

Методика математико-картографического моделирования выбора трасс линейных объектов

Technique for mathematical and cartographic modeling of linear object route selection

Осипов / Osipov A.

Алексей Георгиевич

(zoyaks@yandex.ru)

кандидат географических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского»

(ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ,

доцент кафедры картографии.

г. Санкт-Петербург

Левадный / Levadniy Yu.

Юрий Валерьевич

(vka@mil.ru)

кандидат военных наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

начальник кафедры картографии.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: математико-картографическое моделирование – mathematical and cartographic modeling; геоинформационная система – geo-information system; экологические ограничения – environmental limitations; интеллектуальная система – intelligent system.

Методика предназначена для автоматизированного выбора в среде ГИС экологически безопасной и экономически обоснованной трассы прокладки линейного объекта и картографического отображения полученных результатов. В статье раскрыта сущность и сформулированы требования к системе математико-картографического моделирования. Приведены результаты апробации разработанных подходов.

При создании методики использованы следующие методы исследования: ранжирование свойств природной среды по их влиянию на пригодность территории для ее антропогенного освоения, многопараметрический анализ сложноорганизованных объектов, моделирование оптимального маршрута прокладки трассы с использованием алгоритма Дейкстры.

The procedure is intended for automated selection of an environmentally safe and economically justified route for laying a linear object and cartographic display of the obtained results in the GIS environment. The article reveals the essence and formulates the requirements for the system of mathematical and cartographic modeling. The results of testing the developed approaches are given.

When creating the technique, the following research methods were used: ranking the properties of the natural environment by their influence on the suitability of the territory for its anthropogenic development, multivariable analysis of complex objects, modeling of the optimal route of the route using the Dijkstra algorithm.

Введение

В настоящее время одной из наиболее сложных задач природопользования является оценка пригодности территории к ее антропогенному освоению с учетом устойчивости.

Для решения этой задачи целесообразно использовать математико-картографическое моделирование, под которым понимается пространственный многопараметрический анализ природного потенциала территории в среде ГИС с целью определения его возможности устойчиво выполнять задаваемые социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства).

Сложность решения этой задачи обусловлена недостаточной развитостью алгоритмов геопроостранственного моделирования процессов и явлений природной среды в соответствии с запросами потребителей, за исключением решения картометрических задач.

В основу исследования автор заложил следующую гипотезу: если будет разработана методика математико-картографического моделирования возможностей территории для прокладки трасс линейных объектов (нефте- и газопроводов, линий электроснабжения, связи, специализированных объектов инженерной инфраструктуры, дорог и других линейно вытянутых сооружений), то будет повышена экологическая устойчивость ландшафтов при их антропогенном освоении.

Методология исследования

Повышение экологической устойчивости ландшафтов к антропогенному освоению неразрывно связано с

совершенствованием информационного обеспечения принятия управленческих решений [2, 8, 13, 15].

Одним из основных инструментов информационного обеспечения являются методы математико-картографического моделирования. Они позволяют анализировать пространственное распределение изучаемых процессов или явлений в пределах исследуемой территории и представлять результаты анализа в картографическом виде.

В основу математико-картографического моделирования автор предлагает закладывать методологию многопараметрического анализа сложноорганизованных объектов, реализованную в виде усовершенствованного метода сводных показателей [1, 6, 11, 14]:

$$Q(q; w) = \sum_{i=1}^m q_i \cdot w_i, \quad (1)$$

где Q – сводный показатель результатов анализа; q – вектор нормированного значения анализируемого показателя; w – вектор весового коэффициента показателя; m – количество критериев, для которых определяются показатели.

Элементы вектора q представляют собой функции $q_i = q_i(x)$, $i = 1, \dots, m$, где x – вектор исходных характеристик, которые достаточно полно описывают оцениваемый объект. Обычно используется частный случай, когда отдельный показатель является линейной функцией от одной исходной характеристики: $q_i = q_i(x)$, $i = 1, \dots, m$.

Вектор весовых коэффициентов w определяет степень влияния отдельных показателей на сводный показатель. Значения элементов этого вектора должны удовлетворять условиям:

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m.$$

Для реализации процедуры математико-картографического моделирования предлагается использовать патч-ориентированные модели, в которых исследуемая территория разбивается на совокупность однородных участков [16]. Главным условием реализации данного подхода является обеспечение однородности выделенного участка, к примеру, в качестве таких участков могут выступать фации, но не обязательно.

Математико-картографическое моделирование осуществляется с учетом следующих методических установок:

- а) дифференциации территории на объекты моделирования;
- б) выбора показателей для определения пригодности территории для прокладки трассы линейного объекта;
- в) определения способов интеграции показателей;
- г) пространственной и временной локализации (привязки) информации;

д) картографического представления результатов моделирования в среде ГИС.

