различных пунктах хвостохранилища			
1	Образец из трубы пульпопровода	170	0,41
2	Точка 1. Эоловый нанос	170	0,37
3	Точка 4. Эоловый нанос	180	0,34
4	Точка 5. Образец с недефлируемой, покрытой слоем суглинка, площади	160	0,24
5	Точка 10. Недефлируемая поверхность в пункте наблюдений	140	0,24
6	Точка 10а. Подвижный бархан высотой 0,7м в пункте наблюдений	160	0,21
Пыльная буря 13 августа			
7	Песок, уловленный на высоте 0,5м	60	0,11

№ пробы	Характеристика песков и места отбора проб	Параметры распределения	
		x_0 мкм	σ_{lgx}
8	Песок, уловленный на высоте 2,0 м Выпадение за контуром хвостохранилища	50	0,12
9	На расстоянии 20 м	56	0,24
10	На расстоянии 120 м	53	0,22
11	На расстоянии 250 м	55	0,15

Поскольку гранулометрический состав раздробленных пород соответствует пескам, то в дальнейшем в тексте мы будем пользоваться термином "песок". Анализ образцов песка с участков хвостохранилища, не подверженных дефляции, показал, что средний геометрический размер частиц меняется по площади незначительно в интервале 140...160 мкм. Участие же в перемещении ветром, сопровождающееся выносом мелкодисперсных частиц за его пределы и разрушением крупных, приводит к уменьшению дисперсии распределения $\sigma_{lgx} = 0,21...0,34$ и увеличению среднего геометрического размера. Так в районе площадки для проведения наблюдений нашей экспедиции у недефлируемой поверхности песка $x_0 = 140$ мкм при $\sigma_{lgx} = 0,24$. На подвижном бархане в этом же пункте средний геометрический размер (x_0) увеличился до 160 мкм, а σ_{lgx} уменьшилось до 0,21.

Уменьшение дисперсии распределения частиц по размерам по сравнению с поступающим песком по пульпопроводу произошло, в основном, за счет уменьшения содержания мелкодисперсных частиц до 15...20 %. Значит, из поверхностного слоя хвостохранилища, участвующего в золотой переработке, вынесено от 1/3 до 1/2 частиц размером менее 100 мкм. Это подтверждается и нашими измерениями переноса песка во время бурь в августе 2002 г. На рис. 3 представлены и результаты дисперсного анализа переносимых частиц на высотах 0,5 и 2 м. Средний геометрический размер частиц x_0 на этих уровнях равен соответственно 58 и 52 мкм, σ_{lgx} уменьшилась до 0,11 и 0,12. Доля частиц < 100 мкм в потоке на этих высотах достигает 98...99 %. Экстраполяция эмпирической кривой до малых вероятностей ($p = 0,01$ %) позволила грубо оценить и наименьший размер частиц, который равен 10...20 мкм.

Исследование дисперсного состава отложений частиц за пределами хвостохранилища на расстоянии 20, 120 и 250 м от него в направлении по нормали к берегу дали примерно такой же средний геометрический размер частиц (53...56 мкм) и большую дисперсию распределений ($\sigma_{lgx} = 0,15...0,24$). Вынос твердых частиц с хвостохранилища на акваторию озера Балхаш подтвержден исследованиями М.А. Илющенко с соавторами [5]. Ими обнаружены залежи техногенных илов в бухте Бертыс и Торангылык. Илы достигают мощности более 1 м и, по их мнению, являются следствием производственной деятельности БГМК. Илы содержат повышенные концентрации целого ряда химических элементов: хрома, кадмия, никеля, ванадия, бериллия, стронция. Особенно больших значений концентраций в них достигают медь и цинк. Содержание меди в илах таково, что их можно использовать в качестве бедной медьсодержащей руды.

Механизм конвективного подъема мелкодисперсных частиц

Кроме ветрового переноса грубодисперсных частиц грунта существует и другой механизм вовлечения в воздушные потоки мелкодисперсных частиц конвективными процессами в атмосфере. При различных метеорологических условиях возникают разные виды подъемов в виде пыльных вихрей и типа "пузырей" – термиков.

