

УДК 502.52

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-115-124

## Оценка экологического состояния природно-технической системы на основе векторного критерия

М. Г. Кургузкин, кандидат технических наук, доцент, АУ «Управление Минприроды УР», Ижевск, Россия  
П. М. Кургузкин, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В статье рассмотрены вопросы оценки экологического состояния территории природно-технических систем как важнейшего показателя их стабильности. Приведен краткий анализ критериев оценки загрязнения природной среды, основанных на скалярных свертках массивов данных экологического мониторинга. Отмечено, что отсутствие учета взаимной корреляции показателей загрязнения, определяемых в процессе экологического мониторинга, снижает информативность указанных критериев. Рассмотрены методические аспекты построения критерия оценки загрязнения территории, основанного на снижении размерности и декорреляции массива данных экологического мониторинга. В качестве примера использованы результаты мониторинга загрязнения почвенного покрова на территории локальной природно-технической системы, включающей в себя объект по уничтожению химического оружия и природную среду в границах зоны защитных мероприятий. Приведены результаты использования метода главных компонент для снижения размерности и декорреляции массива данных мониторинга. Показана возможность замены одиннадцати показателей загрязнения тремя главными компонентами при сохранении приемлемой информативности описания. Переход к ортогональному базису в пространстве главных компонент позволяет рассматривать значения последних в точке, как проекции в общем случае многомерного вектора, который назван вектором повреждения и может использоваться в качестве интегрального показателя загрязнения. Приведены варианты оценки загрязнения на основе сравнения текущего и начального модулей вектора загрязнения, а также с использованием поверхности критических загрязнений. Описана возможность упрощения структуры нейросетей для прогнозирования уровня загрязнения за счет использования единственного выходного параметра нейросети в виде вектора загрязнения. Приведен пример применения нейросети, обученной на данных фонового мониторинга почвенного покрова, для прогнозирования текущего загрязнения почвы в точках зоны защитных мероприятий. Показано, что перцептрон с одним скрытым слоем удовлетворительно описывает распределение вектора загрязнений по территории через пять лет после ввода техногенного объекта в эксплуатацию.*

**Ключевые слова:** природно-техническая система, экологический мониторинг, критерии оценки загрязнения, корреляция показателей загрязнения, метод главных компонент, векторный критерий загрязнения, нейронные сети.

### Введение

В практике эколого-экономического анализа административных территорий различного уровня широко используется понятие «природно-техническая система» (ПТС) или «природно-технический комплекс» [1, 2]. В соответствии с названием ПТС включает в себя природную и техногенную составляющие, а именно исходные биогеоценозы и размещенные на их территориях промышленные предприятия, объекты хозяйственной и иной деятельности.

ПТС является сложной системой, характеризующейся разнообразием внутренних и внешних процессов, множественностью связей между ее элементами. Техногенная составляющая системы является определяющей по уровню воздействия, как правило негативного, на остальные элементы ПТС. Уровень этого воздействия в большинстве случаев превышает компенсаторные возможности природной среды по

обеспечению отрицательных обратных связей. Поэтому поддержание равновесия между основными элементами системы является условием предотвращения процессов экологической деградации и требует определенных управляющих воздействий. В природоохранной практике эти воздействия реализуются в виде следующих механизмов.

1. Ограничение выбросов в атмосферный воздух, сбросов загрязняющих веществ в водные объекты, объемов образования и накопления твердых отходов. Процедура, устанавливающая предельные уровни различных видов воздействия для каждого из их источников, называется экологическим нормированием.

2. Экологический мониторинг ПТС осуществляется в виде постоянных наблюдений за состоянием окружающей среды в выбранных точках территории, по определенной программе

с последующей оценкой и прогнозом изменения экологического состояния этой территории.

Перечисленные выше механизмы нормирования и мониторинга можно характеризовать как «оперативный» и «профилактический» соответственно. Нормативы выбросов, сбросов, объемов образования и накопления отходов являются обязательными условиями функционирования любого объекта хозяйственной или иной деятельности. Выполнение указанных нормативов является предметом государственного экологического надзора.

Поскольку изменения в окружающей среде носят явно выраженный временной характер, задачей экологического мониторинга является выявление негативных процессов на возможно ранней стадии их развития. Выявление и прогноз указанных процессов позволяет своевременно и с минимальными затратами спланировать и реализовать корректирующие воздействия в виде комплекса природоохранных мероприятий. Эти мероприятия могут быть направлены как на сам источник негативного воздействия, так и на ПТС в целом. Эффективность природоохранных мероприятий в значительной степени зависит от полноты и достоверности информации о состоянии окружающей среды на территории ПТС и, прежде всего, об уровне ее загрязнения.

С учетом изложенного выше формирование систем экологического мониторинга ПТС и разработка методов оценки и прогнозирования экологической ситуации является важной научно-практической задачей.

Современные системы экологического мониторинга [3–5] в зоне влияния крупных промышленных объектов, включая атомные электростанции и объекты накопленного экологического ущерба [6, 7], характеризуются значительным количеством контролируемых веществ и параметров, а также достаточно густой сетью пунктов наблюдения, в которых определяются концентрации загрязняющих веществ в природных средах. Отсюда следует, что количественным результатом мониторинговой деятельности являются многомерные массивы числовых данных.

Основная сложность оценки экологической ситуации на основе данных мониторинга заключается в необходимости сохранения информативности и достоверности оценки при использовании различных методов снижения размерности исходных многомерных массивов.

