

Математическая модель процесса мониторинга геопро пространственной динамики территории региона

Mathematical model of the process of monitoring the geospatial dynamics of the region

Привалов / Privalov A.

Андрей Андреевич

(apivalov@inbox.ru)

доктор военных наук, профессор.

ФГКВОУ ВО «Военная ордена Жукова академия

войск национальной гвардии Российской Федерации»

МО РФ,

профессор кафедры применения подразделений

специальных систем.

г. Санкт-Петербург

Колесов / Kolesov V.

Вадим Александрович

(vkolesov15@mail.ru)

кандидат военных наук, доцент.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени

Маршала Советского Союза С. М. Буденного»

МО РФ,

преподаватель кафедры организации

информационно-аналитической работы.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: математическая модель – mathematical model; процесс мониторинга – the monitoring process; стохастическая сеть – stochastic network; эквивалентная функция – equivalent function; геопро пространственная динамика – geospatial dynamics.

В статье предложена математическая модель процесса мониторинга геопро пространственной динамики территорий региона. Алгоритм использует метод топологического преобразования стохастической сети. Особенностью используемого решения является поэтапное укрупнение стохастической сети, позволяющее существенно упростить формальную запись ее эквивалентной функции и последующую процедуру определения функции распределения времени реализации моделируемого процесса. На основе проведенного анализа получены количественные оценки длительности интервала развития отдельных элементов геопро пространственной динамики территорий региона при ее возможном развитии.

The article offers a mathematical model of the process of monitoring the geospatial dynamics of the region's territories. A special feature of the solution used is the step-by-step enlargement of the stochastic network, which significantly simplifies the formal recording of its equivalent function and the subsequent procedure for determining the time distribution function for the implementation of the modeled process. Based on the analysis, quantitative estimates of the duration of the development interval of individual elements of the geospatial dynamics of the region's territories in its possible development are obtained.

Для современного состояния России и других промышленно развитых стран мира характерны процессы геопро пространственной динамики территорий, обусловленные воздействием природно-техногенных факторов. К ним относятся изменение климата в регионах, создание больших промышленных и сельскохозяйственных кластеров, переориентирование больших территорий на другие виды народнохозяйственной деятельности. При этом техногенные и природные факторы становятся постоянно действующими факторами не только экологии, экономики, но и политики. Наиболее сильные процессы неконтролируемой геопро пространственной динамики территорий, имевшие место в последние десятилетия в России и за рубежом, причинили большой и часто невосполнимый ущерб окружающей среде [4, 12].

Для построения математических моделей процесса мониторинга геопро пространственной динамики территорий региона применяются различные методы, одним из которых является геопро пространственная аналитика [4, 7, 8, 16]. Геопро пространственная аналитика относится к сбору, анализу и визуализации данных, которые географически и событийно привязаны. Эта область объединяет традиционный анализ данных и методы с географическими информационными системами (ГИС) для предоставления пространственной информации [17, 18]. Используя данные, основанные на происходящих событиях и их местоположении, аналитика процесса геопро пространственной динамики территорий позволяет различным организациям принимать обоснованные решения на основе полученных данных [3, 4, 11].

Геопространственные данные имеют решающее значение для понимания закономерностей и тенденций в различных секторах, включая территории региона, городское планирование, мониторинг окружающей среды и транспорт. Этот тип данных может включать в себя информацию от сведений об инфраструктуре региона, его физико-географических характеристиках до спутниковых снимков с координатами GPS, что позволяет аналитикам визуализировать и интерпретировать сложные наборы данных в пространственном контексте. Возможность анализа полученных данных о процессе геопространственной динамики территорий помогает организациям выявлять проблемы, которые могут быть не очевидны при применении традиционных методов анализа данных [1, 2, 5].

В геопространственной аналитике используется несколько методов, включая пространственную статистику, геокодирование и пространственный анализ данных. Пространственная статистика включает анализ пространственных закономерностей и взаимосвязей, в то время как геокодирование преобразует адреса в географические координаты. С другой стороны, пространственный анализ данных извлекает закономерности из больших наборов данных, имеющих пространственный компонент [6, 16].

Геопространственная аналитика имеет широкий спектр применения в различных отраслях. В розничной торговле предприятия используют геопространственную аналитику для определения оптимальных местоположений различных объектов на основе демографических данных и поведения потребителей. Кроме того, городские планировщики используют геопространственную аналитику для проектирования эффективных транспортных систем и эффективного управления землепользованием [1, 13, 19].

Геопространственная аналитика играет важную роль в процессах принятия решений в различных секторах. Предоставляя пространственный контекст для данных, организации могут лучше понимать последствия своих решений. Например, государственные учреждения могут использовать геопространственную аналитику для эффективного распределения ресурсов при планировании своей деятельности на различные периоды времени, в то время как предприятия могут оптимизировать цепочки поставок, анализируя географические факторы. Этот подход, основанный на данных, улучшает стратегическое планирование и операционную эффективность [8, 9, 15].

Анализ процесса геопространственной динамики территорий и принятие оперативных решений затрудняются сложностью оценки их основных факторов и эффективности принимаемых решений. Руководящим органам иногда приходится действовать в условиях острого дефицита достоверных данных и времени. Так, точность среднесрочных прогнозов составляет 65–70%. Это может привести к принятию нерацио-

нальных и даже ошибочных решений, а следовательно, и к большим потерям. Поэтому совершенствование систем информационного обеспечения, ориентированных на прогноз и предупреждение неконтролируемой геопространственной динамики территорий, имеет особенно большое значение [10, 13, 15].

