

УДК: 574.5(282.65)

Тыныбеков А.К., Тердикбаев Э.А.

КГУ им. И.Арабаева

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ЦИАНИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ БАРСКАУН

В данной статье предлагается математическая модель цианидного загрязнения реки Барскаун.

Ключевые слова: экологические риски, цианид, загрязнения, математическая модель.

Бул макалада Барскоон суусунун цианидден булганышынын математикалык модели сунушталат.

Түйүндүү сөздөр. Экологиялык тобокелдик, цианид, булгануу, математикалык модель.

In this paper we propose a mathematical model of the cyanide pollution of the river Barskaun.

Key words: environmental risks, cyanide, contamination, mathematical model.

Река Барскаун, имея средний многолетний расход незначительно больше $4 \text{ м}^3/\text{с}$, входит в десятку наиболее крупных рек Иссык-Кульской котловины. Она относится к типу рек ледниково-снегового питания с максимальным стоком в августе. При таком типе питания почти половина (а в конкретном случае реки Барскаун несколько более 60 %) годового стока в значительной степени обеспечивается таянием ледников и приходится на июль-сентябрь. Площадь водосборного бассейна р. Барскаун при замерах по гидропосту "Устье р. Сасык", расположенном в 6 км выше с. Барскаун, составляет 346 км^2 при средней взвешенной высоте водосбора 3480 м [1]. Гидрологическая изученность реки и ее бассейна на фоне большинства других рек региона не выделялись до Барскаунской аварии 20 мая 1998 года при автомобильной транспортировке на рудник Кумтор в результате падения в реку контейнера часть его груза цианидов попала в воду (рис.1) и ушла в сторону населенного пункта. Произошедшая авария резко обострила интерес к этому району, в том числе и к составу воды в реке, в первую очередь к тем его окислителям, которые влияют на устойчивость цианидов в воде.



Рис.1. Барскаунское ущелье.

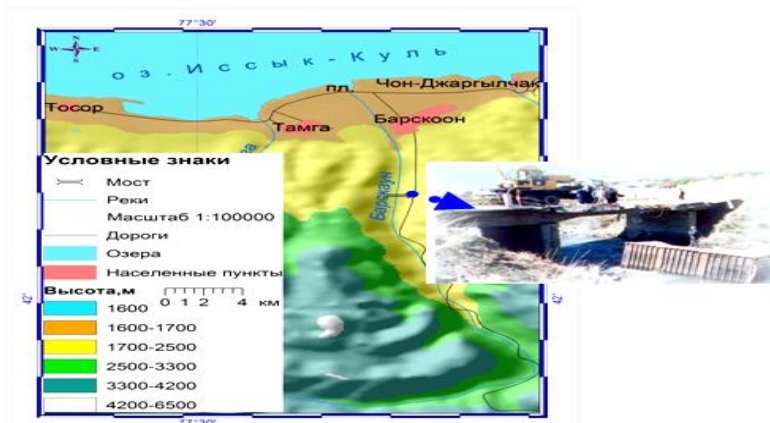


Рис. 1. Место происхождения аварии, падения в реку контейнера с цианидом

Аномальные содержания в природных водах сульфат-иона, особенно в условиях горного ландшафта, характерного для бассейна р. Барскаун, могут появиться под влиянием лишь двух главных причин - выщелачивания содержащих гипс и другие легко растворимые сульфаты пород и окисления сульфидов, прежде всего пирита, как наиболее распространенного среди них [3].

Бассейны рек Керегеташ и Барскаун сложены верхнепротерозойскими алевролитами, сланцами, песчаниками, реже известняками, а также несколькими интрузивными телами, что исключает появления здесь сульфатности вод, обусловленной гипсом, т.е. ведущим фактором повышенной сульфатности воды в реке Барскаун может быть только широкое окисление сульфидов.



Рис. Река Барскаун

Количество окисляющегося минерала может быть оценено исходя из следующего: при среднегодовом расходе названного образующего составяющего верховий, равном $0,8 \text{ м}^3 / \text{с}$, (среднегодовой расход реки на створе «Устье р. Сасык» близок к $4 \text{ м}^3 / \text{с}$), превышении содержания сульфат - иона в воде р. Барскаун над фоновым (за фон принято среднее из концентраций рек Кичи-Джаргылчак и Тамга - см. табл.2) примерно, на $20 \text{ мг} / \text{дм}^3$ и, учитывая, что количество образующегося при окислении пирита сульфата в 1,5 раза больше исходной массы минерала [3], количество окисляющегося пирита составит более 3 тыс. тонн в год с площади водосбора вблизи 20 км^2 , что заметно больше, чем в других бассейнах региона..