В приповерхностном слое воздуха в аридных районах в жаркую сухую погоду формируются значительные вертикальные градиенты температуры, которые могут превышать 10 К/см и создавать условия преодоления мелкими частицами (тонкодисперсными аэрозолями) вязкого подслоя и вовлечения в процессы турбулентной диффузии. По мнению Г.С. Голицина, И.Г. Гранберга с соавторами [6] этот фактор является, вероятно, одной из основных причин эмиссии мелких частиц с поверхности в атмосферу при слабом ветре. Конвективные вертикальные движения зарождаются в неустойчиво стратифицированном слое, образующемся у поверхности земли при нагревании ее солнечным излучением. Конвекция является механизмом, с помощью которого потенциальная энергия этого слоя переходит в кинетическую энергию вертикальных и горизонтальных движений. Начальными импульсами для возникновения и развития конвекции служат микромасштабные возмущения, всегда имеющиеся в приповерхностном слое воздуха. При неустойчивой стратификации они быстро вырастают до размеров крупных вихрей, называемых термиками. Под действием силы Архимеда термики приобретают значительные скорости подъема и могут проникать в расположенный

выше устойчивый слой. Эта одна из форм термической турбулентности, имеющая широкий спектр размеров турбулентных вихрей. Конвекция является важным фактором тепло- и массопереноса в атмосфере.

Важной особенностью для аридных регионов является сильная неоднородность температуры подстилающей поверхности (например, перепад температуры между вершиной и подошвой бархана достигает 5...10 К). По-видимому, этим эффектом можно объяснить иногда наблюдающиеся в таких погодных условиях над барханной поверхностью на высоте порядка 1 м микроинверсии температуры и влажности, которые способствуют накоплению более горячего, насыщенного тонкодисперсным аэрозолем воздуха, и последующему прорыву слоя микроинверсии с образованием пылевого "столба" типа вертикальной струи. Она способна поднять большое количество аэрозоля в верхние слои пограничного слоя атмосферы. Механизм конвективного подъема частиц с поверхности изложен нами по работе [6].

Полевые исследования выноса грубодисперсного аэрозоля с территории хвостохранилища

Для оценки ветрового выноса массы грубодисперсного аэрозоля с территории хвостохранилища необходимо было провести на нем комплекс метеорологических измерений, который позволил бы исследовать перенос частиц при пыльных бурях, а в дни с конвективным механизмом подъема – более мелких частиц с его поверхности. Для этого на базе передвижной метеорологической станции ПМС-72 в августе 2002 года были проведены необходимые измерения, позволившие получить количественную оценку выноса.

Перечень измерений определялся моделью расчета вертикального потока примеси в приземном слое атмосферы подробно изложенный в статье [11]. В ней предложено для вычисления вертикального потока массы тяжелой быстро оседающей примеси использовать разработанную в рамках теории подобия схему расчета С.С. Зилитенкевича [4] и Е.К. Гаргера с соавторами [3], в которой, с целью учета динамической активности частиц, предложено вместо динамической скорости потока u_* использовать разность $(u_* - w_g)$, где w_g скорость гравитационного падения частиц примеси.

$$Q_w = -\chi(u_* - w_g)[S(z_2) - S(z_1)] / \left(\ln \frac{z_2}{z_1} + \beta_\sigma \frac{z_2 - z_1}{L} \right). \quad (2)$$

В этой формуле $\chi = 0,4$, $S(z_2)$ и $S(z_1)$ – измеренные концентрации примеси на уровнях z_2 и z_1 , L – масштаб Монина-Обухова, β_0 – константа, принятая нами для условий вынужденной конвекции равной единице. При безразличной стратификации $L \rightarrow \infty$ и формула упрощается

$$Q_w = -\chi(u_* - w_R) [S(z_2) - S(z_1)] / \ln \frac{z_2}{z_1}. \quad (3)$$

Метеорологические измерения обеспечивали получение градиентов концентрации примеси в слое 0,5...2 м, динамической скорости потока u_* , масштаба длины Монина-Обухова L (учитывающего влияние температурной стратификации) и коэффициента турбулентности k_t на высоте одного метра. Для получения u_* , k_t , L выполнялись измерения скорости ветра u на стандартных уровнях 0,5 и 2 м, температуры воздуха T и её градиента в этом слое. При вычислении u_* также получали параметр шероховатости поверхности z_0 . Вычисление L требовало также рассчитывать турбулентный поток тепла H . С целью определения содержания тяжелых металлов, уловленные образцы аэрозолей подвергались затем физико-химическому анализу.

Для решения этих задач в юго-восточной четверти хвостохранилища, примерно в его центре, была организована временная метеоплощадка. На ней были установлены четыре метеомачты высотой 2,5 м. На первой из них устанавливались два психрометра МВ-4 для измерения температуры T , на второй – два контактных дистанционных анемометра М-92, на третьей – аспирационные заборники мелкодисперсного аэрозоля на фильтры АФА, на четвертой – пескоуловители КазНИГМИ для улавливания грубодисперсного аэрозоля во время песчаной бури. Направление ветра определялось по вымпелу. Все приборы были установлены на стандартных для градиентных метеорологических измерений уровнях $z_1 = 0,5$ и $z_2 = 2$ м (рис. 4).

