

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504

Р. Г. Ревазян, Н. А. Аджабян

Метод построения модели техноэкосистем

(Представлено чл.-кор. НАН РА А. А. Шагиняном 22/Х 2006)

Ключевые слова: *миграция веществ, грунтовые воды, поверхностные воды, моделирование*

Интенсивное развитие математического моделирования объектов биосферы, наблюдающееся в последнее время, в значительной мере продиктовано необходимостью оценки возрастающего техногенного воздействия на окружающую среду. Особенно остро ощущается необходимость в достоверных прогнозах в отношении техноэкосистем, чрезмерное загрязнение которых приводит к кризисным ситуациям.

Проблема загрязнения почв, подземных и поверхностных вод тяжелыми металлами и другими химическими соединениями становится актуальной во многих странах. Система оценки риска [1] была разработана для определения количественных показателей степени загрязнения почвы и грунтовых вод тяжелыми металлами. Новейшие подходы к изучению проблемы оценки риска включают исследование динамики конкретных случаев с применением игрового подхода, методов системного анализа, разработку сценариев на основе предположений об эволюции системы. Особую сложность представляет возможность определения некоторого количественного описания для оценки риска. Следуя [2], мы принимаем подход, в котором риск оценивается с помощью определения вероятности событий в различных подсистемах и в системе в целом. Компьютерные системы оценки состояния экосистем [1,2] строятся на методе декомпозиция-анализ-агрегирование.

Исходя из этого построение модели системы с определением количественных параметров основных связей, определяющих развитие системы,

"проигрывание" вариантов развития и их анализ представляются очень важными. При этом важно последовательно отразить в таких моделях наиболее существенные и общие свойства природных систем, которые влияют на принятие решений. Однако, поскольку при увеличении объема информации принятие решения представляется затруднительным, становится важным описание техногенного влияния на природную среду с помощью нескольких обобщенных макропараметров, с достаточной степенью точности отражающих основные характеристики такого взаимодействия.

Техноэкосистемы представляют собой сложный, многокомпонентный, изменяющийся объект, где схема связей между компонентами внутри техноэкосистем основывается на методах количественного описания потока веществ и на представлениях балансовых моделей. Такой подход особенно перспективен для анализа критических ситуаций как природного, так и техногенного происхождения.

Построение модели техноэкосистемы мы попытались показать на примере Араратской золотоизвлекательной фабрики.

Обобщенный алгоритм прогноза состояния окружающей среды в системе "обогащательная фабрика - окружающая среда" основан на разработанных математических моделях и представлен тремя разделами:

- исходные данные для прогноза: емкость и состав техногенных потоков от фабрики в окружающую среду и характеристики природной среды;
- расчет количественных характеристик мигрирующих веществ;
- результаты прогноза состояния системы (представляются в виде таблиц, рисунков и графиков).

Потоки веществ, мигрирующие в подземные и поверхностные воды, в основном определялись лизиметрическим методом. В основу рассматриваемой нами модели положены системный подход и балансовый метод описания обменных процессов [3]. С помощью моделей подобного рода наиболее эффективно решаются задачи, связанные с изменениями режимов обогащательной фабрики [4]. Данная схема отражает только часть возможных путей миграции элементов, но тем не менее она позволяет приблизительно оценить интенсивность миграции. Необходимо отметить, что потоки в рассматриваемой системе не одинаковы по своим функциональным особенностям. Так, можно выделить две группы связей между блоками. Одну группу составляют потоки, механизм которых определяется чисто физико-химическими свойствами и механическим составом почв. Например $m_{2,4}$ - это поток из почвы в грунтовые воды. Важная особенность таких потоков заключается в их разнозначности по направлению, т.е. перенос веществ может идти как в одну, так и в другую сторону. В другую группу входят

транзитные потоки веществ, связанные с механическим переходом веществ из одного блока в другой.

Водно-миграционный поток элементов в исследуемой техноэкосистеме имеет свои особенности. Известно, что состав почвенных растворов природных экосистем определяется в основном атмосферными осадками, разложением почвообразующих пород и биологическим круговоротом химических элементов. Однако в условиях техноэкосистемы поток веществ, поступающих со сточными водами в хвостохранилище фабрики, трансформируется в транзитный поток, минуя биологический круговорот, тем самым нарушая естественное функционирование экосистемы и изменяя состав не только почвенных, но и грунтовых вод.