Наряду с макрокомпонентным составом нами устанавливалось содержание в речной воде ряда микроэлементов - урана, цинка, фтора и компонентов, показателей антропогенного загрязнения. В табл.3 приведены результаты их определений.

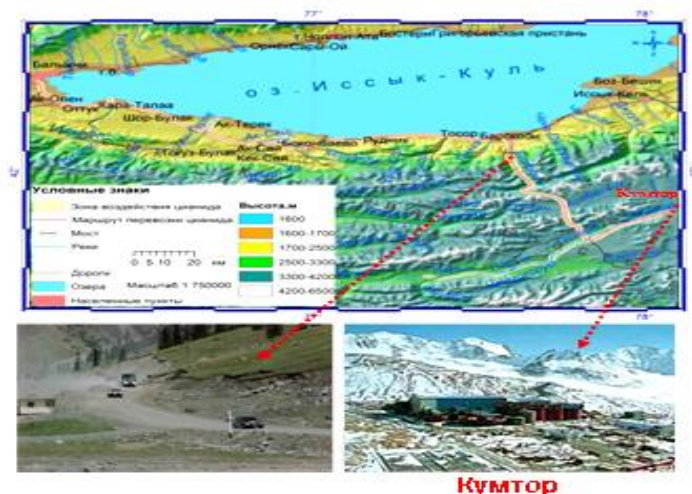


Рис. 2. Дорога транспортировки цианида и золоторудное месторождение Кумтор

Анализ риска является частью системного подхода к принятию политических решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого в нашей стране обеспечением промышленной безопасности, а за рубежом - управлением риском. При этом анализ риска или риск-анализ (Risk Analysis, Process Hazard Analysis) определяется как систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды.

Анализ риска заключается в выявлении (идентификации) опасностей и оценке риска. Опасность - источник потенциального ущерба либо вреда или ситуация с возможностью нанесения ущерба, а риск (Risk) или степень риска (level of risk) - это сочетание частоты или вероятности и последствий определенного опасного события. То есть понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой происходит опасное событие, и последствия опасного события. Применение понятия риска, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий.

Риск, фактически, есть мера опасности.

Идентификация опасности - процесс выявления и признания, что опасность существует и определение ее характеристик. Завершается выбором дальнейшего направления деятельности.

Рассмотрим взаимосвязи между этими показателями. При проведении анализа риска определяются различные сценарии аварий. Каждому сценарию аварии предписывается своя частота реализации (λ , 1/год) и вероятностная зона поражения ($P(x,y)$), которая рассчитывается исходя из физических процессов протекания аварий и характеристики негативного воздействия на человека или другие субъекты воздействия. Для получения поля потенциального территориального риска $R(x,y)$ проводится суммирование всех вероятностных зон поражения с учетом частоты их реализации на рассматриваемой территории (в предположении малости произведения $k_j * P_j(x,y)$):

$$R(x,y) = \sum_{j=1}^J \lambda_j * P_j(x,y) \quad (1)$$

Для оценки риска необходимо построить распределение персонала или населения $N(x,y)$ на рассматриваемой территории. Это распределение отражает количество субъектов воздействия, находящихся в конкретном месте в среднем в год. Тогда коллективный риск (F) определяется как

$$F = \int_s N(x, y) * R(x, y) ds \quad (2)$$

Средний индивидуальный риск оценивается как $R_{ind}=F/N_R$. Кроме показателя среднего индивидуального риска, зная $N(x,y)$ и $R(x,y)$, можно построить распределение субъектов воздействия по уровням риска ($N(R)$), N - R диаграмму.

Для каждого территориального распределения $N_r(x,y)$ групп субъектов можно определить показатели коллективного (F_r) и индивидуального R_{r_ind} риска.

Показатели социального риска определяются исходя из частоты реализации (λ , $1/год$) и вероятностной зоны поражения $P(x,y)$ для каждого сценария аварии с учетом распределения субъектов $N(x,y)$ на рассматриваемой территории. Количество пострадавших (N_*) при конкретном сценарии аварии рассчитывается по формуле:

$$N_* = \int_s N(x, y) * P(x, y) ds \quad (3)$$

Частота этого события есть λ . Рассчитав количество пострадавших для всего спектра сценариев (J), можно построить F - N диаграмму, просуммировав все частоты сценариев аварий, для которых количество пострадавших больше наперед заданной величины.