В салоне передвижной метеостанции располагались два газовых счетчика для измерения прокачиваемого через фильтры АФА объема воздуха, побудитель расхода воздуха (пылесос) и счетчики импульсов контактных анемометров.

Измерения температуры воздуха и скорости ветра проводились во время отбора проб аэрозоля непрерывно с десятиминутным осреднением в соответствии с требованиями "Руководства по теплосбалансовым наблюдениям" [10]. Отбор проб на фильтры АФА выполнялся согласно с "Руководства по контролю загрязнения атмосферы" [9]. Необходимые для вычислений параметры: u_* , k_t , L , z_0 и H определялись за каждый десятиминутный ин-

тервал наблюдений. Полученные значения масштаба Монина-Обухова L затем осреднялись за период отбора проб.

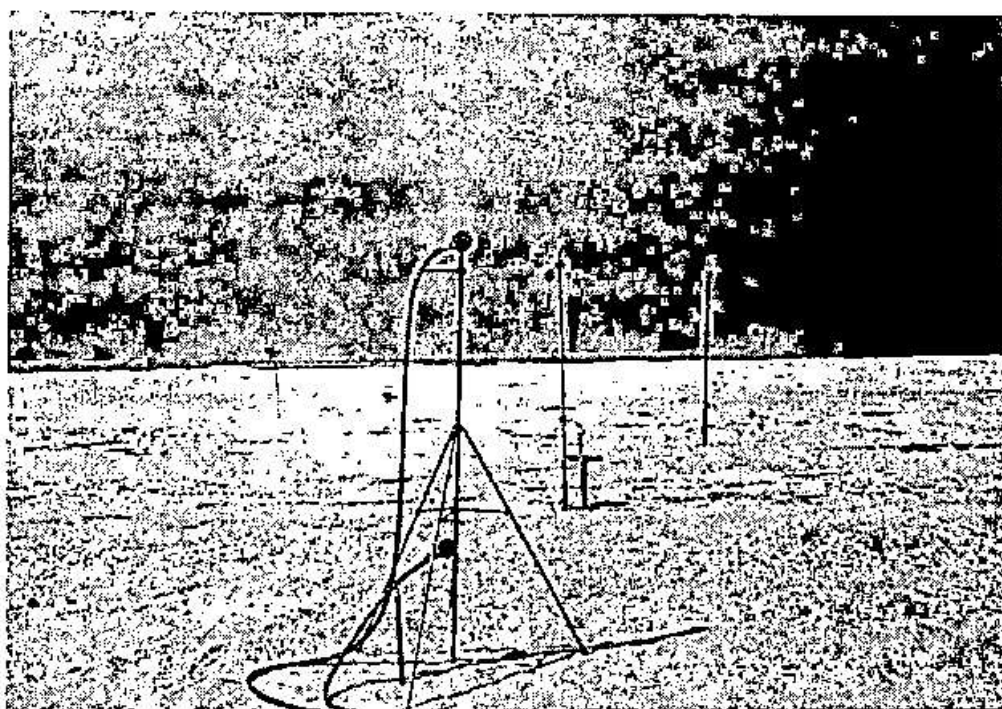


Рис. 4. Приборы для метеорологических измерений. На переднем плане – заборники мелкодисперсных частиц, далее психрометры, анемометры и пескоуловители для грубодисперсных частиц.

При песчаных бурях, как известно, наблюдается безразличная температурная стратификация приземного слоя атмосферы [12], поэтому во время бурь измерялся только расход твердой фазы q и скорость ветра. Твердым расходом называется масса частиц твердой фазы, переносимая в единицу времени через единичную площадь сечения потока. Твердый расход связан с массовой концентрацией зависимостью

$$q_z = s_z \cdot u_p, \quad (4)$$

где q_z - твердый расход песка на высоте z ; s_z - массовая концентрация на той же высоте; u_p - скорость частиц твердой фазы в воздушном потоке.

В табл.2 приведены в качестве примера результаты измерений и вычислений метеорологических параметров приземного слоя атмосферы при отборах проб аэрозоля за 12 августа.

Весь период наших измерений на хвостохранилище дул ветер со скоростями, близкими к критической величине начала выдувания наиболее подвижных частиц песка размером 80...100 мкм ($u_{кр} = 0,15$ м/с). Поэтому на фоне развития вынужденной конвекции часто отмечались и кратковременные переносы песка в виде поземков длительностью несколько секунд или десят-

ков секунд; в северной части хранилища часто были видны пыльные вихри. Вследствие этого выделить чисто конвективный подъем аэрозолей очень сложно. Крайне неустойчивая стратификация хорошо прослеживается по изменению величины L . За время наблюдений нами были отмечены ещё четыре ярко выраженных явления пыльных бурь и поземков, три из которых были слабой интенсивности и не отмечены М Балхаш.