В практике природоохранной деятельности для оценки экологического состояния природ-

ных сред широко используются скалярные критерии, основанные на свертке информационных массивов. Ядром таких критериев является частное отношение фактической концентрации  $i$ -го вещества  $C_i$  в пробе к его предельно допустимой ПДК $_i$  или фоновой концентрации:

$$K_i = \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \text{ или } K_{\phi i} = \frac{C_i}{C_{\phi i}}. \quad (1)$$

На этой основе разработаны критерии оценки загрязнения воздушной среды (руководящий документ РД 52.04.667-2005), поверхностных вод (руководящий документ РД 52.24.643-2002), а также загрязнения почв (методические указания МУ 2.1.7.730-99).

Основным недостатком приведенного выше способа обобщения данных мониторинга является отсутствие учета возможных взаимосвязей показателей загрязнения «внутри» многомерных массивов данных. Как показывает опыт, распределение концентраций примесей в окружающей среде определяется множеством факторов и носит случайный характер. При этом определенная часть показателей загрязнения характеризуется достаточно тесной взаимной корреляцией. Игнорирование этого обстоятельства снижает информативность применяемых скалярных критериев, основанных на суммировании относительных концентраций контролируемых веществ.

С учетом изложенного выше целью настоящей работы является разработка критерия оценки загрязнения объектов окружающей среды на основе использования данных мониторинга, очищенных от «информационного шума».

#### **Методические аспекты построения векторного критерия**

В качестве примера, иллюстрирующего предложенный подход, рассмотрены результаты мониторинга почвенного покрова в зоне влияния объекта по уничтожению химического оружия (ОУХО) в г. Камбарке Удмуртской Республики. Выбор почвенного покрова связан с тем, что в отличие от воздушной и водной сред почва является более консервативной средой с точки зрения аккумуляции загрязняющих веществ.

Рассматриваемую территорию можно классифицировать как локальную или объектовую ПТС, которая включает в себя промышленный объект – ОУХО и прилегающую к нему территорию. Границей этой территории является периметр так называемой «зоны защитных мероприятий» (Постановление Правительства РФ от 5 декабря 2005 г. № 734), площадь которой вы-

брана исходя из расчета территории потенциального совокупного ущерба при возникновении нештатной ситуации на объекте.

Зона защитных мероприятий и расположение точек пробоотбора почвы с их нумерацией приведены на рис. 1. Логика построения сети пунктов наблюдения состояла в формировании трех концентрических окружностей, внутренняя из которых соответствовала границе санитарно-защитной зоны ОУХО, а внешняя – границе зоны защитных мероприятий. Нарушение регулярности расположения точек пробоотбора (отклонение от окружностей) связано с выявленной при рекогносцировке на местности физической недоступности ряда точек.

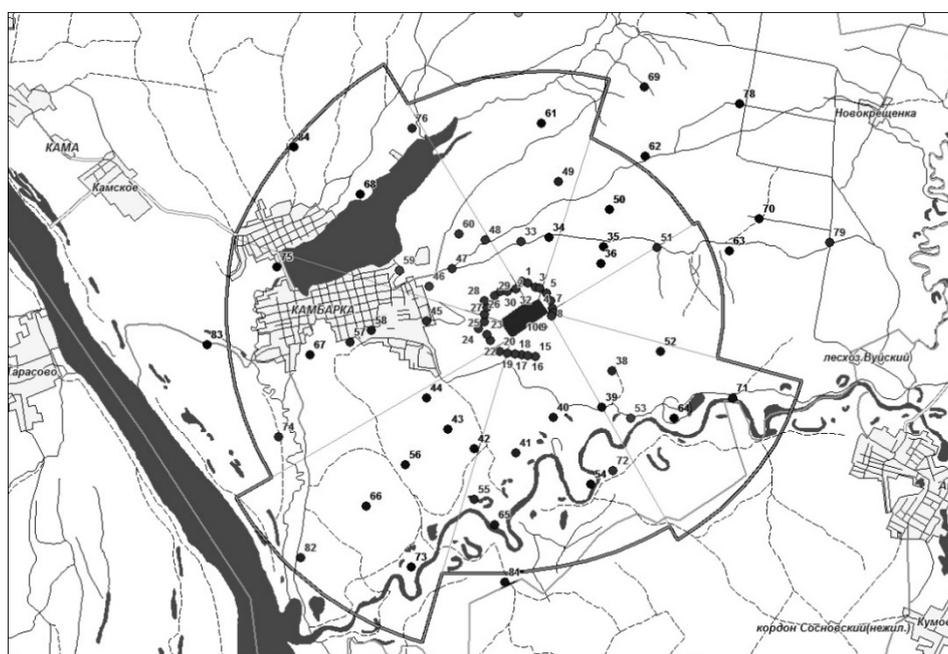


Рис. 1. Границы зоны защитных мероприятий и точки пробоотбора

Fig. 1. Boundaries of the zone of protective measures and sampling points

Как отмечено выше, в настоящее время для оценки уровня загрязнения почвенного покрова рекомендован так называемый «суммарный показатель химического загрязнения»  $Z_c$  (методические указания МУ 2.1.7.730-99):

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_{\phi_i} - (n - 1), \quad (2)$$

где  $K_{\phi_i}$  определяется по формуле (1), а  $n$  – число контролируемых показателей (загрязнителей).

В пробах, отобранных в каждой точке, определялись концентрации 15 веществ и параметров: люизит; мышьяк; хром; стронций; свинец; цинк; медь; никель; железа оксид; марганца оксид; ванадий; титана оксид; хлорид-ион; водородный показатель.

В 2004 году до начала пуска ОУХО в эксплуатацию проведен первый пробоотбор в 70 точках с целью определения условно фоновых концентраций перечисленных выше веществ. Таким образом, массив данных мониторинга представляет собой таблицу, состоящую из 70 строк и 15 столбцов.

