

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАНЫ

УДК 623.41

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ РАЙОНА ЭКСПЛУАТАЦИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО ВООРУЖЕНИЯ

В.Ю. Ключников
(ФГУП ЦНИИмаш)
Н.В. Радионов

(Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского)

Ставится проблема экологического зонирования района эксплуатации ракетно-космического вооружения (РКВ) и предлагается методология её решения. Экологическое зонирование района эксплуатации РКВ позволяет обосновать и ограничить область наблюдений за воздействием РКВ на окружающую среду.

Ключевые слова: экологическое зонирование, окружающая среда, биотоп.

Основным объектом изучения в прикладной экологии является экологическая система – совокупность сообщества живых организмов (биоценоз), среды их обитания (биотоп) и системы связей, осуществляющей обмен веществом, энергией и информацией между ними. Главный вопрос, возникающий при изучении экосистем, а также при организации промышленного мониторинга воздействия какого-либо техногенного объекта на окружающую среду – обоснованное ограничение наблюдаемой (исследуемой) области. Для этого необходимо проводить экологическое зонирование, результатом которого должна быть «мозаика» минимальных биогеографических областей (биотопов) с однородными компонентами окружающей среды и одинаковым видовым составом живых организмов. Среди такой мозаики может быть выбран некоторый индикаторный биотоп и использован в дальнейшем для экосистемного биологического мониторинга.

Размеры района эксплуатации ракетно-космического вооружения (РКВ) достигают нескольких тысяч кв. км (район падения отделяющихся частей ракет, космодром). По этой причине экологическое зонирование района эксплуатации РКВ является особенно актуальным. Однако вплоть до последнего времени такое зонирование не проводилось. Контрольные точки при осуществлении экологического мониторинга воздействия РКВ на окружающую среду выбирались на интуитивно-логическом уровне.

Задача автоматизированного экологического зонирования района эксплуатации РКВ относится к задаче типологической классификации многомерных данных и может быть поставлена следующим образом [1].

Пусть классифицируемые объекты образуют множество $O = \{O_1, \dots, O_N\}$, где O_i – i -й объект;

N – количество объектов.

Целью классификации является получение некоторого заранее заданного количества групп объектов (классов объектов). В пределах каждого класса объекты должны быть максимально «похожи» друг на друга в некотором смысле однородны, а объекты из разных классов – максимально «отличаться».

Будем называть j -м классом подмножество объектов

$$S_j = \{O_{ij} \in O \mid j \in 1, \dots, N\} \subset O, \quad (1)$$

где $N_j = |S_j| \leq N$ – количество объектов j -го класса (мощность j -го класса). Под системой классов, получение которой является целью классификации, будем понимать множество S со следующими свойствами: $S = \{S_i \mid i \in 1, \dots, K\}$ т. е. S состоит из K классов: $S_i \cap S_j = \emptyset \forall i, j \in \{1, \dots, K\}$; $|S_i| > 0 \forall i \in \{1, \dots, K\}$; $\bigcup_{i=1}^K S_i = O$, $\bigcup_{i=1}^K N_i = N$.

Обозначим систему биотопов, которую нужно получить в результате экологического зонирования, и биотоп, соответственно, символами S и S_i , имея в виду, что если $S_i = \{O_{ij} \in O \mid j \in 1, \dots, N\}$, то $\forall O_{ij} \in S_i \exists O_{it} \in S_i; g(O_{ij}, O_{it}) = 1$, где $j, t \in 1, \dots, N$; g – географическое расстояние типа смежности.

В такой постановке для решения задачи экологического зонирования целесообразно использовать «ядерные» методы классификации, которые нацелены на выявление «сгущений» (ядер) объектов в признаковом пространстве.

В общем случае под ядром класса подразумевается некоторый объективно существующий или условный, наиболее типичный объект, весь комплекс характеристик которого является эталоном данного класса. В алгоритме, основанном на опи-

сании классов ядрами, целесообразно использовать процедуру классификации объектов по принадлежности к ядрам по критерию минимума расстояния между объектами в признаковом пространстве. Для этого необходимо:

- задаться метрикой d ;
- найти ядра классов $C_1, \dots, C_k, C_i = (C_i^{(1)}, \dots, C_i^{(M)})$, $i \in \{1, \dots, K\}$;
- отнести все объекты к найденным ядрам C_1, \dots, C_k по критерию минимума расстояния между ними:

$$O_i \in S_i \Leftrightarrow d(O_i, C_i) \leq d(O_i, C_j) \forall i, j \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, N\},$$

сформировав систему классов $S = \{S_1, \dots, S_k\}$.