Таблица 2

Параметры приземного слоя атмосферы при отборах проб аэрозолей,
Балхаш, 12 августа 2002 г.

№ пробы	Время отбора	Параметры приземного слоя атмосферы							
		$u_{0,5}$, м/с	u_2 , м/с	z_0 , см	u^* , м/с	k_1 , м ² /с	H , кВт/м ²	L , м	\bar{L} , м
12 августа									
2.	☼	6,2	7,1	0,0030	0,26	0,10			
		5,9	6,7	0,0020	0,23	0,09			
3.	10:37 – 11:07	5,6	6,2	0,0001	0,17	0,16	0,20	-2,3	
		5,7	6,4	0,0006	0,20	0,16	0,18	-4,2	-6
5.	11:32 – 12:02	5,6	6,3	0,0010	0,21	0,14	0,08	-10,9	
		4,5	5,0	0,0003	0,15	0,10	0,04	-8,0	
7.	12:15 – 12:45	5,2	5,6	0,0002	0,16	0,08	0,02	-19,4	-12
		4,7	5,2	0,0002	0,15	0,10	0,04	-8,0	
		4,3	4,7	0,0001	0,13	0,11	0,06	-3,2	
9.	15:07 – 15:37	3,7	4,1	0,0002	0,12	0,07	0,01	-16,3	-10
		3,3	3,6	0,0001	0,10	0,06	0,01	-9,5	
11.	15:47 – 16:17	4,5	5,0	0,0002	0,14	0,10	0,05	-5,2	
		3,6	4,0	0,0003	0,12	0,09	0,03	-5,4	-5
		3,4	3,7	0,0001	0,10	0,12	0,03	-3,2	
13.	16:27 – 16:57	4,7	5,2	0,0002	0,15	0,11	0,06	-5,3	
		3,4	3,6	0,0001	0,10	0,09	0,05	-1,9	-3
15.	17:08 – 17:38	4,1	4,6	0,0009	0,15	0,15	0,17	-1,9	
		3,3	3,8	0,0090	0,15	0,12	0,09	-3,5	
		5,1	5,6	0,0001	0,15	0,10	0,05	-6,4	
17.	☼	4,8	5,3	0,0001	0,15	0,08	0,02	-15,9	-11
		5,3	5,9	0,0003	0,18	0,11	0,05	-11,0	

№ пробы	Время отбора	Параметры приземного слоя атмосферы							
		$u_{0,5}$ м/с	$u_{2,0}$ м/с	z_0 см	u^* м/с	k_1 м ² /с	H кВт/м ²	L м	\bar{L} м
17.	17:49 – 18:19	5,9	6,6	0,0002	0,19	0,14	0,11	-5,9	
		4,7	5,3	0,0010	0,17	0,10	0,04	-11,6	-8
		4,6	5,1	0,0001	0,14	0,05	0	∞	
Пыльная буря 12 – 13 августа									
	23:00 - 15:00	7,0	8,8		0,51				

Достаточно сильная буря началась в 23 часа 12 августа и закончилась около 15 часов 13 августа. Длилась буря 16 часов при скоростях ветра $u_{10} = 10...12$ м/с, на высоте 10 м с максимальным усилением до 13 м/с. Ветер был с устойчивыми скоростями, но изменял направление, вращаясь по часовой стрелке – началась буря при ЗСЗ румбе, а закончилась при В направлении. Результаты измерений при бурях и параметры, необходимые для вычислений вертикального потока массы грубодисперсных частиц представлены в табл. 3. В последней графе рассчитаны значения Q_w . Изменчивость вертикального потока массы, как видно в табл. 3, очень большая. При слабых поземках Q_w изменялся от 0,04 до 0,74 мг·м⁻²·с⁻¹, при буре вырос на порядок величины и достиг 3,94 мг·м⁻²·с⁻¹. Расчет Q_w выполнялся по формулам (2) и (3).

Таблица 3

Расчет концентрации и вертикального потока массы по результатам измерений твердого расхода пескоуловителями во время бурь и поземков. Хвостохранилище БГМК, 2002 г.