Для разработки модели процесса мониторинга геопространственной динамики территорий применен метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС), описанный в [14]. В отличие от сетевого метода ТПСС позволяет вычислить не только среднее время реализации, но и вероятность возникновения КПС в определенный момент [7, 8, 9]. Моделируемый процесс имеет четко выраженную последовательность шагов для достижения цели и, если будет установлен факт реализации определенного шага, то оценку необходимо будет производить по сдвигу результата вперед на время реализации шагов. Это позволит выявить окончательное время реализации процесса, что даст возможность с более высокой достоверностью представить происходящее событие. Получение интервальной оценки позволит уйти от точечных оценок, полученных при произвольных законах распределения частных случайных процессов.

Требуется определить функцию распределения времени возможной оценки реализации процесса геопространственной динамики территорий.

Решение. Последовательность возможных событий при мониторинге процесса геопространственной динамики территорий приведена в табл. 1. Стохастическая сеть, отображающая возможную последовательность событий при мониторинге процесса геопространственной динамики территорий, представлена на рис. 1 [12].

Для первых узлов ветвей сети показано выполненное преобразование Лапласа, имеющее следующий вид:

$$a_{01}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} \cdot d[A(t)] = \frac{a_{01}}{a_{01} + s}.$$

Аналогичные преобразования производятся для остальных ветвей сети:

$$\begin{aligned} &a_1(s) \dots a_8(s), b_1(s) \dots b_6(s), c_1(s) \dots c_8(s), \\ &d_1(s) \dots d_4(s), e_1(s) \dots e_{11}(s), \\ &f_1(s) \dots f_{37}(s), g_1(s) \dots g_{11}(s), (s). \end{aligned}$$

Данная стохастическая сеть является достаточно сложной. Поэтому с целью определения эквивалентной функции стохастической сети произведем ее последовательное укрупнение с введением новых параметров. Результатом первичного укрупнения является стохастическая сеть, представленная на рис. 2.

Преобразования Лапласа функций распределения времени реализации композиционных частных

**Последовательность возможных событий при мониторинге процесса
геопроостранственной динамики территорий**

№, п/п	Наименование мероприятия	Обозначение функции времени реализации и функции распределения
1.	Подготовка и проведение заседания государственных управляющих структур	$\bar{t}_{A_0}, A_0(t)$
2.	Разработка и доведение документов в министерствах, управлениях и агентствах	$\bar{t}_{A_1}, \bar{t}_{B_1}, \bar{t}_{C_1}, \bar{t}_{D_1}, \bar{t}_{F_1}, \bar{t}_{G_1}, A_1(t), B_1(t), C_1(t), D_1(t), F_1(t), G_1(t)$
3.	Подготовка и проведение мероприятий по целевому финансированию региона	$\bar{t}_{A_2}, A_2(t), \bar{t}_{A_3}, A_3(t), \bar{t}_{A_4}, A_4(t), \bar{t}_{A_5}, A_5(t), \bar{t}_{A_6}, A_6(t), \bar{t}_{A_7}, A_7(t), \bar{t}_{A_8}, A_8(t)$
4.	Подготовка и проведение мероприятий по подготовке объектов народного хозяйства	$\bar{t}_{B_2}, B_2(t), \bar{t}_{B_3}, B_3(t), \bar{t}_{B_4}, B_4(t), \bar{t}_{B_5}, B_5(t), \bar{t}_{B_6}, B_6(t)$
5.	Подготовка мероприятий по усилению социального мониторинга региона	$\bar{t}_{C_2}, C_2(t), \bar{t}_{C_3}, C_3(t), \bar{t}_{C_4}, C_4(t), \bar{t}_{C_5}, C_5(t), \bar{t}_{C_6}, C_6(t), \bar{t}_{C_7}, C_7(t), \bar{t}_{C_8}, C_8(t), \bar{t}_{D_2}, D_2(t), \bar{t}_{D_3}, D_3(t), \bar{t}_{D_4}, D_4(t)$
6.	Подготовка и задействование дополнительной системы информационного обеспечения региона	$\bar{t}_{F_2}, \bar{t}_{F_3} \dots \bar{t}_{F_7}, F_2(t), F_3(t) \dots F_7(t)$ $\bar{t}_{F_8}, \bar{t}_{F_9} \dots \bar{t}_{F_{13}}, F_8(t), F_9(t) \dots F_{13}(t)$ $\bar{t}_{F_{14}}, \bar{t}_{F_{15}} \dots \bar{t}_{F_{19}}, F_{14}(t), F_{15}(t) \dots F_{19}(t)$ $\bar{t}_{F_{20}}, \bar{t}_{F_{21}} \dots \bar{t}_{F_{25}}, F_{20}(t), F_{21}(t) \dots F_{25}(t)$ $\bar{t}_{F_{26}}, \bar{t}_{F_{27}} \dots \bar{t}_{F_{31}}, F_{26}(t), F_{27}(t) \dots F_{31}(t)$ $\bar{t}_{F_{32}}, \bar{t}_{F_{33}} \dots \bar{t}_{F_{37}}, F_{32}(t), F_{33}(t) \dots F_{37}(t)$
7.	Отдание распоряжений по оперативному мониторингу геопроостранственной динамики территорий региона	$\bar{t}_{G_2}, G_2(t), \bar{t}_{G_3}, G_3(t), \bar{t}_{G_4}, G_4(t), \bar{t}_{G_5}, G_5(t), \bar{t}_{G_6}, G_6(t), \bar{t}_{G_7}, G_7(t), \bar{t}_{G_8}, G_8(t), \bar{t}_{G_9}, G_9(t), \bar{t}_{G_{10}}, G_{10}(t), \bar{t}_{G_{11}}, G_{11}(t), \bar{t}_{E_1}, E_1(t)$
8.	Подготовка и проведение совещания региональных руководителей	$\bar{t}_{E_2}, E_2(t), \bar{t}_{E_3}, E_3(t), \bar{t}_{E_4}, E_4(t), \bar{t}_{E_5}, E_5(t), \bar{t}_{E_7}, E_7(t)$
9.	Подготовка и отдание распоряжений по созданию системы резервной связи	$\bar{t}_{E_6}, E_6(t), \bar{t}_{E_8}, E_8(t)$
10.	Непосредственное задействование системы оперативного мониторинга геопроостранственной динамики территорий	$\bar{t}_{E_9}, E_9(t), \bar{t}_{E_{10}}, E_{10}(t), \bar{t}_{E_{11}}, E_{11}(t)$