В таблице в качестве примера приведены значения коэффициентов парной корреляции концентраций ряда веществ-загрязнителей почвы, определенных в процессе пробоотбора в 2004 году. Жирным шрифтом обозначены величины коэффициентов корреляции, превышающие значение 0,5. Как следует из таблицы, имеется значительное количество веществ, значения концентраций которых имеют весьма высокий коэффициент парной корреляции.

**Коэффициенты парной корреляции загрязняющих веществ****Coefficients of paired correlation of pollutants**

Переменные	Cl Ion	As	Sr	Zn	Cu	Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Cr	V	TiO <sub>2</sub>
Cl Ion	1	-0,026	-0,087	0,029	0,064	0,032	-0,021	0,044	0,063	0,031	0,025
As	-0,026	1	0,203	-0,303	-0,328	-0,431	-0,442	-0,333	-0,093	-0,490	-0,446
Sr	-0,087	0,203	1	<b>-0,501</b>	<b>-0,579</b>	-0,479	<b>-0,543</b>	-0,437	-0,040	<b>-0,513</b>	-0,482
Zn	0,029	-0,303	<b>-0,501</b>	1	<b>0,572</b>	<b>0,753</b>	<b>0,787</b>	<b>0,501</b>	0,302	<b>0,704</b>	<b>0,624</b>
Cu	0,064	-0,328	<b>-0,579</b>	<b>0,572</b>	1	<b>0,793</b>	<b>0,666</b>	0,369	0,227	<b>0,713</b>	<b>0,622</b>
Ni	0,032	-0,431	-0,479	<b>0,753</b>	<b>0,793</b>	1	<b>0,847</b>	0,404	0,489	<b>0,917</b>	<b>0,819</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,021	-0,442	<b>-0,543</b>	<b>0,787</b>	<b>0,666</b>	<b>0,847</b>	1	<b>0,654</b>	0,434	<b>0,867</b>	<b>0,820</b>
MnO	0,044	-0,333	-0,437	<b>0,501</b>	0,369	0,404	<b>0,654</b>	1	0,139	0,435	0,496
Cr	0,063	-0,093	-0,040	0,302	0,227	0,489	0,434	0,139	1	<b>0,531</b>	0,497
V	0,031	-0,490	<b>-0,513</b>	<b>0,704</b>	<b>0,713</b>	<b>0,917</b>	<b>0,867</b>	0,435	<b>0,531</b>	1	<b>0,940</b>
TiO <sub>2</sub>	0,025	-0,446	-0,482	<b>0,624</b>	<b>0,622</b>	<b>0,819</b>	<b>0,820</b>	0,496	0,497	<b>0,940</b>	1

Таким образом, для повышения информативности оценки загрязнения почвы необходимо осуществить декорреляцию исходных данных и выявить действительные факторы, определяющие уровень загрязнения территории.

Среди классических методов многомерного анализа применительно к рассматриваемому примеру и, в целом, к задачам экологического мониторинга наиболее используемым методом получения некоррелированных данных и снижения размерности их массивов является метод главных компонент (МГК) [8, 9]. Несмотря на длительную историю этого метода, в настоящее время он широко используется как эффективный инструмент разведочного анализа данных, включая анализ данных экологического мониторинга [10–14].

МГК базируется на замене коррелированных показателей их линейно агрегированными комплексами – главными компонентами. Последние отражают внутреннюю структуру массива исходных данных и позволяют минимизировать его размерность с сохранением заданного уровня информативности.

Исходные данные для МГК были подготовлены следующим образом. Из массива данных исключены вещества, концентрации которых оказались меньше предела обнаружения используемых методик количественного химического анализа (КХА). Выявлены чрезвычайно высокие и низкие концентрации (выбросы) отдельных веществ. Установлено отсутствие повторяемости указанных выбросов в последующие годы наблюдений, на основании чего они заменены на значения третьего квартиля (для чрезвычайно высоких значений) и первого квартиля (для чрезвычайно низких) выборки по каждому веществу. Кроме того, выборки концентраций веществ центрировались и нормировались на среднеквадратическое отклонение.

С учетом xls-формата массива исходных данных для МГК использовался программный пакет XLSTAT [15]. Применение МГК показало, что в соответствии с критерием «каменистой осыпи» 88 % всей изменчивости исходного массива данных описывается тремя первыми главными компонентами  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , что с учетом погрешности самих методов КХА является вполне удовлетворительным для использования в дальнейшем анализе.

Следует отметить, что главные компоненты являются линейными функциями исходных показателей загрязнения, поэтому восстановление последних по известным  $F_i$  не представляет больших сложностей. При этом погрешность между расчетными (восстановленными) и исходными показателями можно регулировать за счет количества учитываемых главных компонент.

Результаты МГК показали, что  $F_1$  ассоциируется со всеми металлами и их оксидами, за исключением мышьяка. Большая доля этого элемента приходится на  $F_3$ , оставшиеся доли мышьяка и хрома «забирает» на себя  $F_2$ . Причины подобного распределения загрязняющих веществ по главным компонентам на исследуемой территории являются предметом отдельного исследования.

Таким образом, применение МГК позволило уменьшить число переменных с 11 (с учетом исключенных веществ) до 3 с сохранением высокой доли информативности.

Не менее важным результатом использования метода является переход к ортогональному базису, направления осей которого задаются некоррелированными главными компонентами  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ . В указанном базисе каждой точке наблюдения соответствуют отрезки  $F_{ij}$  на осях главных компонент, где  $i$  – порядковый номер оси (главной компоненты),  $j$  – номер точки наблюдения. Это обстоятельство открывает воз-

возможность использования главных компонент как исходных параметров при построении интегральных критериев оценки. Один из вариантов подобного построения изложен ниже.

