

Многофакторный анализ межкомпонентных связей в геосистемах на основе имитационного моделирования и численных методов

С.А. Ямашкин, А.А. Ямашкин, О.А. Зарубин, А.В. Кирюшин

МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск

Аннотация: В статье представлена методика многофакторного анализа межкомпонентных связей в геосистемах, реализованная на основе двух стратегий: использования численных, в том числе статистических, методов для оценки степени влияния различных параметров на состояние модели геосистем и применения имитационного моделирования для оценки динамических свойств геосистем и решения задачи пространственного прогнозирования. Алгоритм оценки важности геосистемных параметров позволяет оценить влияние различных параметров на целевой показатель в рамках решения проектных задач. Дана характеристика концепции построения систем имитационного моделирования для решения задачи оценки динамики и прогнозирования развития метагеосистем.

Ключевые слова: метагеосистемы, пространственные данные, моделирование, межкомпонентные связи.

Введение

В решении задачи анализа структуры и свойств территорий важное место занимает многоплановый количественный анализ межкомпонентных связей в геосистемах регионального порядка. В данном контексте под термином «геосистема» понимается «особый класс управляющих систем; земное пространство всех размерностей, где отдельные компоненты природы находятся в системной связи друг с другом и как определенная целостность взаимодействуют с космической сферой и человеческим обществом» [1, с. 292]. Геосистемы характеризуются взаимодействиями различного характера [2]. Во-первых, при условии оценки взаимодействия территорий различного иерархического уровня, имеют место восходящие и нисходящие связи между вмещающими и дочерними системами. Во-вторых, взаимодействия между территориальными системами одного порядка характеризуются множеством параметров, изменяющихся с течением времени и влияющих друг на друга. Важно понимать, что в

постоянном взаимодействии участвуют системы различной категории: природные, экономические (хозяйственные), социальные, экологические. Цифровые модели геосистем, в полной мере описывающие взаимодействие природно-социально-производственных территориальных систем, могут быть определены как метагеосистемы [3].

Цель исследования, представленного в данной статье, заключается в поиске решения научной проблемы многопланового анализа межкомпонентных связей в геосистемах на основе использования численных методов и имитационного моделирования.

Материалы и методы исследования

Отдельные компоненты территориальных систем могут быть представлены в виде моделей, характеризующихся численными атрибутами, которые с определенной степенью абстракции определяют параметры реальных территориальных систем. Исходя из понимания того, что природно-социально-производственные системы характеризуются слабо ограниченным и при этом значительным числом свойств, важно определить те параметры, которые оказывают влияние на принятие тех или иных решений, или же выявление необходимых закономерностей.

Знания о территориях различного порядка консолидируются в геоинформационных системах. Так, при анализе геосистем Республики Мордовия целесообразно интегрировать данные, раскрывающие особенности взаимодействия лесостепных и лесных геосистем Приволжской возвышенности и Окско-Донской низменности, а также знаний о природно-техногенных системах региона. Необходимо отметить, что формировать базы данных региональной ГИС целесообразно на основе системы тестовых полигонов с использованием результатов полевых и

камеральных исследований для того, чтобы с одной стороны глубоко изучить особенности конкретных территорий, а с другой – экстраполировать полученные знания на геосистемы аналогичного уровня и схожей структуры.

В связи с этим, была разработана система тестовых полигонов, нацеленных на решение конкретных проектных задач (рис. 1):