Известно, что скорость ветра существенно изменяется с высотой. В прикладных исследованиях наиболее часто используется степенная зависимость вида

$$U(z) = U_o (z / z_o)^p, \quad (4)$$

где U_o - скорость ветра на "стандартной" высоте z_o (обычно $z_o=10$ м).

Значения показателя " p " также зависят от класса устойчивости атмосферы и "шероховатости" поверхности A_o (таблица 4).

Рассмотрим связь между категориями устойчивости атмосферы и характеристиками турбулентного переноса и масштабами переноса примеси. Не меняя существа вопроса, проведем анализ для простейшего случая переноса "нейтральной" примеси от точечного источника постоянной мощности G_o . Тогда распределение концентрации примеси на оси следа ($y=0$) на поверхности земли ($z=0$) равно

$$C(x,0,0) \approx \frac{G_o}{2\pi \cdot U \cdot \delta_y(x) \cdot \delta_z(x)} \quad (5)$$

Обычно коэффициенты дисперсии в горизонтальном и вертикальном направлении a_y и a_z вычисляются по эмпирическим соотношениям. т.е. с мощностью выброса.

На сегодня в литературе имеется обширная информация о построении как сложных (трехмерных), так и более простых моделей переноса, основанных на эмпирических данных.

Для прогноза распределения концентраций токсиканта вокруг источника используем простейшую модель Гаусса турбулентной диффузии.

Математическое выражение для концентрации вещества от точечного источника с постоянной мощностью - Q^* ($кг/с$) записывается в виде:

$$C(x, y, z, t) = \frac{f(A) \cdot Q^*}{2\pi \delta_y \delta_z U} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\delta_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\delta_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\delta_z^2}\right) \right], \quad (6)$$

где Q^* - мощность источника ($кг/сек$);

σ_y, σ_z - дисперсионные параметры, зависящие от устойчивости атмосферы и расстояния от источника «х»,(м); U - скорость ветра м/сек ; H - высота источника (м); x, y, z - осевая, поперечная и вертикальная координаты; $f(A)$ - доля примеси в слое перемешивания ("А" - высота слоя перемешивания).

Эта зависимость применительно к реальным условиям выброса с концентрацией C_o

корректируется введением понятия виртуального источника. В этом случае вычисляют x_0 таким образом, чтобы в точке $(x=0, y=0, z=H)$ соблюдалось равенство:

$$C_o = \frac{f(A) \cdot Q}{2\pi \cdot U \cdot \delta_y(x_o) \cdot \delta_z(x_o)} \quad (7)$$

Смертельное поражение человека, находящегося в районе источника токсической опасности, зависит от многих факторов: от общих объемов и продолжительности выброса токсического вещества при аварии; от состояния атмосферы, скорости и направления ветра во время выброса и распространения вещества в атмосфере; от типа (специфики воздействия) самого вредного вещества; от места нахождения человека по отношению к источнику в момент аварии; наконец, от состояния здоровья самого человека и от его поведения во время аварии.

Все эти факторы можно разделить на две группы:

1. технологические и климатические факторы, не зависящие от человека, подвергающегося негативному воздействию;
2. факторы, которые в той или иной степени определяются или зависят от человека — факторы жизнедеятельности, местонахождения, поведения, состояния здоровья и т.д.

На факторы 1-ой группы (интенсивность и продолжительность выброса, а также тип токсического вещества, состояние атмосферы, направление и сила ветра, время существования вещества в атмосфере и т. д.) человек, находящийся в районе аварии, повлиять не может. С точки зрения абстрактного человека, попавшего в зону аварии, такие факторы являются независимыми от него, т. е. объективными.

Вероятность поражения (риск), определенная с учетом только объективных факторов, будет являться потенциальным риском.

Поле потенциального риска позволяет оценить общую картину опасности или поражения при возникновении аварии и его можно рассматривать как некоторый фон опасности вокруг объекта с токсическим веществом.

Рассмотрим непосредственно задачу вычисления потенциального риска в предположении, что все частоты и/или вероятности возникновения и существования объективных факторов, влияющих на токсическое поражение человека, нам известны:

1. Частота возникновения аварии с выбросом токсичного вещества в
2. Объемы (интенсивность) выброса токсичного вещества, которые могут изменяться в зависимости от сценария аварии в некотором диапазоне: $G_{min} < G < G_{max}$.