Возможность интерпретации значений главных компонент как координат конкретной точки наблюдения в ортогональном, в общем случае многомерном, базисе позволяет построить вектор, начало которого находится в нулевой точке базиса, а конец – в точке с координатами  $F_{ij}$ . Этот вектор здесь и далее обозначается как вектор загрязнения  $\mathbf{Pv}$  (pollution vector). В случае многомерного пространства главных компонент вектор загрязнения в точке  $j$  определяется следующим образом:

$$\mathbf{PV}_j = \mathbf{PV}(F_{1j}, F_{2j}, F_{3j}, \dots, F_{nj}), \quad (3)$$

где  $n$  – число используемых главных компонент.

Указанный подход позволяет осуществить снижение размерности исходного массива данных без потери информативности до одного

векторного параметра, который можно рассматривать как интегральную характеристику уровня загрязнения в каждой точке наблюдения на исследуемой территории.

Распределение модуля вектора  $\mathbf{Pv}$ , рассчитанного по результатам МГК, по территории пробоотбора в 2004 году показано на рис. 2. Для каждой точки пробоотбора с координатами  $x_j$  и  $y_j$  по величинам  $F_{1j}$ ,  $F_{2j}$  и  $F_{3j}$ , как проекциям на ортогональные оси, вычислялся модуль безразмерного (с учетом стандартизации исходных показателей) вектора  $\mathbf{Pv}$ . Далее, на основе программного пакета SURFER [16], проводилась интерполяция значений вектора (методом кригинга) и формировался сеточный файл, на основе которого построена 3D-поверхность  $Pv = f(x, y)$ . Указанная поверхность является интегральной характеристикой условно фонового (до начала эксплуатации ОУХО) загрязнения территории зоны защитных мероприятий.

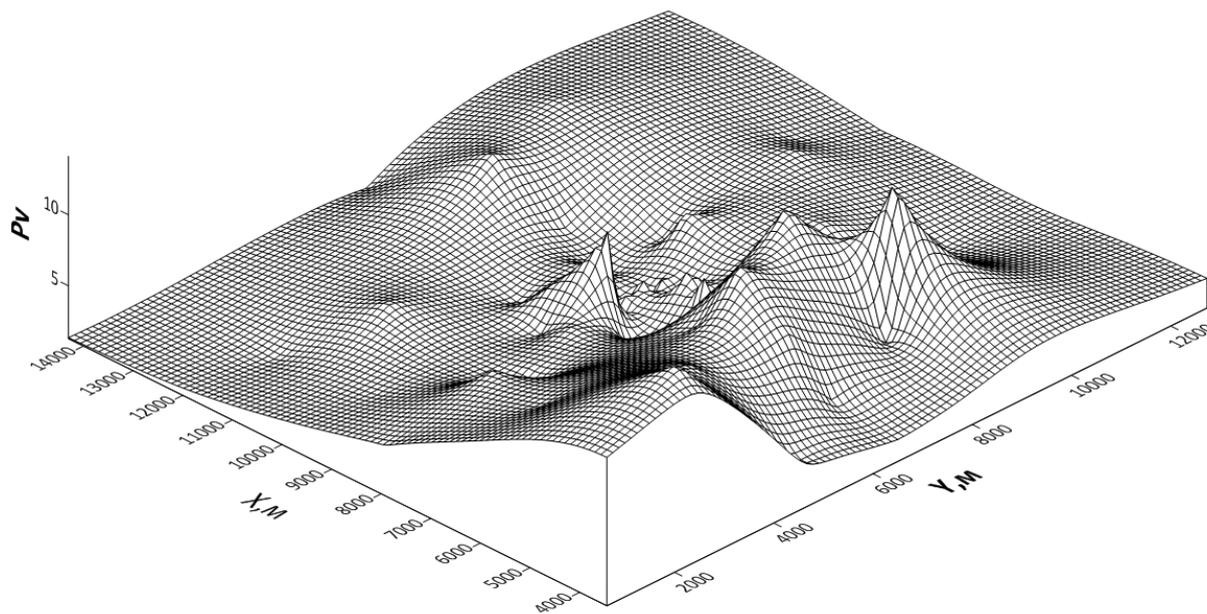


Рис. 2. Поверхность модуля вектора  $\mathbf{Pv}$  (2004)

Fig. 2. Surface of the  $\mathbf{Pv}$  vector module (2004)

Вектор загрязнения является универсальным параметром: изменение его модуля как инвариантной характеристики может служить индикатором направленности процесса загрязнения (рост или снижение). Оценка тенденции может быть осуществлена путем сравнения текущего значения  $\mathbf{Pv}$  в некоторой точке и его начального (условно фонового) значения  $\mathbf{Pv}_0$ . При этом для корректного сравнения при неколлинеарности

указанных векторов необходимо использовать величину проекции  $\mathbf{Pv}$  на  $\mathbf{Pv}_0$ .

Оценка изменения интегрального загрязнения почвы может проводиться путем сравнения поверхностей  $Pv = f(x, y)$  в различные периоды времени. В качестве примера на рис. 3 приведена поверхность вектора загрязнения почвы на исследуемой территории в 2009 году.