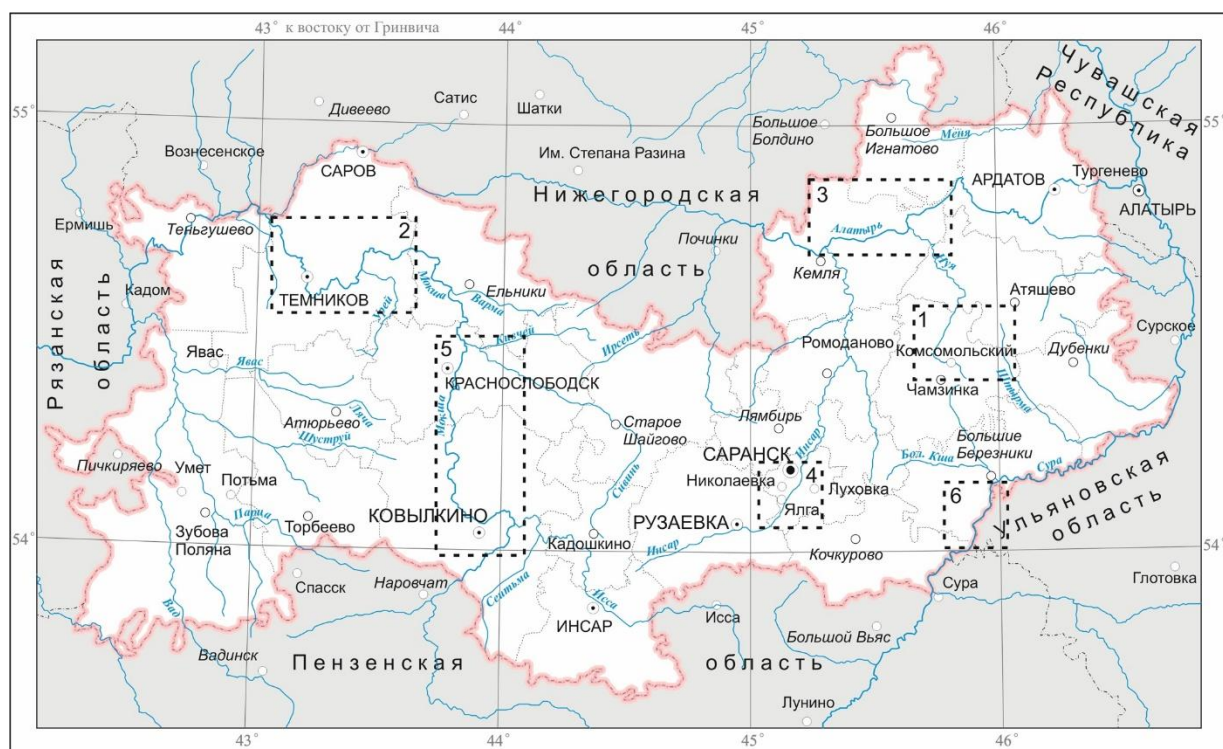


Рис. 1. – Тестовые полигоны Республики Мордовия

1) Нуя (центр: $54^{\circ}28'$ с.ш., $45^{\circ}54'$ в.д.) – диагностика состояния и взаимодействия лесных и лугово-степных геосистем для планирования систем природопользования и обоснования зон экологического равновесия.

2) Мокша – Темников (центр: $54^{\circ}42'$ с.ш., $43^{\circ}24'$ в.д.) – обоснование комплекса мероприятий по организации туристического кластера «Санаксарь – Темников» и уникальных экосистем «Заповедной Мордовии».

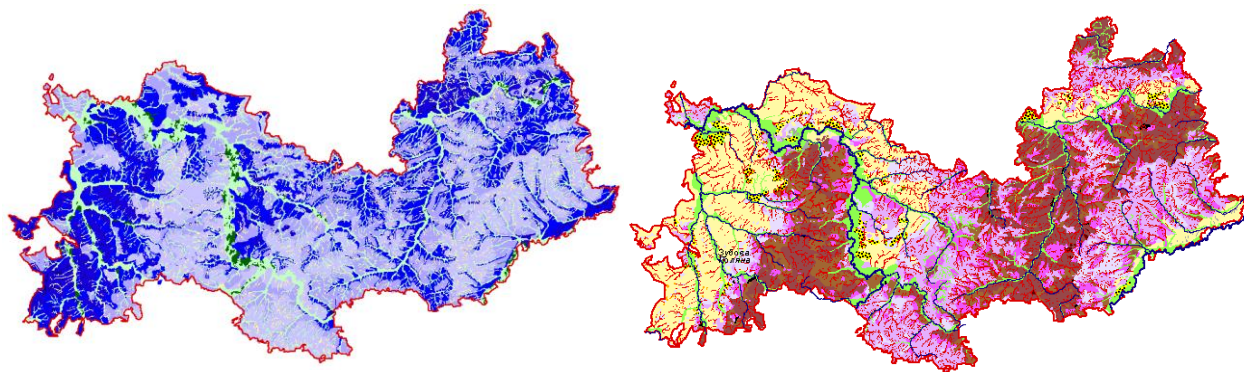
3) Алатырь – Смольный (центр: $54^{\circ}48'$ с.ш., $45^{\circ}29'$ в.д.) – картографирование экзогеодинамических процессов в зонах линейных тектонических разломов; планирование рекреационных систем.