Время		Скорость ветра, м/с			Уловленная масса, мг		S, мг/м ³		Q _w , мг·м ⁻² ·с ⁻¹	
начало	конец	$\bar{u}_{0,5}$	$\bar{u}_{2,0}$	\bar{u}^*	z = 0,5	z = 2	z = 0,5	z = 2	по (2)	по (3)
11 августа										
12:00	12:45	5,9	6,6	0,20	360	120	4,58	1,35	0,19	0,13
13:06	18:00	6,1	6,9	0,23	7340	1530	13,61	2,46	0,74	0,55
12 августа										
10:07	10:37	5,9	6,7	0,22	320	110	6,10	1,79	0,27	0,20
17:08	19:03	5,1	5,7	0,17	210	70	1,20	0,35	0,04	0,03
12 – 13 августа										
23:00	15:00	7,0	8,8	0,51	63600	11680	31,43	4,66	3,94	2,39

Суточный ход Q_w для конвективного механизма поднятия пыли с поверхности должен хорошо следовать за суточным ходом радиационного баланса B . Результаты наших измерений, не соответствовали этой закономерности из-за больших выбросов значений потока массы во время кратковременных усилений ветра. Они вызывали перенос песка в виде поземка, когда дополнительно работает механизм взвешивания мелких частиц из-за бомбардировки поверхности сальтирующими частицами. Расчет Q_w при конвективном механизме взвешивания частиц проводился по формулам (2) и (3). Результаты расчетов даны в табл. 4. Q_w приведены как в $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, так и в $\text{т}\cdot\text{км}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Последние единицы измерения Q_w удобны для пересчета подъема частиц со всей площади источника.

Таблица 4

Результаты вычислений вертикальных потоков массы мелкодисперсных частиц по отборам на фильтры АФА, БГМК, 2002 г.

Время		Концентрация, $\text{мг}/\text{м}^3$		u , м/с	\bar{L} , м	Q_w , $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$		Q_w , $\text{т}\cdot\text{км}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$	
начало	конец	$z = 0,5$	$z = 2$			по (2)	по (3)	по (2)	по (3)
11 августа									
13:51	14:51	12,2	3,96	0,24	-	0,57	0,43	2,07	1,55
12 августа									
10:37	11:01	23,6	1,11	0,19	-6	1,50	1,03	5,41	3,68
11:32	12:07	19,8	0,37	0,15	-12	0,92	0,55	3,33	2,0
12:15	12:45	0,4	0,11	0,12	-10	0,01	0,005	0,05	0,02
15:07	15:37	0,6	0,11	0,12	-5	0,02	0,01	0,08	0,04
15:47	16:17	3,0	0,50	0,13	-3	0,15	0,08	0,53	0,28
16:27	16:57	2,4	0,60	0,14	-2	0,16	0,09	0,57	0,33
17:08	17:39	2,3	0,51	0,16	-11	0,09	0,06	0,32	0,20
17:49	18:19	2,1	0,82	0,17	-8	0,07	0,06	0,26	0,17
18:33	19:03	3,3	0,76	0,2	-47	0,15	0,11	0,54	0,38
13 августа									
15:43	16:13	1,2	0,72	0,16	-4	0,03	0,02	0,10	0,06
16:44	17:16	-	0,40	0,16	-4	-	-	-	-
17:26	17:58	0,3	0,32	0,12	7	-0,002	-0,001	-0,007	-0,004

Последнее измерение 13 августа в 17 ч 58 мин пришлось на начало процесса выпадения аэрозоля из потока на поверхность хвостохранилища

(отрицательное значение Q_w). Вертикальный поток массы мелкодисперсных частиц при чисто конвективном потоке на 1...2 порядка меньше.

Однако, почти повседневная непрерывная работа этого механизма выноса массы в теплый период года (6...7 месяцев) должна вносить значительный вклад в вынос наиболее мелких частиц на окружающие хвостохранилище территории, в том числе на зеркало озера и город. По нашим наблюдениям за неполный день измерений 12 августа с одного км² было поднято и снесено потоком воздуха за пределы хвостохранилища 11 т. Так как восточная сухая часть хвостохранилища занимает 10...12 км², то весь вынос за этот день достигает 111...133 т. Если принять длительность теплого периода за 180...200 суток, то за год по этой грубой оценке следует ожидать выноса порядка 24000...25000 т.

Вынос массы частиц M с хвостохранилища во время длительной бури 12 – 13 августа и за время четырех более слабых бурь вычислялся по формуле

$$M = Q_w \cdot F \cdot t, \quad (5)$$

где F – площадь, подвергающаяся выветриванию, м²; t – длительность переноса, с. Информация для вычислений бралась из табл.5. За первую бурю 11 августа было вынесено 5...6 т, за вторую – 120...150 т. Существенно меньше был вынос за дневные слабые бури 12 августа: за первую – 5...6 т, за вторую – около 3 т. Вынос за длительную бурю 12 – 13 августа достигал значительных величин – 1013...1213 т. За все эти случаи бурь с хвостохранилища было вынесено порядка 1140...1360 т. Так как ветер имел направление преимущественно северных румбов, то поток аэрозолей выходил на озеро Балхаш и выпадал на зеркало водоема. Общий вынос за время измерений достиг 1250...1500 т.