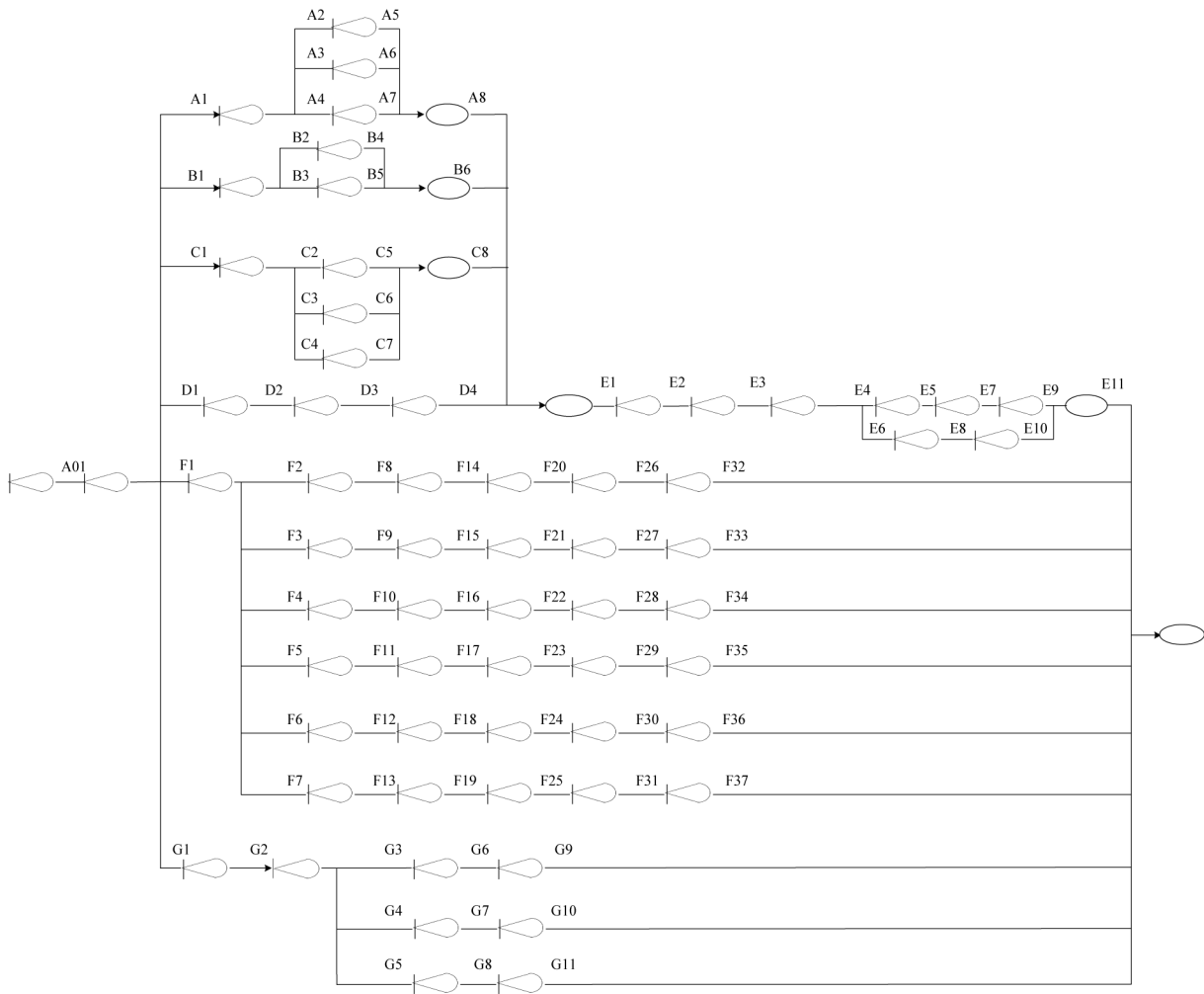


Рис. 1. Стохастическая сеть, отображающая возможную последовательность событий при мониторинге процесса геопространственной динамики территорий