Каждый из этих объемов может реализоваться со своей частотой g_k ,

причем $1 \sum_{k=1}^K g_k = 1$ (8)

3. Данные о розе ветров и состоянии атмосферы в районе источника опасности:

- набор характерных для данной местности скоростей ветра $0 \leq U_\ell \leq U_{max} (\ell = 1 \dots L)$;

- набор характерных состояний атмосферы — обычно максимальное число классов устойчивости атмосферы принимается равным шести (по Паскуиллу): А, В, С, D, E, F;

- общее число направлений, из которых состоит роза ветров - М (чаще всего 8 или 16);

Приведенные выше частоты полностью описывают основные (наиболее общие) "объективные" факторы, влияющие на величину потенциального риска.

Прежде чем перейти к процедуре вычисления количественных показателей потенциального риска, необходимо оценить размер области (территории), в каждой точке

которой риск возможен, т.е. имеет ненулевое значение.

Т.о., поле риска будет ограничиваться кругом радиуса R^* с центром в источнике аварии.

При расчете потенциального риска необходимо учесть еще один фактор, определяющий уровень токсичности самого вещества. Этот фактор носит название "пробита" - P_R , учитывает специфические особенности физиологического воздействия и количество поглощенного вещества (дозу), которое может смертельно воздействовать на "абстрактного" человека, находящегося в зоне аварии, и имеет вид:

$$P_{R_{n,k,\ell,a}}(x, y) = a + \beta \cdot \ln [D_{n,k,\ell,a}(x, y)], \quad (9)$$

где $D_{n,k,\ell,a}(x, y)$ - токсидоза вредного вещества — интегральная величина

$$D_{n,k,\ell,a}(x, y) = \int_0^{T_k} C_{n,k,\ell,a}^v(x, y, t) dt, \quad (10)$$

где - функция концентрации токсичного вещества в точке $C_{n,k,\ell,a}^v(x, y)$ (x, y), T_k - время экспозиции; α, β, ν — константы, характеризующие как специфику токсиканта, так и выделенную группу людей (группу риска); (x, y) - координаты предполагаемого места нахождения абстрактного человека внутри круга радиуса R^*

Знание функции пробита в точке $P_R(x, y)$ позволяет определить вероятность (степень) поражения в точке через интеграл Гаусса:

$$A_{n,k,\ell,a}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_{n,k,\ell,a}} e^{-(z-5)^2/2} dz \quad (11)$$

Таблица 1. Константы для вычисления пробит-функции летального поражения технического персонала (С - ppm, Т - мин).

Вещество	a	b	v
Хлор	-8.29	0.92	2
Цианистоводородная кислота	-29.42	3.008	1.43

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что при оценке риска токсического поражения для населения в качестве консервативной оценки наиболее целесообразно принимать критерии воздействия, которые вызывают поражение у наиболее уязвимой части населения (нижние кривые функций поражения).

Плотность распределения случайной величины φ можно представить на основании метеорологической информации в виде гистограммы - ступенчатой функции (рис. 4):

$$\Psi_{n,ka}^n(\varphi) = \left\{ \frac{M}{2\pi} \cdot P_{n,ka}^n, (m-1) \frac{2\pi}{M} \langle \varphi \left(m \frac{2\pi}{M}; m = 1 \dots \right) \right\} \quad (12)$$

$$n = 1 \dots N, \ell = 1 \dots L, a = 1 \dots 6 \quad (13)$$

Фактически Ψ есть дискретная плотность распределения совокупности случайных, независимых временных и погодных факторов: n, l при условии a и φ , результатом интегрирования (суммирования) которой по всем этим факторам в соответствии с законами вероятности есть 1, т. е.

$$\sum_{n=1}^N \sum_{\ell=1}^L \sum_{a=1}^6 \int_0^{2\pi} \Psi_{n,\ell/a}^n(\varphi) d\varphi = \sum_{n=1}^N \sum_{\ell=1}^L \sum_{a=1}^6 \sum_{m=1}^M P_{n,\ell,m/a}^n = 1. \quad (14)$$

Определено поле потенциального риска. Изолинии $\bar{A}_{(P_\pi, \varphi_\mu)} = const$ — есть уровни равного риска.

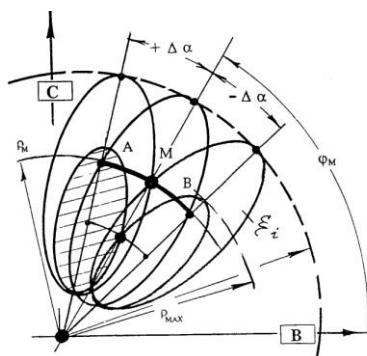


Рис. 3. К построению поля токсического поражения

Если при определении поражения в точке (ρ, φ) учесть еще и "субъективные" факторы, т.е. факторы, определяющие присутствие, жизнедеятельность и поведение человека, характерные для данной точки, в частотном или вероятностном выражении, то можно получить значение уже реального риска.