Вынос массы песка с хвостохранилища БГМК во время бури 12 – 13 августа был также рассчитан по физико-статистической модели песчаных бурь КазНИГМИ, описание которой можно найти в монографии [1]. Масса выноса за бурю в ней определяется по формуле

$$M = Q_z \cdot t \cdot l, \quad (6)$$

где Q_z – общий расход песка в приземном слое атмосферы кг·м⁻¹·с⁻¹, t – длительность бури, l – ширина фронта переноса ветропесчаного потока. Q_z – это масса переносимого ветром песка в слое от поверхности до верхней границы приземного слоя атмосферы через фронт переноса шириной 1 м. Ши-

рина фронта переноса l определяется размерами хвостохранилища и направлением ветра. Во время бури ветер постепенно менял свое направление от ЗСЗ до В румба и, поскольку точных контуров дефлируемой площади нет, то величина фронта переноса была принята равной $l = 3$ км, что является, очевидно, несколько заниженной его оценкой. Для $x_0 = 160$ мкм и динамической скорости $u_* = 0,51$ м/с общий расход песка 50-ти процентной обеспеченности равен $Q_z = 6 \cdot 10^3$ кг·м⁻¹·с⁻¹. При принятых нами значениях входящих в формулу величин вынесенная за бурю масса песка 50-ти процентной обеспеченности оказалась равной $M_{50\%} = 1040$ т. По описанной выше диффузионной модели вынос массы песка с хвостохранилища оказался равным $M = 1670 \dots 2000$ т при расчете по формуле (2) и $1013 \dots 1213$ т – по формуле (3). Сравнение этих результатов говорит о том, что учет гравитационного осаждения примеси позволил получить близкие результаты с физико-статистической моделью КазНИГМИ. Это позволяет применить последнюю к вычислению многолетнего выноса частиц с хвостохранилища БГМК по данным наблюдений М Балхаш за пыльными бурями.

О содержании тяжелых металлов в породах хвостохранилища и аэрозолях

В настоящее время неоспоримым фактом является загрязнение оз. Балхаш золовым выносом веществ из хвостохранилища БГМК. Результаты экспедиционного исследования 2002 года показывают, что основными загрязнителями оз. Балхаш из хвостохранилища БГМК являются кадмий, свинец, цинк и медь. Для объективной оценки содержания загрязняющих веществ в подстилающей поверхности хвостохранилища нами были выбраны 9 репрезентативных точек отбора проб по периметру хвостохранилища и на площадке метеонаблюдений (рис. 1).

Результаты химического анализа почвы на площадке наблюдений характеризуются следующими показателями: кадмий – 7,30 мг/кг; свинец – 81,28 мг/кг; цинк – 67,05 мг/кг; медь – 414,54 мг/кг. При этом индекс загрязненности почвы на площадке наблюдений, относительно предельно-допустимых концентраций веществ, составляет: кадмий – 14,6 при ПДК – 0,50 мг/кг; свинец – 2,5 при ПДК – 32 мг/кг; цинк – 1,2 при ПДК – 55 мг/кг; медь – 12,6 при ПДК – 33 мг/кг (табл. 5).

Вторая проба, с этой же площадки характеризуется как желтый охристый суглинок и имеет следующие показатели химических веществ: кадмий – 0,35 мг/кг (0,7 ПДК); свинец – 140,32 мг/кг (4,4 ПДК); цинк – 36,31 мг/кг (0,7 ПДК); медь – 3385,13 мг/кг (102,6 ПДК).

Отобранный песок на глубине от 0 до 10 см на этой площадке содержит химические ингредиенты в следующих пределах: кадмий – 0; свинец – 66,24 мг/кг (2,1 ПДК); цинк – 46,60 мг/кг (0,8 ПДК); медь – 2315,92 мг/кг (70,2 ПДК). Результаты химического анализа породы, отобранной на площадке наблюдений, характеризуются содержанием: кадмий – 1,85 мг/кг (3,7 ПДК), свинца – 97,97 мг/кг (3,1 ПДК), цинка – 45,13 мг/кг (0,8 ПДК) и меди – 1508,85 мг/кг (45,7 ПДК).

Таблица 5

Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в грунте хвостохранилища БГМК, август 2002 г.