Ядра C_1, \dots, C_k образуют устойчивые группы операционно-территориальных единиц (ОТЕ) [2], в M -мерном признаковом пространстве. В геоинформатике ОТЕ являются объектами классификации и представляют собой ячейки регулярной или нерегулярной сетки, наложенной на исследуемую территорию.

Математическая модель ОТЕ может быть представлена в виде матрицы «объект-признак» («объект-свойство»), отражающей измерение M признаков на N объектах и содержащей N строк и M столбцов:

$$X = \begin{pmatrix} O_1 \\ \dots \\ O_N \end{pmatrix} = (O^{(1)}, \dots, O^{(M)}) = \begin{pmatrix} O_1^{(1)} & \dots & O_1^{(j)} & \dots & O_1^{(M)} \\ O_2^{(1)} & \dots & O_2^{(j)} & \dots & O_2^{(M)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ O_{N-1}^{(1)} & \dots & O_{N-1}^{(j)} & \dots & O_{N-1}^{(M)} \\ O_N^{(1)} & \dots & O_N^{(j)} & \dots & O_N^{(M)} \end{pmatrix},$$

где $O_i = (O_i^{(1)}, \dots, O_i^{(M)})$ – i -й объект в M -мерном пространстве признаков; $O^{(j)}$ – j -й признак; $O^{(j)} = (O_1^{(j)}, \dots, O_N^{(j)})$; $O_i^{(j)}$ – значение j -го признака на i -м объекте, $i \in \{1, \dots, N\}$, $j \in \{1, \dots, M\}$ или в виде матрицы «объект-объект», отражающей результат сопоставления объектов в признаковом пространстве между собой и содержащей по N строк и столбцов:

$$X = \begin{pmatrix} O_1 \\ \dots \\ O_N \end{pmatrix} = (O^{(1)}, \dots, O^{(M)}) = \begin{pmatrix} O_1^{(1)} & \dots & O_1^{(j)} & \dots & O_1^{(M)} \\ O_2^{(1)} & \dots & O_2^{(j)} & \dots & O_2^{(M)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ O_{N-1}^{(1)} & \dots & O_{N-1}^{(j)} & \dots & O_{N-1}^{(M)} \\ O_N^{(1)} & \dots & O_N^{(j)} & \dots & O_N^{(M)} \end{pmatrix},$$

O_{ij} – результат сопоставления i -го и j -го объектов: $i, j \in \{1, \dots, N\}$.

Обычно O_{ij} означает меру различия (или сходства) объектов. В случае интерпретации O_{ij} как ме-

ры различия матрица «объект – объект» – симметричная с нулями на главной диагонали.

Общая схема алгоритма районирования на основе отнесения ОТЕ к ядрам по критериям смежности и минимум расстояний между объектами выглядит следующим образом.

1. Уточняют область воздействия процессов эксплуатации РКВ на окружающую среду. Область воздействия штатных процессов эксплуатации РКВ на окружающую среду должна быть заведомо избыточна, т. е. при штатной эксплуатации факторы неблагоприятного воздействия РКВ на окружающую среду на границах области влияния должны лежать в допустимых пределах. Гарантией такой избыточности области влияния при предложенном подходе является соответствие СЗЗ (ограждения периметра) требованиям санитарных и строительных правил и норм:

- в том случае, если для района эксплуатации РКВ рассчитана, согласована и утверждена санитарно-защитная зона (СЗЗ), в качестве области воздействия процессов эксплуатации РКВ принимают внешнюю границу СЗЗ [3];

- в противном случае в качестве области воздействия процессов эксплуатации РКВ принимают границу зоны безопасности района эксплуатации РКВ или ограждение периметра.

2. Область воздействия процессов эксплуатации РКВ на окружающую среду разбивают регулярной сетью на квадраты со стороной от 10 – 50 м (в зависимости от площади экосистемы района эксплуатации РКВ);

3. В узлах регулярной сети (в точках наблюдения), на основе анализа данных инвентаризации и таксации, физико-географических и природно-ресурсных карт, данных дистанционного аэрокосмического зондирования области воздействия процессов эксплуатации РКВ, формируют множество значений природных и техногенных признаков зонирования.