процессов, имеющих следующие параметры распределений:

$$\begin{aligned}
 a_{01} &:= A_{01}^{-1}; \quad a_1 := A_1^{-1}; \quad a_{11} := (A_2 + A_5)^{-1}; \quad a_{12} := (A_3 + A_6)^{-1}; \\
 a_{13} &:= (A_4 + A_7)^{-1}; \quad a_{14} := \left[\frac{1}{3} (A_{11} + A_{12} + A_{13}) \right]^{-1}; \\
 b_1 &:= B_1^{-1}; \quad b_{11} := (B_2 + B_4)^{-1}; \quad b_{12} := (B_3 + B_5)^{-1}; \\
 c_1 &:= C_1^{-1}; \quad c_{11} := (C_2 + C_5)^{-1}; \quad c_{12} := (C_3 + C_6)^{-1}; \\
 c_{13} &:= (C_4 + C_7)^{-1}; \quad c_{14} := \left[\frac{1}{3} (C_{11} + C_{12} + C_{13}) \right]^{-1}; \\
 d_1 &:= (D_1 + D_2 + D_3 + D_4)^{-1}; \\
 e_{11} &:= (E_1 + E_2 + E_3 + E_4)^{-1}; \quad e_{12} := (E_5 + E_7 + E_9)^{-1}; \\
 e_{13} &:= (E_6 + E_8 + E_{10})^{-1}; \\
 f_{40} &:= \left[\frac{1}{6} (F_2 + F_8 + F_{14} + F_{20} + F_{26} + F_{32}) \right]^{-1}; \\
 f_{41} &:= \left[\frac{1}{6} (F_3 + F_9 + F_{15} + F_{21} + F_{27} + F_{33}) \right]^{-1};
 \end{aligned}$$

$$f_{42} := \left[\frac{1}{6} (F_4 + F_{10} + F_{16} + F_{22} + F_{28} + F_{34}) \right]^{-1};$$

$$f_{43} := \left[\frac{1}{6} (F_5 + F_{11} + F_{17} + F_{23} + F_{29} + F_{35}) \right]^{-1};$$

$$f_{44} := \left[\frac{1}{6} (F_6 + F_{12} + F_{18} + F_{24} + F_{30} + F_{36}) \right]^{-1};$$

$$g_{15} := (G_1 + G_2)^{-1}; \quad g_{16} := \left[\frac{1}{3} (G_3 + G_6 + G_9) \right]^{-1};$$

$$g_{17} := \left[\frac{1}{3} (G_4 + G_7 + G_{10}) \right]^{-1}; \quad g_{18} := \left[\frac{1}{3} (G_5 + G_8 + G_{11}) \right]^{-1},$$

где:

$$A_1 = \frac{1}{t_{a1}}, \dots, A_8 = \frac{1}{t_{a8}}; \quad B_1 = \frac{1}{t_{b1}}, \dots, B_6 = \frac{1}{t_{b6}};$$

$$C_1 = \frac{1}{t_{c1}}, \dots, C_8 = \frac{1}{t_{c8}}; \quad D_1 = \frac{1}{t_{d1}}, \dots, D_4 = \frac{1}{t_{d4}}; \quad E_1 = \frac{1}{t_{e1}}, \dots,$$

$$E_{11} = \frac{1}{t_{e11}}; \quad F_1 = \frac{1}{t_{f1}}, \dots, F_{37} = \frac{1}{t_{f37}};$$