Место отбора	Металл			
	кадмий	свинец	цинк	медь
Площадка метеонаблюдений				
Желтый охристый суглинок	7,30	81,28	67,05	414,54
0,3 см верх, серая корочка	0,35	140,32	36,31	3385,13
Песок 0-10 см	Необн.	66,24	46,60	2315,92
Песок 0-5 см с места стоянки приборов	1,85	97,97	45,13	1508,85
Образцы из пульпопровода				
№1	2,83	129,78	109,20	67,90
№2	3,48	659,37	33,30	2069,03
№3	2,46	461,20	47,08	1709,93
№4	14,64	59,54	47,08	3869,41
№5	34,36	142,75	71,5	1611,02
Пробы по периметру хвостохранилища				
Точка 1	Необн.	802,18	44,09	2811,87
Точка 3	5,34	538,82	44,70	1547,37
Точка 4	16,02	509,88	55,10	2373,55
Точка 5	4,50	36,55	114,90	17,43
Точка 8 (сухой песок)	43,49	110,63	40,20	2878,98
Точка 8 (у наливного водоема)	28,37	242,74	117,30	2360,40
Точка 9 (коренная белая порода)	29,09	850,0	94,50	323,93
Точка 9 (насосная станция, темно-серый песок)	4,32	654,80	51,80	1951,43
Точка 9 (светлый песок хвостохранилища)	35,06	625,93	32,40	4101,35
Песок из карьера на хвостохранилище	4,63	686,00	48,50	1711,66
Сухой песок у пруда отстойника	2,95	562,11	46,90	922,39
Мокрый песок у пруда отстойника	4,76	93,32	44,08	1875,02
Бархан у пруда испарителя	8,05	293,10	30,20	3282,30

Выявленная загрязненность почв по периметру хвостохранилища, согласно схеме отбора проб в точках (рис. 1) характеризуется следующими показателями:

- точка 1: кадмий – 0; свинец – 802,18 мг/кг (25,1 ПДК), цинк – 44,09 мг/кг (0,8 ПДК), медь – 2811,87 мг/кг (85,2 ПДК);

- точка 3: кадмий – 5,34 мг/кг (10,7 ПДК); свинец – 538,82 мг/кг (16,8 ПДК), цинк – 44,70 мг/кг (0,8 ПДК), медь – 1547,37 мг/кг (46,9 ПДК);

- точка 4: кадмий – 16,02 мг/кг (32,0 ПДК); свинец – 509,88 мг/кг (15,9 ПДК), цинк – 55,10 мг/кг (1,0 ПДК), медь – 2373,55 мг/кг (71,9 ПДК);

- точка 5: кадмий – 4,50 мг/кг (9,0 ПДК), свинец – 36,55 мг/кг (1,1 ПДК), цинк – 114,90 мг/кг (2,1 ПДК), медь – 17,43 (0,5 ПДК);

- точка 8 (сухой песок): кадмий – 43,49 мг/кг (87,0 ПДК), свинец – 110,63 мг/кг (3,5 ПДК), цинк – 40,20 мг/кг (0,7 ПДК), медь – 2878,98 мг/кг (87,2 ПДК);

- точка 8 (у наливного водоема): кадмий – 28,37 мг/кг (56,7 ПДК), свинец – 242,74 мг/кг (7,6 ПДК), цинк – 117,30 мг/кг (2,1 ПДК), медь – 2360,40 мг/кг (71,5 ПДК);

- точка 9 кадмий – 29,09 мг/кг (58,2 ПДК), свинец – 850,0 мг/кг (26,6 ПДК), цинк – 94,50 мг/кг (1,7 ПДК), медь – 323,93 мг/кг (9,8 ПДК);

- точка 9 (насосная станция): кадмий – 4,32 мг/кг (8,6 ПДК), свинец – 654,80 мг/кг (20,5 ПДК), цинк – 51,80 мг/кг (0,9 ПДК), медь – 1951,43 мг/кг (59,1 ПДК).

Как видно из приведённых данных, за исключением отдельных проб по цинку, наблюдается повсеместное превышение кадмием, цинком, свинцом и медью установленных предельно-допустимых концентраций. По содержанию ионов тяжелых металлов, пробы хвостохранилища БГМК нельзя относить к категории природных почв - по концентрации ионов тяжелых металлов эти искусственные почвы являются промышленно обогащенными концентратами, готовыми к вторичному использованию. Этот тезис подтверждается на примере химического анализа проб, отобранных из пульпопровода:

- проба № 1: кадмий – 2,83 мг/кг (5,7 ПДК), свинец – 129,78 мг/кг (4,1 ПДК), цинк – 109,20 мг/кг (2,0 ПДК), медь – 67,90 мг/кг (2,1 ПДК);