Техногенный поток химических элементов и его дальнейшее изменение в экосистеме вносит ряд существенных корректив в состав инфильтрационных вод, которые свидетельствуют о разных нарушениях процессов функционирования экосистемы в зоне техногенеза. Так, для инфильтрационных вод техноэкосистемы характерны по сравнению с фоном высокая сульфатность и бикарбонатность вод, а также повышенные концентрации тяжелых металлов, обусловленные не литогенным фактором, а поступлением веществ со сточными водами из обогатительной фабрики [4]. Следовательно, формирование водно-миграционного потока макрокомпонентов и тяжелых металлов в техноэкосистеме в значительной мере определяется местным техногенным влиянием и существенного воздействия на сезонный характер изменения потоков элементов не оказывает.

Анализ баланса элементов показал (табл. 1), что их дисбаланс, возникающий в техноэкосистеме в процессе ее функционирования, является результатом техногенной трансформации миграционного потока элементов начиная от поступления ионов с атмосферными осадками и со сточными водами до выхода их в грунтовые и поверхностные воды, инфильтрирующиеся за пределы почвенного профиля. Согласно табл. 1 модуль выноса для вертикального стока примерно в 1.5-2 раза выше модуля поступления для HCO_3^- , SO_4 и Cl ионов и в 4 раза - для NO_3^- иона; что касается остальных исследуемых ионов (Ca , Mg , HPO_4 , NH_4), то здесь, напротив, сумма поступления ионов выше модуля выноса.

Значительную роль в водно-миграционном потоке техноэкосистем играют и тяжелые металлы, что обусловлено местным техногенным влиянием и выражается в повышении минерализации как почвенных, так и инфильтрационных вод. При этом концентрации тяжелых металлов с избытком перекрывают природные и существенно изменяют микроэлементный состав природных вод (грунтовых и поверхностных).

Таблица 1

Поток макрокомпонентов в техноэкосистеме, г/м²·год
(среднее за 3 года)

	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HPO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Модуль поступления с атмосферными осадками	14.9	16.3	7.5	6.1	1.7	0.05	0.1	0.3
Модуль поступления со сточными водами	24.2	34.3	15.4	9.5	4.9	0.5	0.2	0.4
Суммарное поступление	39.1	50.6	22.9	15.6	6.6	0.55	0.3	0.7
Модуль выноса в грунтовые воды	34.2	41.6	29.0	8.0	3.2	0.3	0.8	0.06
Модуль выноса в поверхностные воды	22.8	27.8	19.3	5.1	1.7	0.2	0.4	0.04
Баланс	-17.9	-18.8	-25.4	+2.8	+1.7	+0.05	-0.9	+0.6

Как показывают данные табл. 2, суммарные поступления тяжелых металлов значительно выше, чем модуль их выноса за исключением Cu и Ni.

Таблица 2

Поток тяжелых металлов в техноэкосистеме, мг/м² · год
(среднее за 3 года)

	As	Fe	Mn	Ti	Ni	Cu	Pb	Mo	V
Модуль поступления с атмосферными осадками	-	632.0	12.1	73.0	4.2	6.3	8.5	0.3	1.8
Модуль поступления со сточными водами	283.0	1023.0	68.0	121.0	24.9	39.7	21.3	29.4	11.3
Суммарное поступление	283.0	1655.0	80.1	194.0	29.1	46.0	29.8	29.7	13.1
Модуль выноса в грунтовые воды	144.0	513.6	14.8	66.0	22.4	35.1	12.7	11.7	5.6
Модуль выноса в поверхностные воды	96.0	342.4	9.8	44.0	14.9	23.4	8.5	7.8	3.7
Баланс	+43.0	+799.0	+55.4	+84.0	-8.2	-12.5	+8.6	+10.2	+3.7

Схема влияния золотоизвлекательной фабрики на окружающую среду приведена на рис. 1. Для схематического описания путей миграции загрязняющих веществ рассмотрим графическое представление связей между физическими составляющими, которые показаны блоками модели. Модель

воздействия техноэкосистемы описывается динамической системой, переменные которой представляют концентрации веществ в физических компонентах природной экосистемы. Кроме самой фабрики выделено 4 блока, которые связаны между собой потоками веществ. Концентрации веществ задаются усредненными значениями, следовательно, влияние неоднородности распределения в зависимости от особенностей структуры составляющих системы в данной модели не учитывается.