Результаты исследования

В основу разработанной методики были заложены следующие принципы: системности; экологической безопасности; приоритетности влияния свойств территории на прокладку трассы линейного объекта; единства оценки; экономической целесообразности.

Разработанная методика состоит из десяти основных блоков.

Блок 1. Информационное обеспечение математико-картографического моделирования пригодности территории для прокладки трассы линейного объекта. Данный этап работ включает в себя определение перечня природных факторов, влияющих на пригодность территории для прокладки трассы линейного объекта и показателей, их характеризующих, и на этой основе создается концептуальная информационная модель. Например, в западных регионах России на пригодность территории для прокладки трасс линейных объектов оказывают влияние следующие природные факторы: рельеф, характеризующийся крутизной склонов и негативными процессами рельефообразования; почвенный покров, характеризующийся устойчивостью к загрязнению тяжелыми металлами, закислению, эрозионному смыву, подтоплению; растительный покров, характеризующийся ресурсной ценностью древостоев, устойчивостью к механическим повреждениям и пиротехническим воздействиям, экологической значимостью; животный мир, характеризующийся изменением традиционных путей миграции животных и сокращением пастбищных угодий и др.

Блок 2. Построение дерева свойств, реализующего концептуальную информационную модель. Оно представляет собой иерархическую структуру, в которой свойства вышестоящих уровней связаны со свойствами нижестоящих уровней, являющихся первичными. Разбиение свойств производится до тех пор, пока не образуется уровень, содержащий либо элементарные свойства, которые нельзя делить дальше, либо квазиэлементарные свойства, которые делить уже нецелесообразно.

Блок 3. Ранжирование свойств территории по их влиянию на ее пригодность для прокладки трассы линейного объекта. Процесс ранжирования свойств включает в себя два этапа: 1) определение ненормированных коэффициентов весомости (важности) свойств территории по их влиянию на ее пригодность для прокладки трассы линейного объекта; 2) расчет нормированных коэффициентов весомости (важности, приоритетности). Для этого используется экспертный метод парных сравнений, подробно изложенный в работе [11].

Блок 4. Создание средствами ГИС электронных факторных карт для всех показателей, входящих

в дерево свойств. В процессе реализации данного блока на исследуемую территорию средствами ГИС для каждого показателя создается аналитическая (факторная) карта, под которой понимается координированная графическая модель, предназначенная для отображения пространственно-привязанной информации о степени проявления изучаемого показателя в пределах исследуемой территории.

Блок 5. Деление территории средствами ГИС на расчетные участки, представляющие собой однородные элементарные ареалы. Деление территории осуществляется с использованием операции «топологический оверлей» (рис. 1), при его реализации происходит преобразование не только графической, но и семантической информации [7, 9].

Блок 6. Разработка оценочной шкалы классов пригодности территории для прокладки трассы линейного объекта. В основу ее построения закладываются подходы, используемые при создании моделей-классификаций [4, 5].

При построении оценочной шкалы для нормирования значений показателей предлагается использовать кусочно-степенные функции вида (2) и (3) [14].

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 1, & x_i > \max_i \end{cases} \quad (2)$$

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 0, & x_i > \max_i. \end{cases} \quad (3)$$

Неубывающая кусочно-степенная функция (2) используется в том случае, когда увеличение значения i -го показателя не влечет снижения значения пригодности территории для прокладки линейного объекта.

При этом всем показателям со значениями x_i , не превосходящими некоторого фиксированного уровня \min_i , приписывается минимальное значение i -го показателя, а показателям со значениями x_i , превосходящими фиксированный уровень \max_i , – максимальное значение этого показателя.

В практике оценочных исследований в качестве \min_i чаще всего принимается нулевое, фоновое или предельно допустимое значение показателя. В качестве \max_i не всегда целесообразно использовать правое значение x_i последнего класса. Часто это значение достаточно велико и редко достижимо. Кроме того, при его использовании в качестве \max_i в последний класс может попасть более 40% всей оценочной шкалы. В этом случае в качестве \max_i можно ввести не абсолютный максимум показателя, а «региональный максимум» (меньший абсолютного), или задать \max_i с учетом изменения по классам величины Δx_i .

В нормирующих функциях (2) и (3) показатель степени λ определяет характер их выпуклости: при $\lambda < 1$ нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda > 1$ – вверх. Однако следует учитывать, что λ не вносит существенных изменений в формирование оценочной шкалы интегрального показателя, поэтому ее значением можно принять за 1 [12].