- проба № 2: кадмий – 3,48 мг/кг (7,0 ПДК), свинец – 659,37 мг/кг (20,6 ПДК), цинк – 33,30 мг/кг (0,6 ПДК), медь – 2069,03 мг/кг (62,7 ПДК);

- проба № 3: кадмий – 2,46 мг/кг (4,9 ПДК), свинец – 461,20 мг/кг (14,4 ПДК), цинк – 47,08 мг/кг (0,9 ПДК), медь – 1709,93 мг/кг (51,8 ПДК);

- проба № 4: кадмий – 14,64 мг/кг (29,3 ПДК), свинец – 59,54 мг/кг (1,9 ПДК), цинк – 47,08 мг/кг (0,9 ПДК), медь – 3869,41 мг/кг (117,3 ПДК);

- проба № 5: кадмий – 34,36 мг/кг (68,7 ПДК), свинец – 142,75 мг/кг (4,5 ПДК), цинк – 71,5 мг/кг (1,3 ПДК), медь – 1611,02 мг/кг (48,8 ПДК).

Поступившая по пульпопроводу на территорию хвостохранилища порода, после высыхания, подвергается золотой переработке и выносу во всех направлениях, в том числе и на акваторию оз. Балхаш. По нашему предположению, основными источниками загрязнения озера ионами тяжелых металлов является именно хвостохранилище БГМК, сток р. Каратал и сточные воды г. Балхаша. При этом необходимо отметить, что сток р. Каратал содержит в основном ионы свинца и цинка, тогда как медь и кадмий отсутствуют.

Отобранные на фильтры частицы были подвергнуты анализу на содержание кадмия, меди и мышьяка. Анализы на содержание перечисленных тяжелых металлов выполнены в Центре мониторинга загрязнения природной среды Казгидромета (аналитик Ж.М. Жаппарова). Их определение проводилось методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборе типа АА-6650 фирмы "Shimadzu" с точностью до 0,1 ppb. В табл. 6 приведены результаты измерений и анализов.

Таблица 6

Содержание пыли и тяжелых металлов в воздухе на уровнях 0,5 и 2 м

Вещества	Время		Концентрация, мг/м ³	
	начало	конец	z = 0,5 м	z = 2 м
12.08.2002				
	10:37	12:45		
Пыль			6600,851	518,4809
Cd			0,070718	0,024531
Cu			6,164522	0,756213
As			0,050069	0,017288
	15:07	16:57		
Пыль			2027,502	416,6885
Cd			0,044772	0,041365
Cu			1,454091	0,450788
As			0,026707	0,017501
	17:08	19:03		
Пыль			2566,081	684,7971
Cd			0,018927	0,016554

Вещества	Время		Концентрация, мг/м ³	
	начало	конец	z = 0,5 м	z = 2 м
Cu			3,57169	0,661314
As			0,023543	0,01511
	13.08.2002			
	15:43	17:58		
Пыль			702,4085	539,7
Cd			0,046836	0,093686
Cu			0,788855	1,050145
As			0,027519	0,029282

Концентрация пыли в воздухе на высоте 2 м превышала во время отбора предельно допустимую (ПДК = 0,2 мг/м³) в 2...3,4 раза, по кадмию и мышьяку не достигали ПДК. По меди – лишь однажды концентрация превысила ПДК (13 августа) на уровне 2 м, но на высоте 0,5 м, превышение ПДК меди достигало 6, что говорит о том, что медь переносится, по-видимому, сальтирующими крупными частицами.

Выводы

Кратковременное экспериментальное исследование выноса частиц с поверхности хвостохранилища Балхашского горно-металлургического комбината показало наличие интенсивных процессов выветривания примерно на половине его площади (10...12 км²), окружной дороге и части откосов. При полевых измерениях удалось получить оценку подъема и выноса массы породы с хвостохранилища во время длительной пыльной бури средней интенсивности. Буря длилась шестнадцать часов при скоростях ветра 10...12 м/с. Вынесенная масса оценена нами величиной 1000...1200 т. Кратковременные усиления ветра, сопровождающиеся переносом частиц твердой фазы, давали вынос от 2 до 100 т.

Повседневно действующий конвективный механизм подъема мелкодисперсных частиц на фоне умеренных скоростей ветра (4...5 м/с) дает в сутки величину выноса порядка 100 т. Учитывая длительность теплого периода, когда действуют конвективные процессы, вынос этим механизмом достигает порядка 24000...25000 т в год. Метеорологические наблюдения М Балхаш за явлениями дефляции на поверхности хвостохранилища БГМК, очевидно, не репрезентативны. Причиной этого является, по-видимому, дымовой факел комбината, закрывающий хвостохранилище от