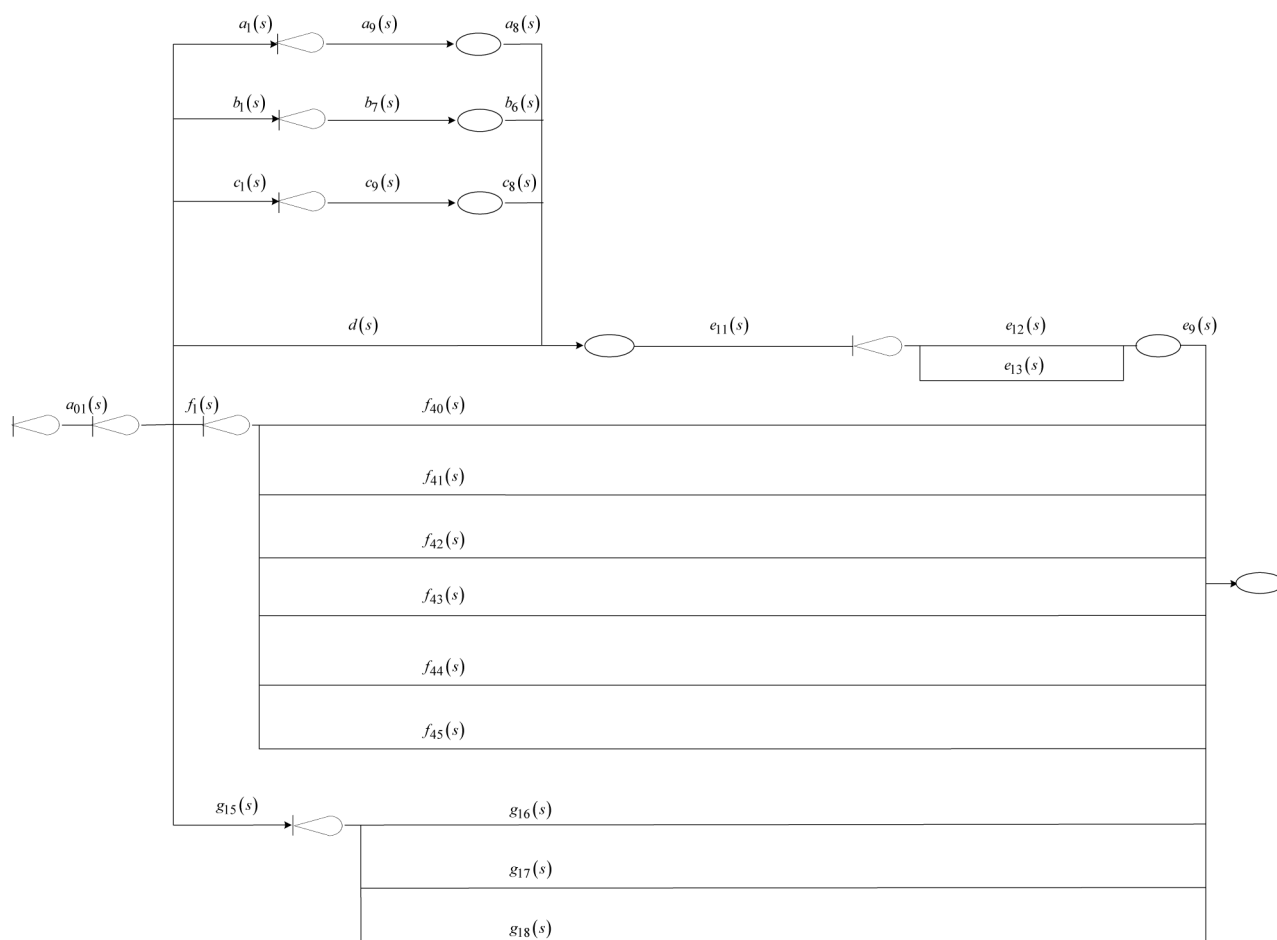


Рис. 2. Результат первичного укрупнения стохастической сети

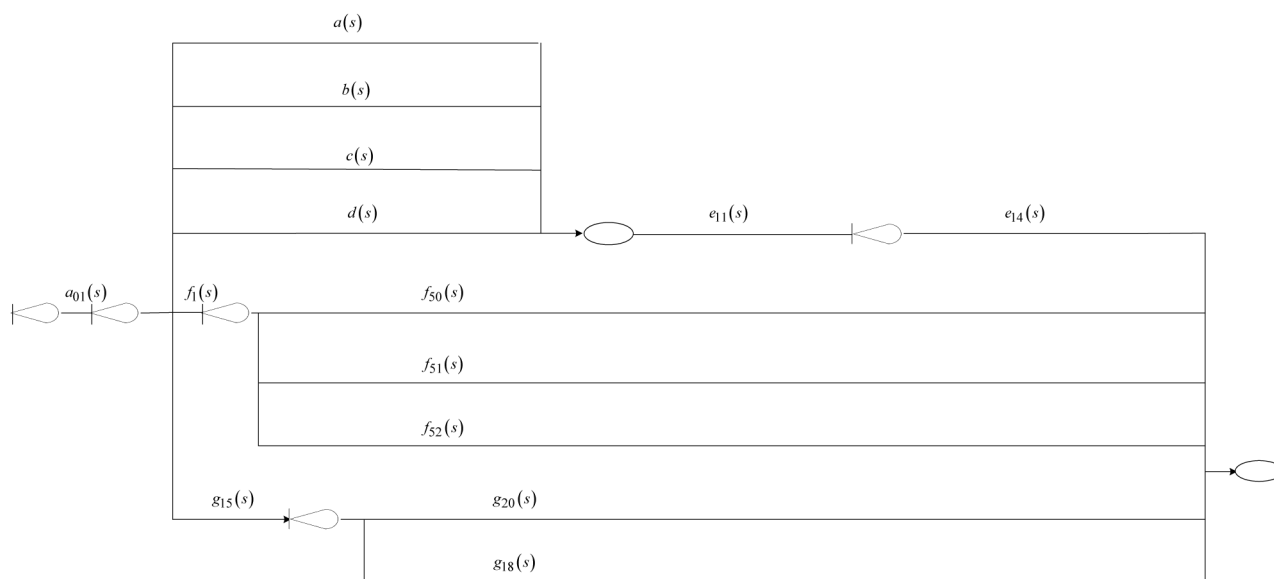


Рис. 3. Результат вторичного укрупнения стохастической сети

$G_1 = \frac{1}{t_{g1}}, \dots, G_{11} = \frac{1}{t_{g11}}$ – имеют смысл интенсивностей реализации событий, отображаемых соответствующими ветвями сети.

Вторичное укрупнение осуществляется путем попарного объединения ветвей с учетом вновь введенных обозначений. После несложных преобразований получим параметры ветвей стохастической сети, представленной на рис. 3.

Ветви полученной сети преобразуются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{4}(a1 + a14 + a8); \quad b = \frac{1}{4}(b1 + b14 + b6); \\ c15 &= \frac{1}{4}(c1 + c14 + c8); \quad e15 = \frac{1}{4}\left(e11 + \frac{1}{2}(e12 + e13)\right); \\ f50 &= \left[\frac{f40^2 + f40 \cdot f41 + f41^2}{f40 \cdot f41(f40 + f41)} \right]^{-1}; \\ f51 &= \left[\frac{f42^2 + f43 \cdot f42 + f43^2}{f42 \cdot f43(f42 + f43)} \right]^{-1}; \\ f52 &= \left[\frac{f44^2 + f45 \cdot f44 + f45^2}{f44 \cdot f45(f44 + f45)} \right]^{-1}; \\ g20 &= \left[\frac{g16^2 + g17 \cdot g16 + g17^2}{g16 \cdot g17(g16 + g17)} \right]^{-1}. \end{aligned}$$

Аналогично попарное объединение ветвей сети (рис. 3) приводит сеть к виду, показанному на рис. 4, в которой ветви характеризуются параметрами:

$$\begin{aligned} f55 &= \left[\frac{f50^2 + f50 \cdot f51 + f51^2}{f50 \cdot f51(f50 + f51)} \right]^{-1}; \\ k &= \left[\frac{a^2 + a \cdot b + b^2}{a \cdot b(a + b)} \right]^{-1}; \quad l = \left[\frac{c15^2 + c15 \cdot d + d^2}{c15 \cdot d(c15 + d)} \right]^{-1}; \\ g21 &= \left[\frac{g20^2 + g18 \cdot g20 + g18^2}{g20 \cdot g18(g20 + g18)} \right]^{-1}. \end{aligned}$$