4) Саранск (центр: $54^{\circ}11'$ с.ш., $45^{\circ}11'$ в.д.) – комплексное исследование метагеосистем с целью диагностики развития геоэкологических процессов и ландшафтного планирования градостроительного освоения геосистем.

5) Мокша (центр: $54^{\circ}13'$ с.ш., $44^{\circ}02'$ в.д.) – исследование склоновых и пойменных экзогеодинамических процессов в зонах геотехнических систем.

6) Инерка (центр: $54^{\circ}03'$ с.ш., $45^{\circ}53'$ в.д.) – оптимизация рекреационного освоения памятника природы «Озеро Инерка».

Для тестовых полигонов Республики Мордовия собраны наборы пространственных данных различной тематической направленности (рис. 2), реализованные в виде цифровых карт геологии (коренные отделы, четвертичные отложения, литологический состав поверхностных отложений), подземных вод (водоносный горизонт, глубина залегания, тип и класс вод, содержание сульфатов, фторидов, хлоридов, железа), почв (пространственное распределение и эколого-геохимическая устойчивость), растительности.



а)

б)

Рис. 2. – Примеры цифровых карт: а) глубина залегания грунтовых вод,
б) пространственное распределение почв

Интегральное значение играет при этом электронная ландшафтная карта, а базовую основу для исследований формируют цифровая модель рельефа и данные дистанционного зондирования Земли, интегрируемые для исследуемой территории.

Реестр техногенных объектов формируют данные об административных границах, населенных пунктах, зданиях, объектах интереса), инфраструктурных объектах и системах (линии электропередач, автодороги, железные дороги, маршруты и остановки транспорта, аэродромы), природных и природно-техногенных объектах (гидросеть, озера, крупные реки, системы землепользования, особо охраняемые природные территории).

Данные для многофакторного анализа межкомпонентных связей в геосистемах различного порядка синтезируются в следующей последовательности:

- консолидация данных об исходных системах на основе отбора свойств, полно и точно отображающих изучаемые геосистемы, исходя из решаемой проектной задачи;

- формирование систем данных на основе информативных пространственных, временных и атрибутивных параметров на едином параметрическом пространстве;

- генерация порождающих систем в формы, основанные на природе и свойствах изучаемых объектов и решаемых задач с последующим синтезом структурированных систем, позволяющих моделировать отношения между параметрами объекта.

Многофакторный анализ межкомпонентных связей в геосистемах может быть в полной мере осуществлен на основе двух стратегий: использования численных, в том числе статистических, методов для оценки степени влияния различных параметров на состояние модели геосистем и применения имитационного моделирования для оценки динамических свойств геосистем и решения задачи пространственного прогнозирования [4-6].

Выделение значимых параметров межкомпонентного взаимодействия

Анализ межкомпонентных связей в геосистемах должен быть основан на методах и алгоритмах оценки силы и характера отношений между метагеосистемами различного типа и порядка. При этом он должен позволять определить набор факторов, информативно и полно описывающих варьирование свойств территориальных систем.

