Для цитирования: В.В. Грызунов. Модель геоинформационной системы FIST, использующей туманные вычисления в условиях дестабилизации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 76-89. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-76-89

For citation: V.V. Gryzunov. Fist geoinformation system model using fog computing in destabilization. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 76-89. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-76-89

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.27+004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-76-89

МОДЕЛЬ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ FIST, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТУМАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ

В.В. Грызунов

Российский государственный гидрометеорологический университет,
195027, г. Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д. 3, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования состоит в разработке модели геоинформационной системы, функционирующей в условиях дестабилизации, а также показатели, оценивающие способность геоинформационной системы выполнять свои функции в условиях дестабилизации. **Метод.** Геоинформационные системы (ГИС) становятся неотъемлемой частью почти всех информационных систем, систем принятия решения. Методы исследования основаны на детерминированной или стохастической модели дестабилизации, однако для ГИС характерна нестохастическая модель. **Результат.** Показано, что любая задача существует в геоинформационной системе в виде расхода четырёх типов производительности: вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода. На основе этого разработана модель геоинформационной системы (FIST - Full Infrastructure of Sources Toolkit), позволяющая оценить «запас прочности» геоинформационной системы, выражающийся в доступной производительности всех четырёх типов. Модель учитывает элементы разной степени мобильности и производительности и пригодна для описания классических, облачных и туманных геоинформационных систем. Приведён пример работы модели в условиях дестабилизации. Сформулирована и доказана теорема о независимости событий, состоящих в решении задач, для любого ориентированного графа. На основе модели предложены интегральный и дифференциальный показатели эффективности. Интегральный показатель характеризует долю решаемых задач за интервал времени, дифференциальный – «запас производительности». **Вывод.** Разработанная модель и показатели эффективности могут применяться при проектировании новых и оценивании существующих геоинформационных систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ), проект 08/2020.

Ключевые слова: геоинформационная система, туманные вычисления, информационная безопасность, показатели эффективности

FIST GEOINFORMATION SYSTEM MODEL USING FOG COMPUTING IN DESTABILIZATION

V. V. Gryzunov

Russian State Hydrometeorological University,
3 Metallistov Ave., Saint Petersburg 195027, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to develop a model of a geoinformation system functioning in destabilization, as well as indicators that assess the ability of a geoinformation system to perform its functions in destabilization. **Methods.** Geographic information systems are becoming

ing an integral part of almost all information and decision-making systems. The research methods are based on a deterministic or stochastic model of destabilization, but the geographic information system is characterized by a non-stochastic model. **Results.** It is shown that any task exists in the geoinformation system in the form of consumption of four types of performance: computers, storage devices, communication channels, input/output devices. Based on this, a model of the geoinformation system (FIST – Full Infrastructure of Sources Toolkit) was developed, which allows evaluating the "margin of safety" of the geoinformation system, expressed in the available performance of all four types. The model considers elements of different degrees of mobility and performance and is suitable for describing classical, cloud, and fog geoinformation systems. An example of the model operation in destabilization is given. A theorem on the independence of events of solving problems for any directed graph is formulated and proved. Based on the model, integral and differential efficiency indicators are proposed. The integrated indicator characterizes the share of tasks solved over a time interval; the differential indicator characterizes the "performance margin." **Conclusion.** The developed model and performance indicators can be used to design new and evaluate existing geographic information systems.

Acknowledgments. The reported study was funded by Russian Ministry of Science (information security), project № 08/2020.

Keywords: geoinformation system, fog computing, information security, performance indicators

Введение. Практически все современные направления человеческой деятельности нуждаются в геоинформационных системах (ГИС): «умные» города, системы безопасности и раскрытия преступлений [1], системы предупреждения травм [2], промышленные системы, переходящие на Индустрию 4.0 [3], космический мониторинг [4] и т.д., то есть жизни и здоровье большого количества людей, экономическое процветание компаний и государств попали в зависимость от того, насколько ГИС решает поставленные задачи точно и в срок.