4. Задают ядра классов O_{i1}, \dots, O_{iK} , полагая при этом $S_1^j = \{O_{i1}\}, \dots, S_K^j = \{O_{iK}\}$.

5. Получают матрицу близостей ОТЕ-ОТЕ $A = (a_{ij})$ для атрибутивного признакового пространства и матрицу смежности ОТЕ-ОТЕ $G = (g_{ij})$ для географического пространства.

6. Полагают $n = 1$.

7. Пусть на шаге $n \in \{1, \dots, N - K\}$ получены классы S_1^n, \dots, S_K^n . Тогда:

8. Находят $i \in \{1, \dots, N\}, t \in \{1, \dots, K\}: a_{jit} = \min \{a_{jly} | \exists O_x \in S_y : g_{yx} = 1, y \in \{1, \dots, N\}\}$; полагают $\forall i \in \{1, \dots, K\}$

$$S_i^{n+1} = \begin{cases} S_i^n \cup \{O_j\}, & i = t; \\ S_i^n, & i \neq t; \end{cases}$$

полагают $a_{ji} = +\infty$.

9. Если $n = N - K$, то процедура заканчивается, иначе полагают $n = n + 1$ и переходят к шагу 4.

Система классов S биотопов экосистемы района эксплуатации задается в виде [4]: S_1 – критический биотоп – биогеографическая область, структура, видовой состав, история развития и физические компоненты окружающей среды, которые имеют очень важное значение для флоры и фауны; в этой области могут существовать виды, внесённые в Красную книгу; S_2 – редкий биотоп – биотоп, отличающийся высоким видовым разнообразием или существованием редких видов, специфичных или ключевых для данной местности (эндемиков); S_3 – основной биотоп, – тот, который не может быть отнесён ни в одну из названных категорий; S_4 – технотоп, – биогеографическая область, в которой отсутствуют условия для биологического воспроизводства (примерами технотопов в районе эксплуатации РКВ являются участки ландшафтов, откуда был удалён или нарушен верхний слой почвы, а также районы, занятые строительными сооружениями, дорогами, стоянками автомобильной техники и т. д.).

Набор признаков $O^{(i)}$, характеризующих биотопы состоит из двух сегментов:

– *природные признаки*:

$O^{(1)}$ – биомасса, т/га;

$O^{(2)}$ – биопродуктивность, т/га-год;

$O^{(3)}$ – биоразнообразие;

$O^{(4)}$ – высота над уровнем моря, м;

$O^{(5)}$ – уклон, %;

$O^{(6)}$ – заболоченность / обводнённость, %;

$O^{(7)}$ – мощность верхнего слоя почвы, см;

$O^{(8)}$ – плотность верхнего слоя почвы, г/см³;

$O^{(9)}$ – общая порозность верхнего слоя почвы, %;

$O^{(10)}$ – запас гумуса в верхнего слоя почвы, т/га.

– *техногенные признаки*:

$O^{(11)}$ – доля площади, занятая капитальными сооружениями, %;

$O^{(12)}$ – доля площади, занятая дорогами с твёрдым покрытием, %.

$O^{(13)}$ – индекс загрязнения атмосферы (ИЗА);

$O^{(14)}$ – индекс загрязнения вод (ИЗВ);

$O^{(15)}$ – индекс загрязнения почвы тяжёлыми металлами (Zc).

Классификационные ядра биотопов O_{i1}, \dots, O_{iK} определяются начальными значениями признаков O_{i10}, \dots, O_{iK0} и метрикой d .

Следует заметить, что технотопы выделяются на зонированной территории достаточно легко. По-

этому в дальнейшей процедуре зонирования они не участвуют.

Начальные значения признаков $O^{(i)}$, $i = 1, \dots, 15$ зависят от особенностей конкретной биогеографической области и уточняются в процессе экологического зонирования в интерактивном режиме. Их получают на этапе подготовки исходных данных для зонирования. Наиболее исчерпывающими для проведения экологического зонирования района эксплуатации РКВ являются данные инвентаризации и таксации биотопов. В том случае, если инвентаризация и таксация не проводились, можно использовать данные аэрокосмической съёмки. Наконец, в самом крайнем случае можно опираться на предварительно разработанные для каждой биогеографической области таблицы классификационных признаков. Начальные значения признаков должны достоверно принадлежать принятым классам биотопов.