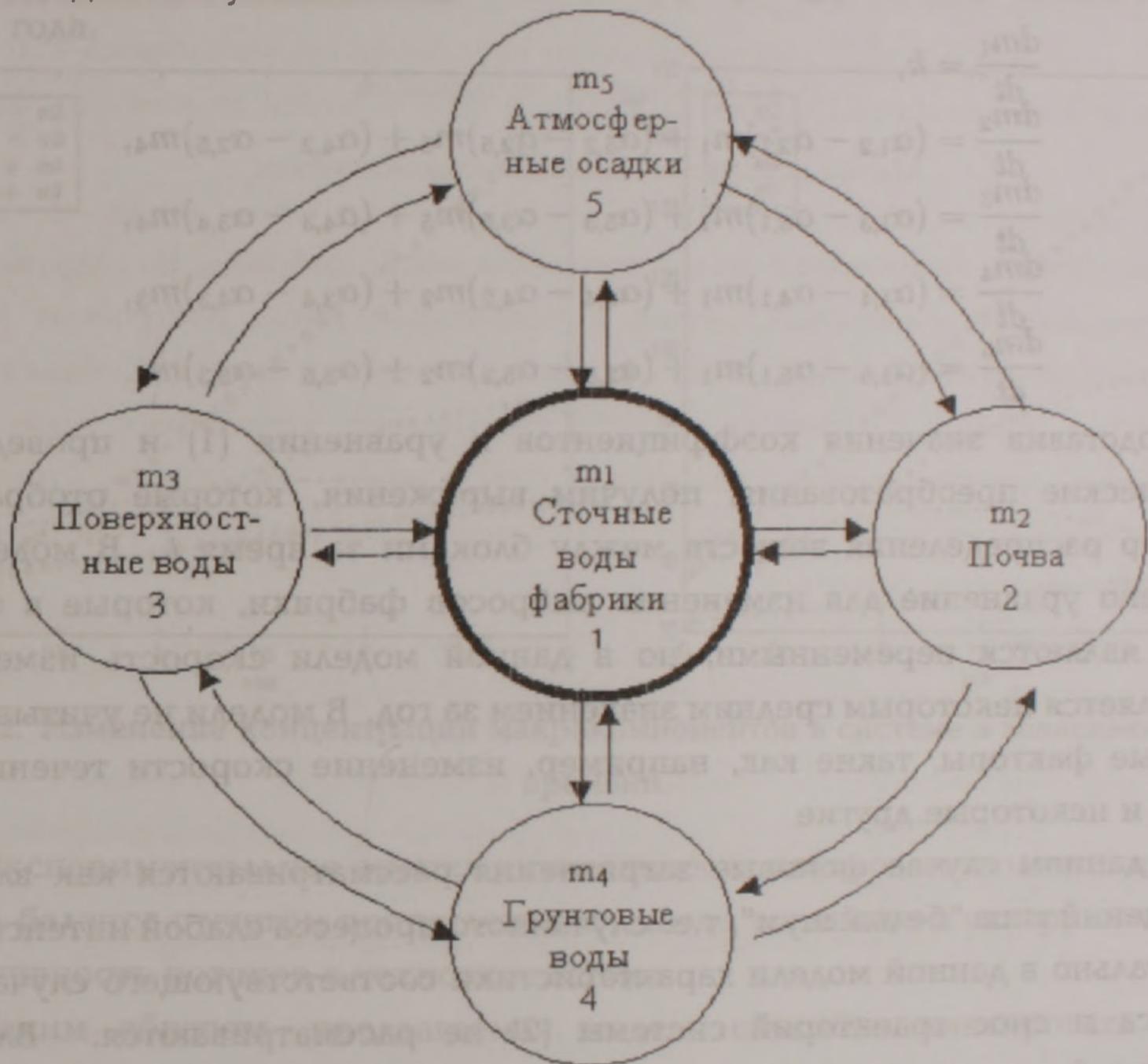


Рис.1. Схематическая модель влияния золотоизвлекательной фабрики на окружающую среду.