Дальнейшее попарное объединение ветвей сети, отображенное на рис. 4, приводит сеть к виду, показанному на рис. 5, в которой ветви характеризуются следующими параметрами:

$$\begin{aligned} f56 &= \left[\frac{f55^2 + f52 \cdot f55 + f52^2}{f55 \cdot f52(f55 + f52)} \right]^{-1}; \quad m1 = \left[\frac{k^2 + k \cdot l + l^2}{k \cdot l(k + l)} \right]^{-1}; \\ n &= \left[\frac{(m1 + e15)}{(m1 \cdot e15)} \right]^{-1}; \quad g22 = \left[\frac{(g21 + g15)}{(g21 \cdot g15)} \right]^{-1}. \end{aligned}$$

Очередное преобразование сети заключается в попарном объединении ветвей сети, отображенной на рис. 5, позволит получить сеть (рис. 6), в которой ветви характеризуются параметром:

$$o = \left[\frac{g22^2 + g22 \cdot f56 + f56^2}{g22 \cdot f56(g22 + f56)} \right]^{-1}; \quad p = \left[\frac{n^2 + n \cdot o + o^2}{n \cdot o(n + o)} \right]^{-1}.$$

Дальнейшее преобразование сети:

$$r = p^{-1} + a01^{-1}.$$

Результатом дальнейшего укрупнения стохастической сети является сеть, представленная на рис. 7.

Объединяя ветви $a_{01}(s)$ и $p(s)$, получим стохастическую сеть, состоящую из двух последовательно соединенных ветвей, первая из которых характеризуется параметром $a_{01}(s)$, а вторая – $p(s)$.

$$\rho = \left[\frac{\phi^2 + \phi \times \pi + \pi^2}{\phi \times \pi(\phi + \pi)} \right]^{-1}.$$

Эквивалентная функция сети, представленной на рис. 7, имеет вид:

$$Q(s) = \frac{a_1 \cdot \rho}{(a_1 + s)(\rho + s)}.$$

Определение эквивалентной функции позволяет вычислить среднее время реализации процесса и функцию распределения:

$$\begin{aligned} T_{\text{ср}} &= \frac{d[Q(s)]}{d[Q(t)]} = \frac{a_{01} \cdot \rho}{(\rho - a_{01})a_{01}^2} + \frac{a_{01} \cdot \rho}{(a_{01} - \rho)\rho^2}; \\ TR(t) &= \frac{1}{2\pi j} \int_{\alpha - j\infty}^{\alpha + j\infty} Q(s) \cdot \frac{\exp(st)}{s} ds = \\ &= \frac{\rho(1 - \exp(-a_{01} \cdot t))}{(\rho - a_{01})a_{01}} + \frac{a_{01}(1 - \exp(-\rho \cdot t))}{(a_{01} - \rho)\rho}. \end{aligned}$$

Проведены расчеты процесса возможной геопроостранственной динамики территорий и оценки уровня их развития к определенному времени с момента получения прогноза. Результаты расчетов показывают, что среднее время развития процесса находится в интервале времени 12,1–22,6 суток при благоприятных условиях развития; 32,6–43,4 суток при частичном воздействии мешающих факторов, и при этом значения определены используемыми для расчетов исходными данными и также имеют интервальный характер. Результаты расчетов процесса геопроостранственной динамики территорий и оценки уровня их реализации к опреде-