Для выявления различных качественных и количественных свойств геосистем необходимо использовать обоснованные наборы факторов. Напротив, использование в анализе избыточной информации снижает устойчивость анализирующей системы и предъявляет более серьезные требования к ее настройке и функционированию. В качестве основы для выделения информативных признаков можно использовать модификации алгоритма Relief [7], оптимизированных для решения конкретных задач и предполагающих итеративную переоценку весов факторов на основе оценки вероятности того, что каждый конкретный фактор различен для соседних объектов с разными значениями класса (Miss), или схож для соседних объектов одного класса (Hit).

$$w_i = P((f_i^{\text{Miss}} \neq f_i)|\text{Miss}) - P((f_i^{\text{Hit}} \neq f_i)|\text{Hit})$$

Выбор ближайших соседей происходит при этом на основе анализа набора из N факторов: на основе расчета евклидова расстояния:

$$d(x_p, x_q) = \sqrt{\sum_{f=1}^N (x_p^f - x_q^f)^2},$$

Поиск ближайших соседей может производиться также посредством вычисления манхэттенского расстояния. Для осуществления итеративной операции обновления весов $w_i^{iter+1} = w_i^{iter} + \Delta_i$ необходимо дать оценку модификационному параметру Δ_i :

$$\Delta_i = \Delta_i^{miss} - \Delta_i^{hit} = |x^i - Miss^i(x)| - |x^i - Hit^i(x)|$$

Если i -й фактор определен категориальным значением, весовые коэффициенты изменяются следующим образом:

$$\Delta_i = \Delta_i^{miss} - \Delta_i^{hit} = \left((x^i = Miss^i(x)) ? 0 : 1 \right) - \left((x^i = Hit^i(x)) ? 0 : 1 \right)$$

При мультиклассовом анализе, в рамках которого свойства компонентов геосистем используются для оценки принадлежности территории одному из множества классов $Y = \{1, \dots, C\}$, для которых определена частота появления p_c , модификационный параметр Δ_i может быть определен следующим образом:

$$\Delta_i = \sum_{c \in Y, c \neq y(x)} \frac{p_c}{1 - p_c} (|x^i - Miss_c^i(x)| - |x^i - Hit_c^i(x)|),$$

При решении задачах регрессии (прогнозируемое значение y_{pred} непрерывно), необходимо ввести критерий различимости прогнозируемых непрерывных значений двух экземпляров, который может быть смоделирован посредством вычисления относительного расстояния между предсказанными значениями на основе теоремы Байеса:

$$w_i = \frac{P_{Near}^{y|f_i} P_{Near}^{f_i}}{P_{Near}^y} - \frac{(1 - P_{Near}^{y|f_i}) P_{Near}^{f_i}}{1 - P_{Near}^y}$$

где $P_{Near}^{y|f_i}$ – вероятность различного прогнозируемого значения для соседних объектов с разным значением i -го фактора; $P_{Near}^{f_i}$ – вероятность разного значения i -го фактора для соседних объектов; P_{Near}^y – вероятность различного прогнозируемого значения для соседних объектов.

Для усиления устойчивости процесса оценки значимости параметров геосистемных компонентов необходимо нормализовать анализируемые значения посредством модификации величин факторов с вычислением математического ожидания \bar{x} и дисперсии σ_x .

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}$$

Алгоритм оценки важности геосистемных параметров позволяет оценить влияние различных параметров на целевой показатель. Улучшить устойчивость алгоритма возможно посредством применения рекурсивного подхода, в рамках которого реализуется последовательное применение представленного алгоритма с отсечением обоснованного количества факторов на каждом этапе. Увеличение быстродействия при этом возможно на основе запуска алгоритма для подмножеств факторов с последующей интеграцией результатов.

Имитационное моделирование для прогнозирования особенностей межкомпонентного взаимодействия

В то время, как алгоритм выделения значимых параметров позволяет оценить наличие и силу факторов межкомпонентного взаимодействия в геосистемах, имитационное моделирование позволяет спрогнозировать особенности этого взаимодействия и оценить их в динамике [8, 9]. Система имитационного моделирования межкомпонентных связей в метагеосистемах может быть описана множествами GRAPH – графовая

модель геосистем, AGENTS – множество агентов модели, описывающих с определенной абстракцией перемещение вещества и энергии между геосистемами; SIMULATION – алгоритмические особенности системы моделирования, определенные набором управляющих алгоритмов CONTROLERS и системных параметров PARAMETERS.