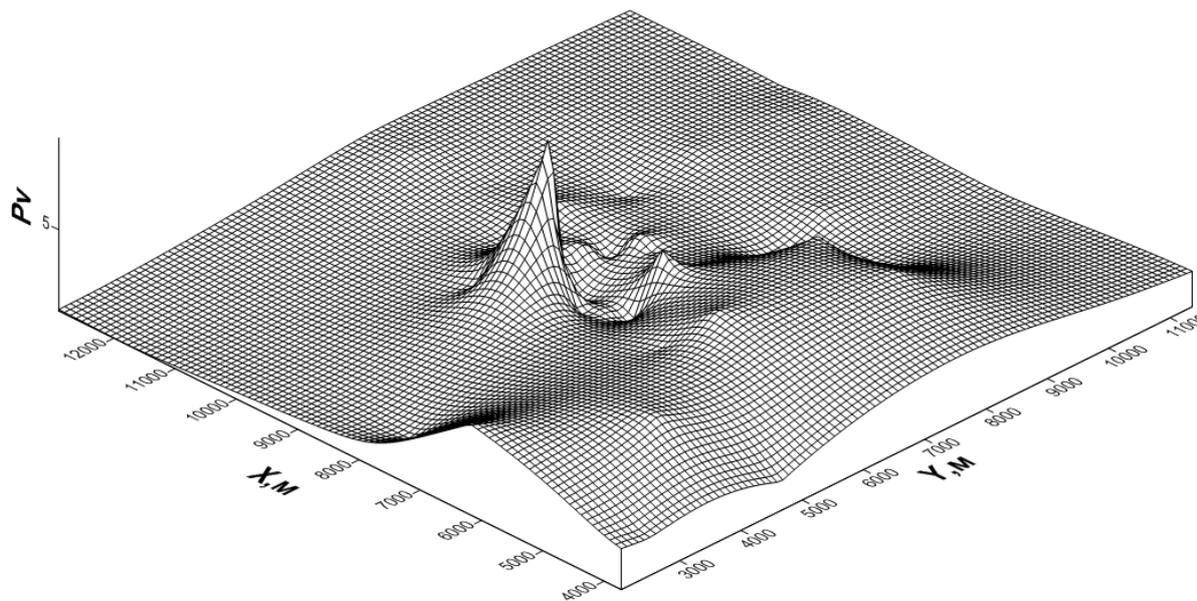


Рис. 3. Поверхность модуля вектора  $P_v$  (2009)

Fig. 3. Surface of the  $P_v$  vector module (2009)

Сравнение рис. 2 и 3 показывает изменение «рельефа» поверхности  $P_v$ , что свидетельствует о перераспределении общего загрязнения по территории. Вместе с тем максимальные значения вектора загрязнений практически не увеличились, что свидетельствует о слабой интенсивности негативного воздействия ОУХО на окружающую среду за пределами санитарно-защитной зоны. Что касается уменьшения значения  $P_v$  в ряде точек по сравнению с условно фоновым, то в значительной степени этот результат связан с процессами трансформации и, в частности, с периодическим вымыванием растворимых форм металлов, накопленных в почве, во время интенсивных атмосферных осадков. Применительно к арсениду натрия этот эффект в районе ОУХО детально исследован в [17].

Другой вариант оценки загрязнения окружающей среды в точке территории возможен при введении понятия «предельной поверхности» или «поверхности критических загрязнений». В трехмерном пространстве главных компонент эта поверхность может быть представлена эллипсоидом, полуосями которого являются критические (предельные) значения  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ . Последние могут быть определены как линейные комбинации, например, предельно допустимых или ориентировочно допустимых концентраций загрязняющих веществ, входящих в перечень контролируемых. При этом оценка уровня загрязнения в точке осуществляется путем сравнения модуля вектора  $P_v$  с дли-

ной этого же вектора, продленного до пересечения с поверхностью эллипсоида критических загрязнений. Изложенный подход может быть распространен и на многомерный случай, однако без возможности визуализации.

Следует отметить перспективность интегрального параметра в виде вектора загрязнения при прогнозировании загрязнения территории на основе использования нейронных сетей [18–20]. Возможность представления прогнозируемого параметра в виде  $P_v$  позволяет существенно упростить структуру нейросети за счет использования лишь одного нейрона в выходном слое.

В качестве иллюстрации такой возможности выбран простейший классический перцептрон с одним скрытым слоем. Входными параметрами сети являются координаты  $x_j$  и  $y_j$  точек наблюдения (пробоотбора), а также водородный показатель pH почвы. Учет последнего необходим, поскольку pH является важным параметром, от величины которого зависит содержание растворимых форм веществ и соединений в почве. Выходным параметром сети является вектор загрязнения  $P_v$ .

Нейронная сеть была обучена на данных мониторинга 2004 года с использованием программы NeuroExcel [21]. Для прогнозирования вектора загрязнения в точках территории с целью тестирования нейросети выбран 2009 год, соответствующий завершению эксплуатации ОУХО. На рис. 4 показаны значения вектора загрязнения  $P_{v_n}$  в точках наблюдения 2009 года,

полученные на основе обученной ранее нейросети. Для сравнения на этом же рисунке показан вектор загрязнения, определенный с помощью

метода главных компонент непосредственно по данным мониторинга 2009 года –  $Pv_m$ .