Изменение содержания элементов в каждом из блоков модели зависит как от потока компоненты $i = 1$ техноэкосистемы, так и связей компоненты $j \neq 1$ с остальными блоками модели. В общем виде система "фабрика - окружающая среда" описывается следующими балансовыми уравнениями:

$$\begin{aligned}
 m_2 &= m_{1,2} + m_{5,2} + m_{4,2} - (m_{2,1} + m_{2,5} + m_{2,4}), \\
 m_3 &= m_{1,3} + m_{3,5} + m_{4,3} - (m_{3,1} + m_{3,5} + m_{3,4}), \\
 m_4 &= m_{1,4} + m_{3,4} + m_{2,4} - (m_{4,1} + m_{4,3} + m_{4,2}), \\
 m_5 &= m_{1,5} + m_{2,5} + m_{3,5} - (m_{5,1} + m_{5,2} + m_{5,3}),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

здесь m_i , $i = 1, \dots, 5$, - объем выброса или содержания токсических веществ в компоненте с номером i , $i = 1$ в сточных водах фабрики, m_{ij} - концентрация

переноса токсических веществ в потоке i из j , представленная в единицах токсичной массы, например $m_2 = m_4$ - емкость блока для грунтовых вод. Концентрации элементов в потоках между блоками определяются двумя индексами соответственно номерам соединений между блоками; так, если i принимает значение 2 для блока почва, а $j = 5$, $i, j = 2, 5$ будет соответственно представлять собой индекс для потока почва-атмосферных осадков. Вся система описывается следующей динамической системой:

$$\begin{aligned} \frac{dm_1}{dt} &= k, \\ \frac{dm_2}{dt} &= (\alpha_{1,2} - \alpha_{2,1})m_1 + (\alpha_{5,2} - \alpha_{2,5})m_5 + (\alpha_{4,2} - \alpha_{2,5})m_4, \\ \frac{dm_3}{dt} &= (\alpha_{1,3} - \alpha_{3,1})m_1 + (\alpha_{5,3} - \alpha_{3,5})m_5 + (\alpha_{4,3} - \alpha_{3,4})m_4, \\ \frac{dm_4}{dt} &= (\alpha_{1,4} - \alpha_{4,1})m_1 + (\alpha_{2,4} - \alpha_{4,2})m_2 + (\alpha_{3,4} - \alpha_{4,3})m_3, \\ \frac{dm_5}{dt} &= (\alpha_{1,5} - \alpha_{5,1})m_1 + (\alpha_{2,5} - \alpha_{5,2})m_2 + (\alpha_{3,5} - \alpha_{5,3})m_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставив значения коэффициентов в уравнения (1) и проведя математические преобразования, получим выражения, которые отображают характер распределения веществ между блоками за время t . В модели (2) добавлено уравнение для изменения выбросов фабрики, которые в общем случае являются переменными, но в данной модели скорость изменения определяется некоторым средним значением за год. В модели не учитываются сезонные факторы, такие как, например, изменение скорости течения вод весной и некоторые другие.

В данном случае фоновые загрязнения рассматриваются как влияние возмущений типа "белый шум", т.е. случайного процесса слабой интенсивности. Детально в данной модели характеристики соответствующего случайного процесса и снос траекторий системы (2) не рассматриваются. Влияние флуктуаций предполагается малым, что допускает определение решения задачи [5].

Задавая коэффициенты уравнений, можно получить характеристики динамики переменных на графике. Значения параметров системы в различные временные периоды записываются в базу данных, где хранятся также данные о характеристиках миграционных потоков, которые могут быть как транзитными, так и двусторонними. Эксперименты с моделью позволяют оценить накопление химических элементов в почве в зависимости от первоначального запаса элементов в данном блоке и их поступления с выбросами из фабрики. Система позволяет хранить мониторинговые данные за многие годы и проводить сравнительный анализ баланса веществ в компонентах, однако сценарии экспериментов могут быть гипотетическими для исследования наихудшего варианта.