Представленный алгоритм расчета количественных характеристик поражения людей при аварийном выбросе в наиболее общем виде учитывает влияние определяющих технологических и климатологических факторов, принимающих случайные значения в пределах соответствующих характерных диапазонов изменения.

Расчитав распределение функции $D(x,y)t$ и выделив конкретную группу риска, т. е подобрав для нее числовые коэффициенты пробит-функции, далее можно перейти к определению вероятности (или доли в %) поражения людей (с использованием приведенной выше функции Гаусса) и построить подобную функции $C(x,y)$ распределение функции $A(P_R)$ в пределах исходно выделенной зоны потенциальной опасности.

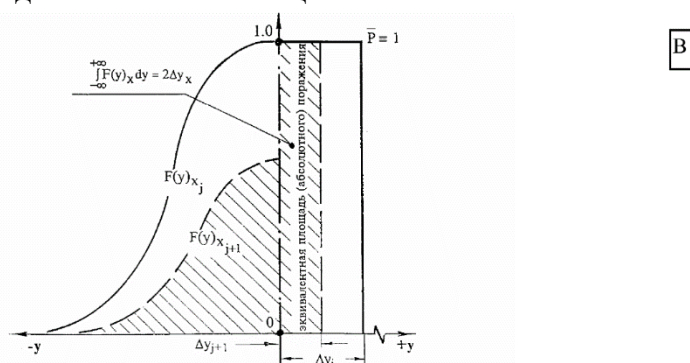


Рис. 4. Эквивалентирование зоны токсического поражения

Расчет индивидуального риска в некоторой точке территории вокруг источника опасности требует, во-первых, обоснования вероятности попадания выбранной точки в зону воздействия негативных факторов и, во-вторых, определения вероятности возникновения летального исхода (абсолютного поражения) при характерной интенсивности и общем времени действия негативных факторов на человека (как представителя биологического вида).

Для проведения полноценного анализа риска очевидна необходимость учета не только отдельных, но полного спектра физически обоснованных сценариев аварий для всех опасных объектов, а также всех возможных функций переноса (в характерном годовом разрезе изменения как самого технологического цикла производства или режимов хранения различных веществ, так и состояния ландшафта и атмосферы). А это однозначно требует перехода к построению полей потенциальной опасности и полей потенциального ущерба (риска).

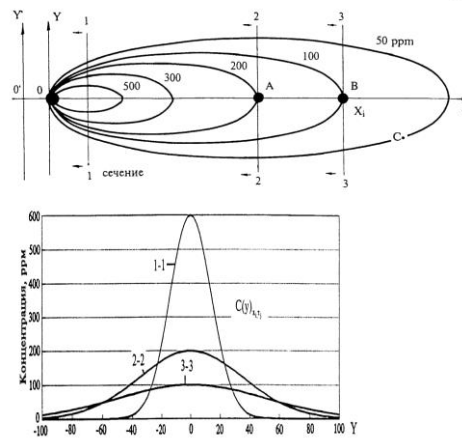


Рис. 5. Распределение концентрации C

Как было отмечено выше, для эффектов острого токсического поражения крайне важное значение имеет не только общая величина дозовой нагрузки, но и динамика изменения концентрации в конкретной точке.

Литература:

1. Швыряев А.А., Меньшиков В.В. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: Учебное пособие для вузов. — М.: Изд-во МГУ, 2004. — 124 с.
2. Туньбеков А.К. Hydroecological characterization of water south of Lake Issyk-Kul, KRSU, -Bishkek, 2006, 65p.
3. Туньбеков А.К. Environmental assessment of the risk of contamination with cyanide mountain river Barskaun, ARW NATO «Reuse of waste water," Making decisions on risk assessment and safety of the environment, October 12-16, 2006, -Istanbul, Turkey.
4. Туньбеков А.К. Modelling of environmental risks in Kyrgyzstan, Collected papers of the 14th International Conference. "Mathematics, computer, education" ICE-2007, - Moscow, Moscow State University, M.V. Lomonosov.
5. Туньбеков А.К. THE USE OF GIS FOR RISK ASSESSMENT, The Second International Symposium on Earth Observation for Arid and Semi-Arid Environments (ISEO 2014), Central Asia: Looking from Space, 10-12 September 2014, p. 72-75, -Issyk-Kul, Kyrgyzstan.