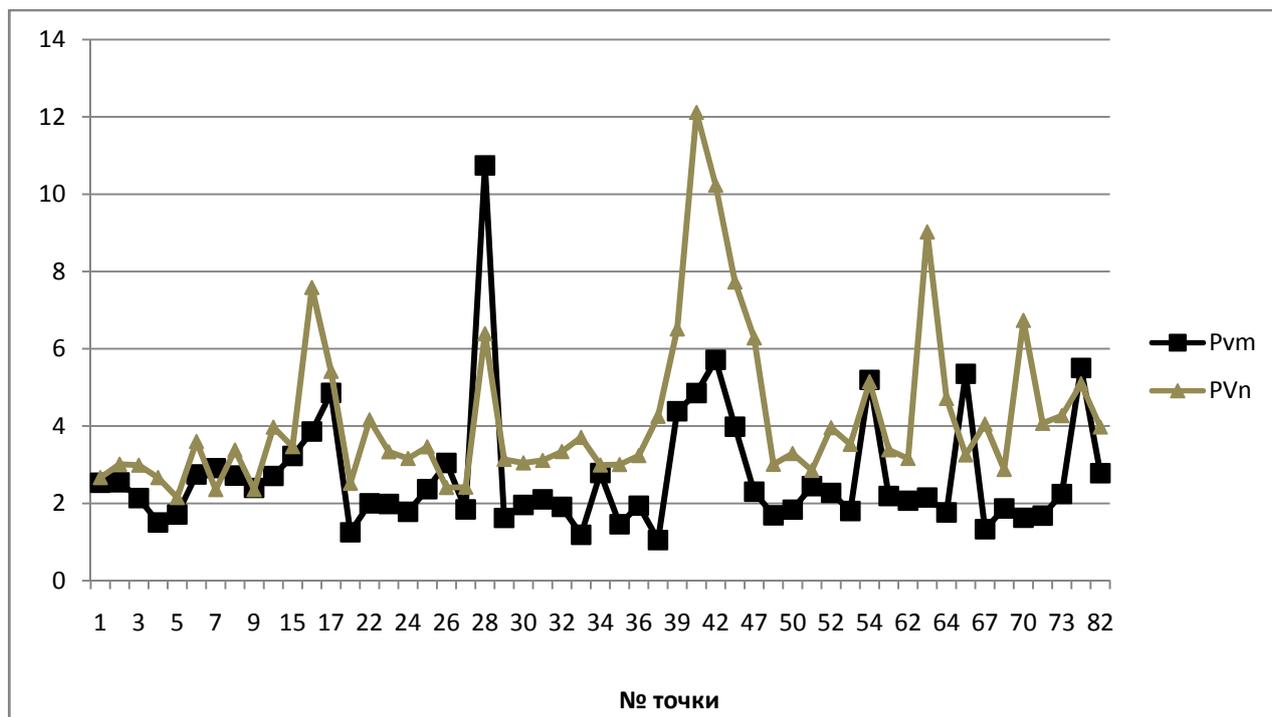


Рис. 4. Сравнение векторов  $Pv_m$  и  $Pv_n$  в точках наблюдения

Fig. 4. Comparison of  $Pv_m$  and  $Pv_n$  vectors at observation points

Как следует из рисунка, несмотря на существенную нерегулярность поверхности  $Pv$  (рис. 2, 3), простейшая нейросеть с 19 нейронами в скрытом слое позволяет получить достаточно удовлетворительный прогноз изменения вектора загрязнения в точках наблюдения.

#### Выводы и заключение

Выявление главных факторов (компонент), определяющих уровень загрязнения в исследуемой точке, повышает обоснованность и информативность оценки экологического состояния по сравнению с используемыми в настоящее время скалярными критериями. Вектор загрязнения, как функция главных компонент, позволяет осуществить интегральную оценку загрязнения территории на основе обобщения данных экологического мониторинга без потери информативности.

Важно отметить, что загрязнение окружающей среды на территории ПТС является лишь начальным результатом негативного воздействия со стороны техногенной составляющей системы. В дальнейшем содержащиеся в воздухе, воде, почве вредные примеси в той или иной форме попадают в объекты живой природы и распространяются далее по пищевым цепоч-

кам. В конечном счете это приводит к негативным изменениям в самих экосистемах на территории ПТС. Для количественного описания этих изменений используются растения и животные в качестве биоиндикаторов, сигнализирующих о деградации экосистем уже на ранней стадии этого процесса [22]. Использование биоиндикации резко снижает затраты на мониторинг ПТС, но, как правило, оставляет открытым вопрос об источнике выявленной реакции организмов-сенсоров. В этой ситуации вектор загрязнения удобно использовать при исследовании корреляции между загрязнением окружающей среды и реакцией биоты. Наличие указанной корреляции может существенно упростить формирование эффективной системы экологического мониторинга ПТС.

#### Библиографические ссылки

1. Исаев С. В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 105–113.
2. Шаповалов Р. В. Переход от технических к природно-техническим системам // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 2. С. 43–46.

3. Ашихмина Т. Я. Комплексный экологический мониторинг объектов хранения и уничтожения химического оружия: монография. Киров : Вятка, 2002. 544 с.

4. Экологический мониторинг опасных производственных объектов: опыт создания и перспективы развития (на примере систем экологического контроля и мониторинга объектов по уничтожению химического оружия) : монография / под общ. ред. проф. В. Н. Чуписа. М. : Научная книга, 2010. 526 с.

5. Комплексный экологический мониторинг в районах расположения опасных промышленных объектов, системы экологического мониторинга объектов по уничтожению химического оружия и атомных электростанций : монография / под общ. ред. проф. В. Н. Чуписа. М. : Научная книга, 2014. 528 с.

6. UkJae L., Chanki L., Minji K., Hee Reyoung K. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region // Nuclear Engineering and Technology. 51(2019). S. 1626-1632.

7. Narottam S., Safiur M. Multivariate statistical analysis of metal contamination in surface water around Dhaka export processing industrial zone. Bangladesh // Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management. 10(2018). S.206-211.

8. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ / пер. с англ. М. : Мир, 1982. 302 с.