Уравнения (1) представляют зависимость концентрации элементов в компоненте i от потоков из компонент $j \neq i$, связанных с данным блоком. Определим зависимость $m_i, i \neq 1$, от m_1 , задавая параметры α_{ij} , интенсивности переноса между блоками.

На рис. 2 приведены кривые концентрации HCO_3^- и Ca^{2+} в блоках модели, здесь начальные значения при решении системы взяты по мониторинговым данным за первый год, а оценка параметров выбрана как среднее за три года.

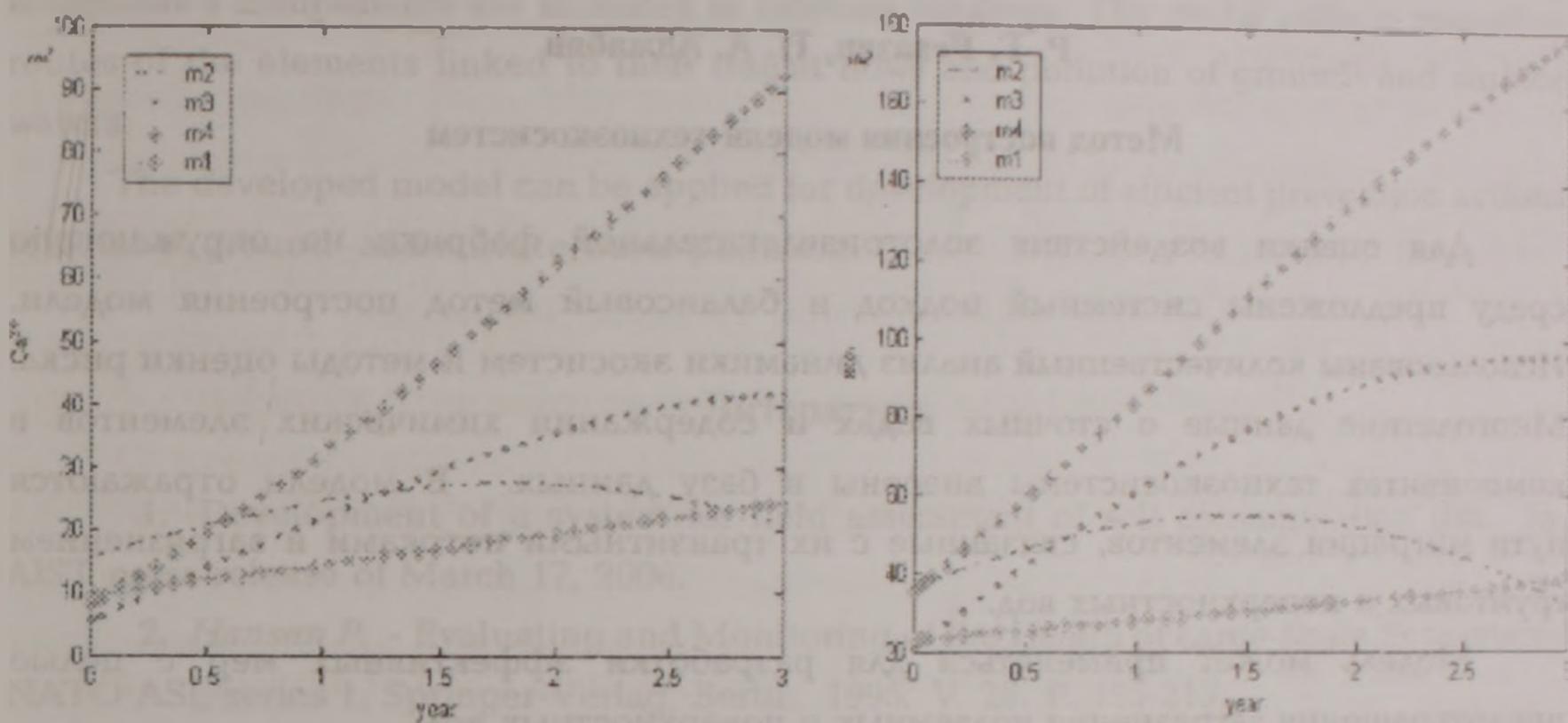


Рис. 2. Изменение концентрации макрокомпонентов в системе в зависимости от времени.