Неубывающая кусочно-степенная функция (3) используется в том случае, когда значение класса пригодности территории, оцениваемого по i -му показателю, не возрастает.

Для определения интегральных показателей при их равновесомых значениях используется зависимость (4), а при неравновесомых значениях – зависимость (5):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m q_i}{m}, \quad (4)$$

$$I' = \sum_{i=1}^n q_i P_i. \quad (5)$$

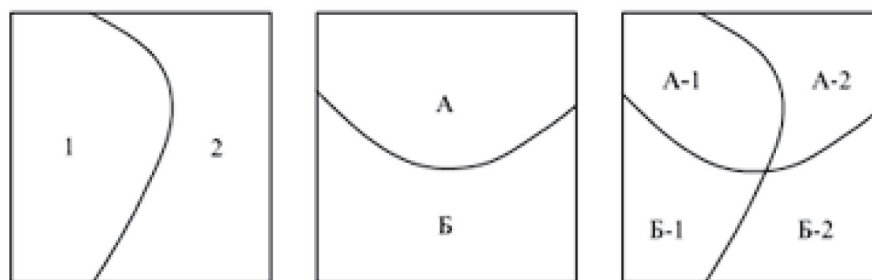


Рис. 1. Деление изучаемой территории на расчетные участки путем суммирования факторных карт (1, 2 – ареалы, различные по устойчивости грунтов к эрозионному смыву. А, Б – ареалы, различные по устойчивости почв к загрязнению. А-1, А-2, Б-1, Б-2 – ареалы, однородные по значению устойчивости грунтов к эрозионному смыву и устойчивости почв к загрязнению)

где: I, I' – интегральные показатели нормированных характеристик пригодности территории для прокладки трассы линейного объекта, соответственно при равновесных и неравновесных значениях показателей; q_i – нормированное значение i -го показателя; P_i – нормированный коэффициент весомости (важности) i -го показателя; m – число показателей, участвующих в анализе.

При построении интегральных показателей можно использовать простейшие нормирующие функции, в которых \min_i соответствует левому граничному значению нормированной характеристики для первого класса, а \max_i – правому граничному значению нормированной характеристики для последнего класса. При этом для нормированных характеристик, связанных с оцениваемыми показателями обратной зависимостью – наоборот.

Для математико-картографического моделирования пригодности территории для прокладки трасс линейных объектов предлагается принять пятиступенчатую шкалу: очень непригодна – 1 класс, непригодна – 2 класс, средней пригодности – 3 класс, пригодна – 4 класс, очень пригодна – 5 класс. Правила получения интегральных показателей пригодности территории изложены в работе [3].

Блок 7. Интегральная оценка пригодности территории для прокладки трассы линейного объекта. На этом этапе работ для каждого расчетного участка определяются абсолютные значения характеризующих его показателей [10]. Затем с использованием зависимостей (2) и (3) рассчитываются их нормированные значения, а с помощью зависимостей (4) или (5) – интегральные показатели. После этого определяется класс пригодности расчетного участка для прокладки трассы линейного объекта.

Блок 8. Создание электронной векторной карты пригодности территории для прокладки трассы линейного объекта. Для создания электронной карты используется базовая картографическая основа с нанесенными расчетными участками. К каждому расчетному участку, показанному на основе, привязывается класс его пригодности для прокладки трассы линейного объекта. После этого участки, попадающие в один класс, отображаются принятым условным знаком.

Блок 9. Перевод электронной карты из векторного в регулярно-ячеистый формат. При выборе оптимального маршрута проложения трассы линейного объекта необходимо созданную электронную карту перевести из векторного в регулярно-ячеистый формат, который представляет собой совокупность регулярных пространственных (территориальных) ячеек правильной геометрической формы. Данный перевод основан на квантовании пространства с помощью регулярной матрицы, каждый элемент (ячейка) которой может быть описан неограниченным набором атрибутов. Преобразование векторного формата картографического изображения в растровый называется растеризацией.

Блок 10. Автоматизированный выбор в среде ГИС экологически безопасного маршрута проложения трассы линейного объекта с учетом устойчивости территории. Для решения этой задачи применяется алгоритм Дейкстры, позволяющий определять с экологическими ограничениями кратчайшее расстояние от одной ячейки матрицы (вершины графа) до всех остальных. При реализации алгоритма Дейкстры связь между ячейками матрицы находится с использованием «шаблона ферзя», позволяющего минимизировать целевую функцию. При этом основные правила построения графа связности ячеек матрицы заключаются в следующем: 1) центры ячеек матрицы являются узлами графа; 2) связи между соседними ячейками являются дугами графа. Граф связности строится как соединение фиксированного количества соседних ячеек матрицы его дугами. Присваивание степени пригодности территории для прокладки трассы линейного объекта на каждой дуге осуществляется по изотропной модели, в которой все значения пригодности рассчитываются с учетом местоположения ячейки в пределах матрицы.