9. Большаков А. А., Каримов Р. Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов : учебное пособие для вузов. М. : Горячая-линия-Телеком, 2015. 552 с.

10. Сердюцкая Л. Ф., Яцишин А. В. Техногенная экология: Математико-картографическое моделирование. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 232 с.

11. Шитиков В. К., Зинченко Т. Д. Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С. 5–11.

12. Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Костина Н. В. Методы синтетического картографирования (на примере эколого-информационной системы 'region-volgabas'). URL: [http://www.ecograde.bio.msu.ru/library/books/\\_pdf\\_rosenberg/3-2.pdf](http://www.ecograde.bio.msu.ru/library/books/_pdf_rosenberg/3-2.pdf).

13. Комарова А. Ф., Журавлева И. В., Яблоков В. М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Принципы экологии. 2016. № 1. С. 40–71.

14. Кургузкин М. Г., Корепанов М. А., Тенев В. А. Использование методов многомерного анализа для обработки результатов экологического мониторинга объекта по уничтожению химического оружия // Экология урбанизированных территорий. 2009. № 3. С. 96–101.

15. Анализ основных компонентов (PCA) в Excel. URL: <http://www.help.xlstat.com>.

16. Мальцев К. А., Мухарамова С. С. Построение моделей пространственных переменных (с приме-

нием пакета Surfer) : учеб. пособие. Казань : Казанский университет, 2014. 103 с.

17. Петров В. Г., Шумилова М. А. Поведение арсенита натрия в почвах Удмуртии. Ижевск : Изд-во Института механики УрО РАН, 2016. 176 с.

18. Потылицина Е. Н., Литинский Л. В., Сугак Е. В. Использование искусственных нейронных сетей для решения прикладных экологических задач // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=9779>.

19. Мантула Е. В. Прогнозирующая нейронная сеть с переменной структурой для контроля показателей загрязнения окружающей среды // Бионика интеллекта. 2013. № 1 (80). С. 112–116.

20. Создание «цифровых двойников» в рамках цифровой трансформации экологического мониторинга / С. В. Валиев, Д. В. Иванов, Д. Е. Шамаев, Р. Р. Хасанов // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 3. С. 29–33.

21. Описание программы NeuroExcel. URL: <http://www.neurotechlab.ru>.

22. Биоиндикаторы и биотестсистемы в оценке окружающей среды техногенных территорий: монография / под общ. ред. Т. Я. Ашихминой и Н. М. Алапкиной. Киров : О-краткое, 2008. 208 с.

## References

1. Isayev S.V. [The Concept of Natural-Engineering Systems, and Its Use in Studying the Anthropogenic Transformation of Natural Environment]. *Geograficheskii vestnik*. 2016. No. 3. Pp. 105-113 (in Russ.).

2. Sharapov R.V. [Switch from Engineering Systems to Natural-Engineering Systems]. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2012. No. 2. Pp. 43-46 (in Russ.).

3. Ashikhmina T.Ya. *Kompleksnyi ekologicheskii monitoring ob"ektov khraneniya i unichtozheniya khimicheskogo oruzhiya: monografiya* [Comprehensive Ecological Monitoring of Chemical Weapons Storage and Destruction Facilities. Monograph]. Kirov: Vyatka Publ., 2002. 544 p. (in Russ.).

4. *Ekologicheskii monitoring opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov: opyt sozdaniya i perspektivy razvitiya (na primere sistem ekologicheskogo kontrolya i monitoringa ob"ektov po unichtozheniyu khimicheskogo oruzhiya) : monografiya* [Ecological Monitoring of Hazardous Production Facilities: Experience of Creation and Prospects of Evolution (Exemplified by the Systems of Environmental Control and Monitoring of Chemical Weapons Destruction Facilities): Monograph]. Moscow: Nauchnaya kniga Publ., 2010. 526 p. (in Russ.).

5. *Kompleksnyi ekologicheskii monitoring v raionakh raspolozheniya opasnykh promyshlennykh ob"ektov, sistemy ekologicheskogo monitoringa ob"ektov po unichtozheniyu khimicheskogo oruzhiya i atomnykh elektrostantsii : monografiya* [Comprehensive Ecological Monitoring in the Locations of Hazardous Production Facilities, Systems of Ecological Monitoring of Chemical Weapons Destruction Facilities and Nuclear Power

Plants: Monograph]. Moscow: Nauchnaya kniga Publ., 2014. 528 p. (in Russ.).

6. UkJae L., Chanki L., Minji K., Hee Reyounk K. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region // Nuclear Engineering and Technology. 51(2019). P. 1626-1632.

7. Narottam S., Safiur M. Multivariate statistical analysis of metal contamination in surface water around Dhaka export processing industrial zone. Bangladesh // Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management. 10(2018). P. 206-211.

8. Afifi A., Azen S. *Statisticheskii analiz. Podkhod s ispol'zovaniem EVM* [Statistical Analysis. A Computer-Oriented Approach]. Moscow: Mir Publ., 1982. 302 p. (in Russ.).

9. Bolshakov A.A., Karimov R.N. *Metody obrabotki mnogomernykh dannyykh i vremennykh ryadov* [Multivariable Data and Time Series Processing Methods: Learning Guide for Higher Education Institutions]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2015. 552 p. (in Russ.).

10. Serdyutskaya L.F., Yatsishin A.V. *Tekhnogennaya ekologiya: Matematiko-kartograficheskoe modelirovanie* [Technogenic Ecology: Mathematical and Mapping Simulation]. Moscow: Knizhny dom LIBROKOM, 2009. 232 p. (in Russ.).