Модель GRAPH описывает структурную организацию территориальной системы с заданным уровнем абстракции (рис. 3).

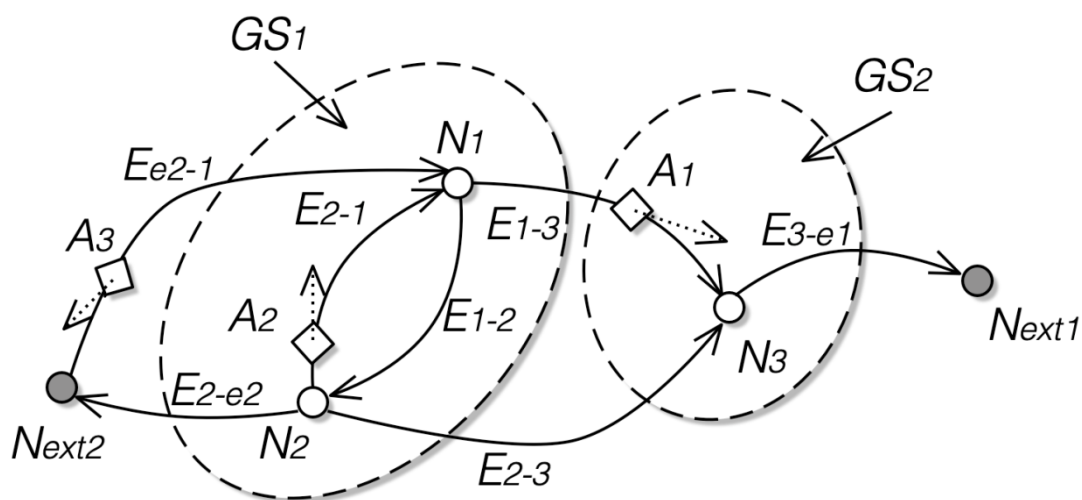


Рис. 3. – Графовая модель геосистем: N – вершина (компонент), E – дуга (связь), GS – сегмент графа; A – агент модели.

Вершины графа (N) определяет выделенные территориальные компоненты системы. Каждая вершина характеризуется координатной привязкой и набором ассоциированных атрибутов и методов. Множество дуг (E) описывает существующие связи между территориальными системами и объектами, определяющие перенос вещества и энергии. Для усиления гибкости модели, графовая модель GRAPH может быть поделена на множество сегментов GS с целью описания многоуровневой структуры для моделирования иерархической организации соподчиненных геосистем.

Связи между территориальными системами могут быть описаны средствами агентного моделирования, при котором децентрализованные

объекты системы, описываемые множеством атрибутов и методов, перемещаются и трансформируются в рамках модели.

Процесс разработки имитационной модели должен включать этапы: определения задачи и сценариев использования системы, проектирования и детализация модели, в том числе, алгоритмической конкретизации, реализации подсистемы визуализации и апробации системы.

Следует выделить два направления развития каркаса имитационного моделирования пространственных процессов. С одной стороны, необходимо придерживаться дедуктивной стратегии, при которой система построения моделей должна изначально проектироваться с целью достижения возможности покрытия решений максимального количества задач, с другой – необходимо максимально эффективно реализовывать индуктивную стратегию, в рамках которой положительно зарекомендовавшие себя улучшения частных конкретных моделей становятся основой для развития каркаса имитационного моделирования. Совместное использование дедуктивной и индуктивной стратегий обеспечит эволюционное улучшение каркаса моделирования, а также оптимизацию частных решений, разрабатываемых на его основе.

Необходимо отметить, что качество имитационных моделей в значительной мере зависит от полноты и точности параметров, на основе которых они функционируют. Подбор атрибутов, имеющих значение при решении конкретных задач может осуществляться на основе методики, описанной в предыдущем разделе. Данные, определяющие поведение модели, должны интегрироваться на основе методов непараметрической и параметрической статистики, что в сочетании с ГИС ориентированными технологиями, позволяет существенно расширить возможности исследования межкомпонентных отношений.



На основе представленной методики разработан программный комплекс имитационного моделирования для решения задачи анализа межкомпонентных связей в городских транспортных метагеосистемах [10].