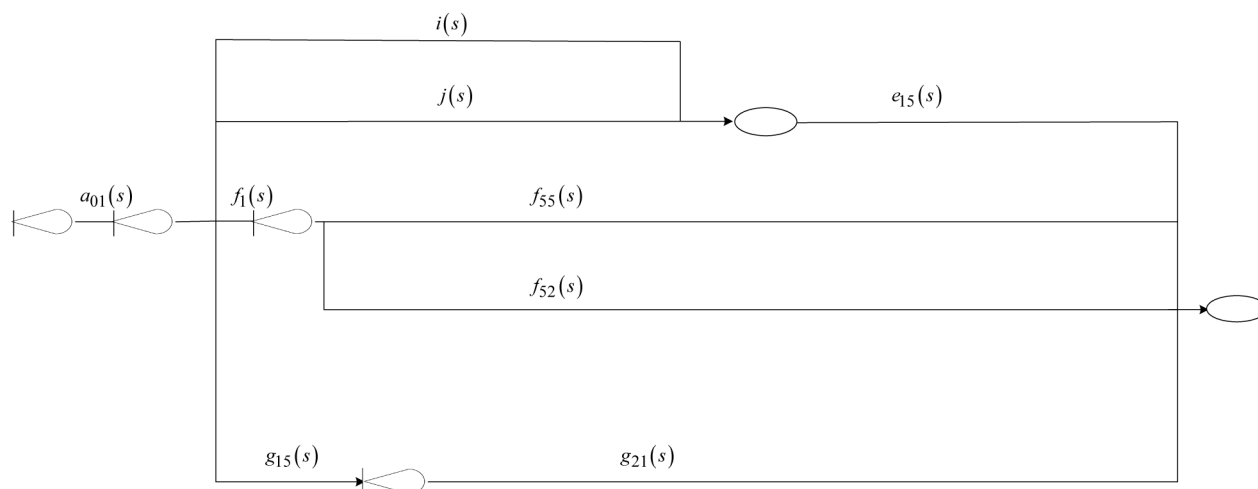


Рис. 4. Результат третьего укрупнения стохастической сети

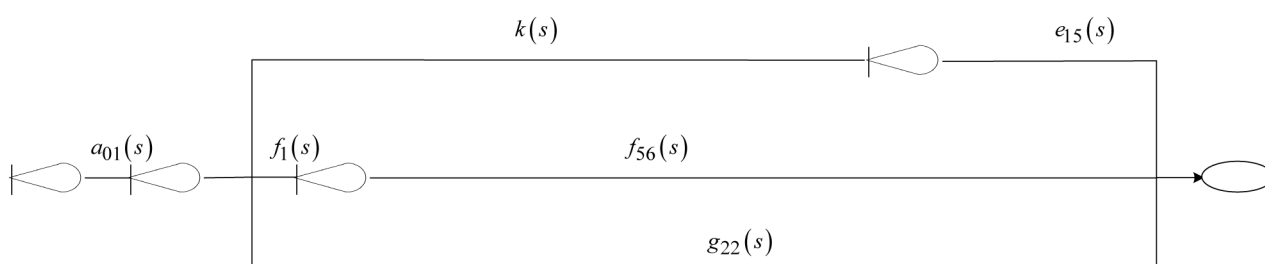


Рис. 5. Результат четвертого укрупнения стохастической сети

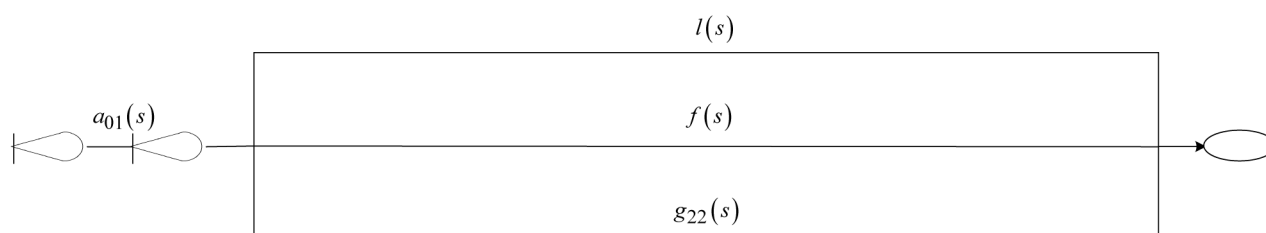


Рис. 6. Результат пятого укрупнения в стохастической сети

ленному времени с момента получения прогноза приведены на рис. 9.

Величины времен частных процессов, используемые в качестве исходных данных, получены на этапе промежуточного моделирования, анализа инфраструктуры региона с учетом особенностей его развития при мониторинге геопространственной динамики территорий.

Исследования полученного графика функции распределения показали:

1. Функция является непрерывной, неотрицательной, возрастающей.
2. Поскольку функция является непрерывной, то предел функции равен ее значению в конкретной точке.
3. Наибольшее возрастание значений функции (эталонной) при одинаковом интервале дискретизации происходит при значениях аргумента на временном интервале 0–10 суток при значениях функции, равных 0,05–0,52 для минимального времени реализации процесса (предельного перехода) при угле наклона графика 78° . Наибольшее возрастание значений функции (эталонной) при одинаковом временном интервале дискретизации происходит при значениях аргумента на временном интервале 0–16 суток при значениях функции, равных 0,02–0,48 для максимального времени реализации процесса (воздействия

различных факторов) при угле наклона графика 61° .

При мешающих действиях на втором варианте графика функции распределения наибольшее возрастание значений функции (эталонной) при одинаковом интервале дискретизации происходит при значениях аргумента на временном интервале 0–15 суток при значениях функции, равных 0,05–0,32 для минимального времени реализации процесса (предельного перехода) при угле наклона графика 64° . Наименьшее возрастание значений функции (эталонной) при одинаковом временном интервале дискретизации происходит при значениях аргумента на временном интервале 0–20 суток при значениях функции, равных 0,02–0,32 для максимального времени реализации процесса (воздействии различных факторов) при угле наклона графика 56° .

4. Наименьшее возрастание значений функции (эталонной) при одинаковом интервале дискретизации происходит при значениях аргумента на временном интервале 70–100 суток при значениях функции, равных 0 для минимального времени реализации процесса (предельного перехода), при воздействии мешающих факторов, при значениях функции, равных 0,84–0,9 для максимального времени реализации процесса.

5. Дисперсия функции распределения имеет минимальное значение на временном интервале 70–100 суток при значениях ее функции, равных 0,01 для