11. Shitikov V.K., Zinchenko T.D. [Multidimensional Statistical Analysis of Ecological Communities (Review)]. Theoretical Problems of Ecology. 2019. No. 1. Pp. 5-11 (in Russ.).

12. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Kostina N.V. *Metody sinteticheskogo kartografirovaniya (na primere ekologo-informatsionnoi sistemy 'region-volgabas')* [Synthetical Mapping Techniques (Exemplified by Ecological Information System 'region-volgabas')]. Available at: [http://www.ecograde.bio.msu.ru/library/books/\\_pdf\\_rozenberg/3-2.pdf](http://www.ecograde.bio.msu.ru/library/books/_pdf_rozenberg/3-2.pdf).

13. Komarova A.F., Zhuravlyova I.V., Yablokov V.M. [Open Multispectral Data and Basic Techniques of Remote Sensing in Studies of the Vegetation Cover] // Principles of Ecology. 2016. No. 1. Pp. 40-71 (in Russ.).

14. Kurguzkin M.G., Korepanov M.A., Tenenyov V.A. [Use of Multidimensional Analysis Techniques for Processing the Results of Chemical Weapons Destruction Facility Ecological Monitoring]. Ecology of Urbanized Territories. 2009. No. 3. Pp. 96-101 (in Russ.).

15. *Analiz osnovnykh komponentov (RSA) v Excel* [Analysis of the main components (PCA) in Excel]. Available at: <http://www.help.xlstat.com>.

16. Maltsev K.A., Muharomova S.S. *Postroenie modelei prostranstvennykh peremennykh (s primeneniem paketa Surfer)* [Building models of spatial variables (using the Surfer package)]. Kazan: Kazan University, 2014. 103 p. (in Russ.).

17. Petrov V.G., Shumilova M.A. *Povedenie arsenita natriya v pochvakh Udmurtii* [Behavior of sodium arsenite in Udmurtia soils. Izhevsk]: Publishing House of the Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016. 176 p. (in Russ.).

18. Potylitsina Ye.N., Lipinsky L.V., Sugak Ye.V. [Use of Artificial Neural Networks for Solving the Applied Ecological Problems]. Contemporary Scientific and Educational Issues. 2013. No. 4. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=9779> (in Russ.).

19. Mantula Ye.V. [Predictive Neural Variable-Structure Network for Monitoring of Environmental Pollution Indicators]. Bionics of Intellect. 2013. No. 1. Pp. 112-116 (in Russ.).

20. Valiyev S.V., Ivanov D.V., Shamayev D.Ye., Khasanov R.R. [Creation of 'Digital Duplicates' within Digital Transformation of Ecological Monitoring]. Russian Magazine of Applied Ecology. 2022. No. 3. Pp. 29-33 (in Russ.).

21. *Opisanie programmy NeuroExcel* [Description of NeuroExcel software tool]. Available at: <http://www.neurotechlab.ru>.

22. *Bioindikatory i biotestsistemy v otsenke okruzhayushchei sredy tekhnogennykh territorii* [Bioindicators and Biotest Systems in Environmental Assessment of Technogenic Territories Monograph]. Kirov: O-kratkoye Puble, 2008. 208 p. (in Russ.).

\*\*\*

### Vectorial-Criterion-Based Assessment of Ecological State of the Natural-Engineering System

M. G. Kurguzkin, PhD in Engineering, Assistant Professor, AI Directorate of the Ministry of Natural Resources of the Udmurt Republic, Izhevsk, Russia

P. M. Kurguzkin, Postgraduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*The article deals with the issues of assessing the ecological state of the territory of natural-engineering systems as the critical indicator of their stability. A brief analysis of the natural environment pollution assessment criteria based upon the scalar convolutions of ecological monitoring data arrays is provided. It is stated that neglecting mutual correlation of the pollution indicators being measured in the course of ecological monitoring reduced informative value of the mentioned criteria. Instructional aspects of plotting the territory pollution assessment criterion based upon dimension reduction and de-correlation of the ecological monitoring data array is presented. The results of monitoring the soil mantle pollution at the territory of the local natural-engineering system comprising the chemical weapons destruction facility and the natural environment within the boundaries of the protective action zone are taken as the example. The results of use of the Principal Components Analysis for dimension reduction and de-correlation of the monitoring data array are presented. The possibility of substituting three principal components for eleven pollution indicators without sacrificing the acceptable informative value of description is presented. Switch to orthogonal basis*

*in the principal components' space allows reviewing the values of the latter at the point as the projection in general case of a multi-dimensional vector which is called the damage vector and can be used as the integrated indicator of pollution. The options of pollution assessment on the basis of comparison of the current and initial moduli of the pollution vector as well as with the use of the surface of critical pollutions is considered. The possibility to simplify the structure of neural networks for forecasting the pollution degree by means of the neural network's single output parameter in the form of the pollution vector is provided. The example of using the neural network trained on the soil mantle background monitoring data for forecasting the current soil pollution at the points of the protective action zone is provided. A perceptron having one hidden layer describes satisfactorily the distribution of the pollution vector over the territory five years after the man-made facility has been commissioned is demonstrated.*

**Keywords:** natural-engineering system, ecological monitoring, pollution assessment criteria, correlation of pollution indicators, principal components analysis, pollution vectorial criterion, neural networks.

Получено: 02.02.23

#### Образец цитирования

Кургузкин М. Г., Кургузкин П. М. Оценка экологического состояния природно-технической системы на основе векторного критерия // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 115–124. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-115-124.

#### For Citation

Kurguzkin M.G., Kurguzkin P.M. [Vectorial-criterion-based assessment of ecological state of the natural-engineering system]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 115-124 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-115-124.