Метрику d для j -го класса целесообразно задать в виде суммы квадратов отклонений i -х текущих значений признаков от заданных начальных значений:

$$d_j = \sum_{i=1}^{n_i} (O_{i0}^j - O_i^j)^2.$$

По сути ядро биотопа j -го класса является кластером. И для формирования ядер могут быть использованы методы кластерного анализа, в частности, метод Варда [5].

Исходными данными для проведения автоматического экологического зонирования являются описания двух типов признаков пространств, в которые помещено исследуемое множество объектов: признакового атрибутивного и географического. Атрибутивное признаковое пространство должно быть представлено матрицами ОТЕ типа «объект – объект» или «объект – признак», географическое – полигональным или точечным слоями векторной карты. Специфика географических классификаций в данном случае такова, что каждый классифицируемый объект имеет уникальный числовой или символьный идентификатор.

Автоматическое экологическое зонирование осуществляется в среде векторной ГИС в 5 этапов:

1. Задание начальных условий зонирования.
2. Идентификация объектов, заключающаяся в установлении взаимно-однозначного соответствия между объектами внешней таблицы атрибутивных признаков анализа и объектами слоя векторной карты.
3. Получение и использование в алгоритме матрицы смежности.

4. Классификация или зонирование.

5. Визуализация и документирование результатов классификации в виде карт и текстовых описаний.

Задав предельные значения d_j^{\max} для каждого j -го класса биотопа, последовательно объединяют в ядро две ближайшие ОТЕ, характеризующиеся минимальным расстоянием в пространстве признаков O_i^j .

Для каждой экосистемы района эксплуатации РКВ при одинаковых максимально допустимых значениях d_j^{\max} существует единственное покрытие из мозаики биотопов и технотопов d_j^{\max} .

Следует заметить, что значения признаков зонирования (исходные данные для районирования) изменяются непрерывно. Исключения (разрывы) могут иметь место в случае сложного ландшафта, например, на границах водных объектов, оврагов, обрывов и т. п. В зависимости от этого границы между соседними биотопами и технотопами определяются более или менее чётко.

Для реализации системы автоматического зонирования необходимы следующие функции ГИС:

- манипуляции слоями векторной карты;
- автоматического расчёта матрицы смежности для точечного или полигонального слоев векторной карты;
- картографической визуализации.

Перечисленные функции могут быть реализованы в среде ГИС-конструкторов (GeoКонструктор, ESRI MapObjects), на внутренних языках ГИС (например VBA в среде ArcView 8.x) или же в среде математических программных продуктов, имеющих модули

картографирования (например Matlab, имеющий картографический модуль Mapping Toolbox).

Предложенный методический аппарат автоматизированного экологического зонирования района эксплуатации РКВ апробировался в ходе экологического сопровождения пусков РН 8К82КМ («Протон-М»), 15А14 («Союз-2») и МБР типа 15А18 при проведении экологического мониторинга и послепусковых обследований стартовых комплексов, боевых стартовых позиций, космодромов, полигонов и районов падения отделяющихся частей ракет. По результатам экологического зонирования выбирались индикаторные биотопы и по их состоянию делались выводы о состоянии экосистем районов эксплуатации РКВ в целом.

Литература

1. Заварзин А. В., Тикунов В. С. Классификации / А. В. Заварзин, В. С. Тикунов // Основы геоинформатики. – М.: Издательство «Академия», 2003. – С. 213 – 248.
2. Количественные методы районирования и классификации / А. М. Трофимов, Я. И. Заботин, М. В. Панасюк [и др.]. – Казань: Издательство Казанского ун-та, 1985. – 120 с.
3. Порядок расчёта санитарно-защитной зоны / В. Ю. Ключников, М. А. Кириченко // Экология производства: научно-производственный журнал. – 2006. – № 8. – С. 32 – 40.
4. Оценка экологического состояния района эксплуатации ракетно-космического вооружения / В. Ю. Ключников, Ю. В. Долина // Двойные технологии. – 2008. – № 2 (43). – С. 51 – 54.
5. Мандель И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.

Поступила в редакцию 18.12.2012

*Валерий Юрьевич Ключников, канд. техн. наук, старший научн. сотрудник,
т. (495) 513-42-08.*

*Николай Васильевич Радионов, д-р эконом. наук, профессор, т. (812) 347-95-22,
e-mail: radionov_nv@mail.ru.*