Экспериментальная оценка интенсивности потоков позволяет построить модель баланса с учетом поступления и выноса элементов и откорректировать интенсивность потоков в техноэкосистеме.

Таким образом, предлагаемая модель способна имитировать общие изменения качества инфильтрационных вод с расчетом на год и на период в несколько десятков лет. Эти исследования позволят решать задачи, связанные с загрязнением грунтовых и поверхностных вод. Полученные усредненные по субрегиону данные делают предложенную модель особенно эффективной для разработки мероприятий по защите этих вод от загрязнения. Для использования предлагаемой модели в целях мониторинга необходима дальнейшая конкретизация модели. В частности, модель может применяться для разработки контрмер, применяемых для уменьшения риска, в которой система оценки риска, порожденная загрязнением почвы и грунтовых вод, основана на вероятности появления токсичности химических соединений и тяжелых металлов.

В целом применение системного анализа к исследованию влияния отходов фабрики на окружающую среду позволило по-новому представить

характер и особенности аккумуляции и трансформации веществ в составляющих блоках и предложить новый подход к управлению техноэкосистемой на основе анализа ее информационного содержания.

Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА

Р. Г. Ревазян, Н. А. Аджабян

Метод построения модели техноэкосистем

Для оценки воздействия золотоизвлекательной фабрики на окружающую среду предложены системный подход и балансовый метод построения модели. Используются количественный анализ динамики экосистем и методы оценки риска. Многолетние данные о сточных водах и содержании химических элементов в компонентах техноэкосистемы внесены в базу данных. В модели отражаются пути миграции элементов, связанные с их транзитными потоками и загрязнением грунтовых и поверхностных вод.

Модель может применяться для разработки эффективных мер с целью предотвращения загрязнения подземных и поверхностных вод.

Ռ.Տ. Ռևազյան, Ն.Ա. Աճաբյան

Տեխնաէկոհամակարգերի մոդելի կառուցման մեթոդը

Շրջակա միջավայրի վրա ոսկու կորզման ֆարրիկայի ներգործման գնահատման նպատակով առաջարկված է մոդելի կառուցման համակարգային մոտեցում և հաշվեկշռային մեթոդ: Այս հեղափոխություններում օգտագործված են տեխնաէկոհամակարգի դինամիկայի և ռիսկի գնահատման մեթոդների բալանսական անալիզ: Տեխնաէկոհամակարգերի կոմպոնենտներում հոսքային ջրերի և քիմիական տարրերի պարունակությունների մասին մեր բազմամյա տվյալները մուտքագրված են բազային տվյալների մեջ: Մոդելում արտահայտված են տարրերի միգրացիոն ուղիներ՝ կապված նրանց տրանզիտային հոսքերի և գրունտային ու մակերեսային ջրերի աղտոտման հետ:

Մոդելը կարող է օգտագործվել արդյունավետ միջոցառումների մշակման համար՝ ստորգետնյա և մակերեսային ջրերի աղտոտումը կանխելու նպատակով:

R. H. Revazyan, N. A. Ajabyan

Man-Made Ecosystem Modeling Method

To assess the environmental impact of the gold-extracting factory, a system approach and a balance-based modeling method are suggested. This research was performed applying quantitative analysis of the ecosystems' dynamics and risk assessment methods. Long-term data on wastewater and the contents of chemical elements in the man-made ecosystem's components are included in relevant database. The model reflects migration routes of the elements linked to their transit flows and pollution of ground- and surface waters.

The developed model can be applied for development of efficient prevention actions to combat ground- and surface water pollution.

Литература

1. Development of a system for field assessment of soil contamination risk. In: AIST press release of March 17, 2006.
2. *Hansen P.* - Evaluating and Monitoring of the Health of Large-Scale Ecosystems NATO ASI, series 1, Springer-Verlag, Berlin. 1995. V. 28. P. 195-215.
3. *Ляпунов А.А., Титлянова А.А.* - Ботанический журнал. 1974. Т. 59. N 8.
4. *Ревазян Р.Г.* Биогеохимическая цикличность как функциональный критерий устойчивости экосистем. Автореф. докт. дис. Ереван. 2002. 54 с.
5. *Свирижев Ю. М.* Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. М. Наука. 1987. 368 с.