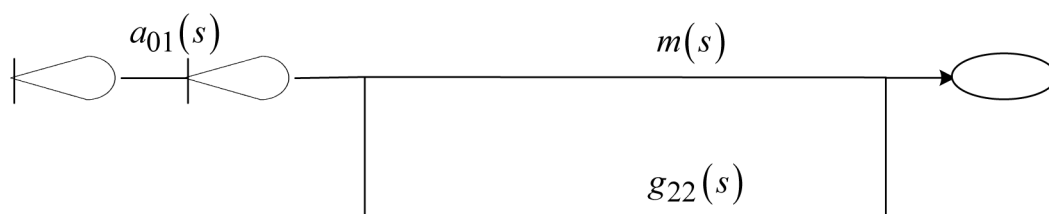


Рис. 7. Результат шестого укрупнения в стохастической сети

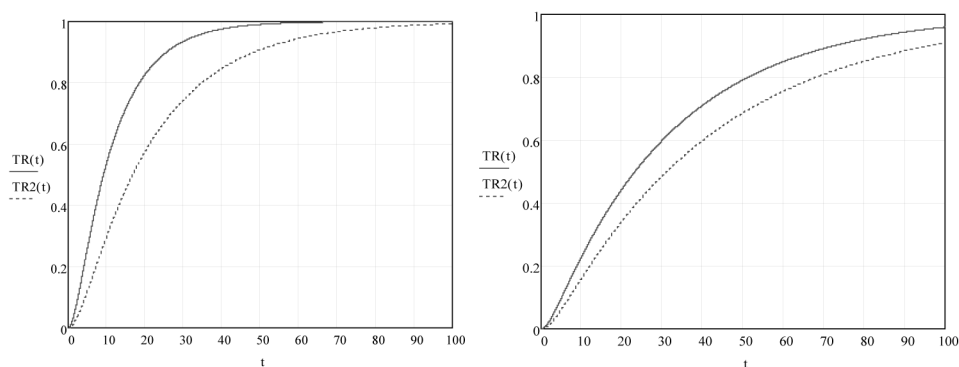


Рис. 9. Результаты расчетов мониторинга процесса геопространственной динамики территорий

максимального времени реализации процесса (идет проведение исполнительных мероприятий и непосредственная подготовка к нежелательной геопространственной динамике). Дисперсия функции распределения имеет максимальное значение на временном интервале 10–20 суток при значениях ее функции, равных 0,029 для максимального времени реализации процесса (идет проведение подготовительных мероприятий к нежелательной геопространственной динамике).

Анализ результатов, полученных в ходе моделирования, показал, что:

- результат хорошо согласуется со статистическими данными, полученными в ходе системного анализа;
- разработанная модель является работоспособной, чувствительной к изменению используемых исходных данных, адекватно отображает события мониторинга геопространственной динамики территорий и позволяет определить вероятностно-временные характеристики моделируемого события;

Полученные в ходе моделирования значения среднего времени реализации геопространственной динамики территорий позволяют проводить оценку влияния различных элементов сети на возможность снижения воздействия нежелательных факторов и качественно оценить уровень их влияния на определенном временном интервале от момента получения прогноза, которое может отразиться на принятии правильного управленческого решения.

Литература

1. Афанасьев, В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – Москва : Финансы и статистика, 2010. – 320 с.
2. Большаков, А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов / А.А. Большаков, Р.Н. Каримов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 522 с.
3. Вагизов, М. Р. Истомин Е.П. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (Часть 2) / М.Р. Вагизов, Е.П. Истомин // Геоинформатика. – 2022. – № 1. – С. 40–46.
4. Глобальная система геопространственных статистических данных / Департамент по экономике и вопросам. – Нью-Йорк : Объединенные нации, 2019. – 59 с.
5. ГОСТ РВ 51987-2002. Информационная технология. Комплекс стандартов на АС. Типовые требования и показатели качества функционирования информационных систем. – Москва : Госстандарт России, 2002. – 11 с.
6. Карпик, А. П. Развитие геопространственной деятельности в России: стратегические направления и первоочередные задачи / А.П. Карпик, Д.В. Лисицкий, И.А. Мусихин // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84, № 12. – С. 49–58.
7. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – Москва : Наука, 1991. – 432 с.
8. Месарович, М. Теория многоуровневых иерархических систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – Москва : Мир, 1973. – 344 с.
9. Новицкий, Н. И. Сетевое планирование и управление производством / Н.И. Новицкий. – Москва : Новое знание, 2004. – 159 с.
10. Карманов, А. Г. Геоинформационные системы территориального управления / А.Г. Карманов, А.И. Кнышев, В.В. Елисеева. – Санкт-Петербург : ИТМО, 2015. – 129 с.
11. Колесов, В. А. Математическая модель подготовки к применению системы комплексного геоинформационного мониторинга окружающего пространства / В.А. Колесов, А.А. Привалов // Информация и Космос. – 2023. – № 1. – С. 126–137.
12. Колесов, В. А. Обобщенный алгоритм прогнозирования региональной чрезвычайной ситуации природного характера / В.А. Колесов, А.А. Привалов // Информация и Космос. – 2022. – № 2. – С. 76–85.
13. Павлов, В. С. Применение гибридного алгоритма искусственного интеллекта в прогнозировании геопространственных данных / В.С. Павлов, С.С. Колмогорова // Информация и Космос. – 2024. – № 1. – С. 151–158.
14. Привалов, А. А. Метод ТПСС и его использование для анализа систем связи ВМФ / А.А. Привалов. – Санкт-Петербург : ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 2001. – 168 с.
15. Филлипс, Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – Москва : Мир, 1984. – 496 с.
16. Динамические знания в геоинформатике (К вопросу о решении пространственно-временных ситуаций на местности) / А.В. Флегонтов, В.Н. Смирнов, И.М. Рутько [и др.] // Информация и Космос. – 2024. – № 1. – С. 108–113.
17. Цветков, В. Я. Геоинформационные исследования при разработке прогнозов / В.Я. Цветков, Ф.Н. Лещиков // Геодезия и картография. – 2001. – № 2. – С. 42–44.
18. Цветков, В. Я. Пространственное моделирование в геоинформатике / В.Я. Цветков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4-3. – С. 646.
19. Янкевич, С. С. Разработка теории и методик картографирования территорий на основе геопространственных знаний : автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук / Янкевич Светлана Сергеевна; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Москва, 2024. – 48 с.