Выводы

В статье представлена методика использования имитационного моделирования и численных методов для решения задачи многопланового анализа межкомпонентных связей в геосистемах, позволяющая решить следующие задачи: 1) оценка силы и характера отношений между метагеосистемами; 2) определение набора факторов, информативно и полно описывающих варьирование свойств геосистем; 3) интерпретация и обоснование физического смысла выделенных факторов.

На основе моделей структурированных пространственных систем становится возможным построение цифровых моделей пространственной структуры геосистем на основе непрерывного и дискретного подходов. Данные модели могут быть консолидированы в региональных геоинформационных системах и геопорталах с целью их дальнейшего использования для решения задач мониторинга, зонирования и пространственного прогнозирования.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00651, rscf.ru/project/22-27-00651/.

Литература

1. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Издательство "Наука" Сибирское отделение, 1978. 320 с.
2. Yamashkin A. A., Yamashkin S.A., Muchkaeva N. S., Lyamzina I. S. Development of the regional water balance regulation concept based on the

geosystem approach // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2022. Vol. 26. № 3. P. 1672-1683.

3. Черкашин А. К. Теоретическая и метатеоретическая география // Географический вестник. 2020. № 1(52). С. 7-21.

4. Valiante M., Guida D., Della Seta M., Bozzano F. A spatiotemporal object-oriented data model for landslides (LOOM) // Landslides. 2021. Vol. 18. № 4. P. 1231-1244.

5. Katwal R., Li J., Zhang T., Hu C., Rafique M. A., Zheng Y. Event-based and continuous flood modeling in Zijinguan watershed, Northern China // Natural Hazards. 2021. Vol. 108. № 1. P. 733-753.

6. Xu C., Liu W. Integrating a Three-Level GIS Framework and a Graph Model to Track, Represent, and Analyze the Dynamic Activities of Tidal Flats // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10. №. 2. P. 61.

7. Robnik-Šikonja M., Kononenko I. Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF // Machine learning. 2003. Vol. 53. №. 1. P. 23-69.

8. Ерещенко Т.В., Рашевский Н.М., Хорошун Д.А., Ряпалов Д.Н., Курамшин Р.Ф. Анализ и моделирование транспортных потоков на перекрестке для управления качеством городской среды // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2022/7847.

9. Бондарева И.О., Латыпова Э.А. Имитационное моделирование как инструмент комплексной оценки стратегических рисков логистического предприятия // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4090.

10. Ямашкин С. А., Ямашкина Е. О., Никулин В. В. Анализ межкомпонентных связей в метагеосистемах на основе имитационного моделирования // Вестник Астраханского государственного технического

университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 4. С. 78-87.

References

1. Sochava V. B. Vvedenie v uchenie o geosistemah [Introduction to the study of geosystems]. Moskva: Izdatel'stvo "Nauka" Sibirskoe otdelenie, 1978. 320 p.
2. Yamashkin A. A., Yamashkin S.A., Muchkaeva N. S., Lyamzina I. S. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2022. Vol. 26. № 3. pp. 1672-1683.
3. Cherkashin A. K. Geograficheskij vestnik. 2020. № 1(52). P. 7-21.
4. Valiante M., Guida D., Della Seta M., Bozzano F. Landslides. 2021. Vol. 18. № 4. P. 1231-1244.
5. Katwal R., Li J., Zhang T., Hu C., Rafique M. A., Zheng Y. Natural Hazards. 2021. Vol. 108. № 1. P. 733-753.
6. Xu C., Liu W. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10. №. 2. P. 61.
7. Robnik-Šikonja M., Kononenko I. Machine learning. 2003. Vol. 53. №. 1. P. 23-69.
8. Ereshchenko T.V., Rashevsky N.M., Khoroshun D.A., Ryapalov D.N., Kuramshin R.F. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 8. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2022/7847.
9. Bondareva I.O., Latypova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4090.
10. Yamashkin S. A., Yamashkina E. O., Nikulin V. V. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika. 2022. № 4. P. 78-87.