Заключение

Рассмотренные выше методические подходы к математико-картографическому моделированию в среде ГИС трасс прокладки линейных объектов позволят повысить экологическую безопасность антропогенного освоения территории. Их отличительной особенностью является новый взгляд на интегральную оценку пригодности территории для прокладки трасс линейных объектов, основанный на методологии многопараметрического анализа сложноорганизованных объектов.

Преимущество разработанной автором методики заключается в том, что им предложен реально действующий механизм выбора экологически безопасной и экономически обоснованной трассы линейного объекта при подготовке эскизного проекта, что позволит повысить качество принимаемых проектных решений и, как следствие, обеспечит экологическую безопасность функционирования природной среды.

Заложенные в основу данного исследования подходы были разработаны на основе обобщения результатов ранее выполненных автором работ [8, 9, 10, 11].

Созданная методика может быть использована при решении следующих задач: 1) совершенствования предпроектных исследований при прокладке трасс линейных объектов; 2) улучшения контроля за экологической безопасностью антропогенного освоения территории; 3) формирования базы данных о пригодности территории для антропогенного освоения с учетом ее устойчивости; 4) территориального распределения антропогенных нагрузок исходя из сложившейся экологической обстановки.

Полученные автором результаты полностью соответствуют выдвинутой гипотезе исследования.

Литература

1. Азгальдов, Г. Г. Квалиметрия для всех : Учеб. пособие / Г.Г. Азгальдов, А.В. Костин, В.В. Садовов. – Москва : ИД Информ-Знание, 2012. – 165 с.
2. Арефьев, Н. В. Основы формирования природно-аграрных систем. Теория и практика / Н.В. Арефьев, В.П. Бреусов, Г.К. Осипов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 532 с.
3. Дмитриев, В. В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. I. Качество природных вод / В.В. Дмитриев, Н.В. Мякишева, Н.В. Хованов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 1996. – № 3. – С. 40–52.
4. Дмитриев, В. В. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем / В.В. Дмитриев, А.Н. Огурцов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2013. – № 3. – С. 88–103.
5. Дмитриев, В. В. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем / В.В. Дмитриев, А.Н. Огурцов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2014. – № 4. – С. 114–130.
6. Дмитриев, В. В. Устойчивость сложных систем в природе и обществе: методология, оценка, результаты / В.В. Дмитриев, А.Н. Огурцов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 48. – С. 72–84.
7. Никифорова, А. А. Дифференциация территории по природным условиям для агроэкологического картографирования / А.А. Никифорова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2010. – № 1. – С. 120–127.
8. Арефьев, Н. В. Эколого-географическая оценка среды при проектировании особо охраняемых территорий / Н.В. Арефьев, В.В. Дмитриев, А.Г. Осипов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2003. – № 4 (34). – С. 181–187.
9. Осипов, А. Г. ГИС-технологии при зонировании ландшафтов по пригодности к аграрному освоению / А.Г. Осипов, В.В. Гарманов // Сборник научных трудов «Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения». – 2018. – Ч. II. – С. 238–243.
10. Осипов, А. Г. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов при создании сельскохозяйственных угодий природно-аграрных систем / А.Г. Осипов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2016. – № 3. – С. 150–162.
11. Осипов, А. Г. Многокритериальная оценка земельных ресурсов на основе квалиметрического анализа / А.Г. Осипов // Региональная экология. – 2003. – № 1-2. – С. 31–38.
12. Примак, Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов : автореферат диссертации на соискание учен. степ. канд. геогр. наук 20.00.36 / Примак Екатерина Алексеевна ; Российский государственный гидрометеорологический университет. – Санкт-Петербург, 2009. – 24 с.
13. Хабарова, И. А. Разработка многофакторной модели использования земель с учетом региональных особенностей / И.А. Хабарова, В.Б. Непоклонов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 5. – С. 111–115.
14. Хованов, Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците / Н.В. Хованов. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 1996. – 196 с.
15. Умывакин, В. М. Интегральная эколого-хозяйственная оценка и управление земельными ресурсами в регионе / В.М. Умывакин. – Воронеж : Воронеж. гос. пед. ун-т, 2002. – 178 с.
16. Erős, T. The Landscape Ecology of Rivers: from Patch-Based to Spatial Network Analyses / T. Erős, W.H. Lowe // Current Landscape Ecology Reports. – 2019. – No. 4. – P. 103–112.