Это привело к тому, что, во-первых, ГИС столкнулись с проблемой ввода и обработки больших неструктурированных данных в реальном масштабе времени, во-вторых, ГИС стали объектом злоумышленных действий. Всё обозначенное дестабилизирует работу ГИС, то есть нарушает такой аспект информационной безопасности как доступность, и ставит вопрос о том, насколько эффективна ГИС в условиях дестабилизации.

Постановка задачи. Цель исследования состоит в разработке модели ГИС, функционирующей в условиях дестабилизации, и предложить показатели, описывающие способности ГИС адаптироваться к дестабилизации.

Обычно вопросы доступности решают с помощью резервирования и балансировки нагрузки. Однако скорость прироста пользователей и задач настолько велика, что централизованными способами вопросы доступности решить не представляется возможным по причине большой стоимости решений и появления новых рисков. Так, например, от метеокомплексов ожидается прирост поставляемых данных больше, чем в 200 раз [5], а метеообстановка – лишь один из нескольких сотен слоёв современной ГИС.

От проблем централизованной и облачной обработки данных свободны туманные вычисления, которые активно разрабатываются компаниями CISCO, Microsoft, Intel и другими [6].

Методы исследования. Применение туманных вычислений для решения проблем ГИС и предоставления услуг ГИС в модели Fog-as-a-Service исследовалось многими авторами. Так, например, в [7] рассматривают ГИС через призму Web-приложения, но оставляют за скобками программно-аппаратные платформы, в [8] делают акцент на задержке обработки запросов к геопространственным данным и снижении энергопотребления, то есть решают частную задачу. Исследователи в работе [9] используют статистические оценки для определения надёжности узла тумана (fog node) и назначают узел в два этапа: выбор кластера тумана и выбор узла тумана, который способен выполнить задачу, упускают из виду ситуацию, когда объём требуемого ресурса не может быть предоставлен одним узлом, но может быть собран из нескольких узлов меньшего объёма.

Существующие модели ГИС, построенные на базе туманных вычислений, не позволяют оценить эффективность адаптации к дестабилизации и имеют следующие ограничения:

- ориентированы на один-два типа ресурса ГИС: вычислители или каналы связи;

— основаны на детерминированной или стохастической модели дестабилизации, однако для ГИС в общем случае характерна нестохастическая модель, т.к. имеет место агрессивная целенаправленная среда функционирования [10].

Рассмотрим модель ГИС свободную от указанных недостатков и предложим показатели эффективности адаптации ГИС к дестабилизации, вызванной как увеличением потока решаемых задач, так и действиями злоумышленников.

Любая ГИС как информационная система представляется в виде четырёх типов ресурсов: вычислителей (C), каналов связи (L), памяти (Sp), устройств ввода/вывода (Tr) $\{C, L, Sp, Tr\}$ [11].

Соответственно, каждый тип ресурса имеет свою производительность и свои единицы измерения $\{\omega_C \in \Omega_C, \omega_L \in \Omega_L, \omega_{Sp} \in \Omega_{Sp}, \omega_{Tr} \in \Omega_{Tr}\}$: Floating-point Operations Per Second (FLOPS), ГГц, бит/с, листы/минуту, frames per seconds (FPS) и др. Чтобы ГИС решала поставленные задачи, необходимо иметь в наличии все типы производительностей.

Аксиома необходимости.

$$\Omega > 0 \Leftrightarrow ((\Omega_C \neq 0) \wedge (\Omega_L \neq 0) \wedge (\Omega_{Sp} \neq 0) \wedge (\Omega_{Tr} \neq 0)) = 1$$

При этом сведение к нулю любого из типов производительности достаточно, чтобы вывести из строя всю ГИС.

Достаточное условие полной потери работоспособности ГИС (следствие аксиомы).

$$\Omega = 0 \Rightarrow ((\Omega_C = 0) \vee (\Omega_L = 0) \vee (\Omega_{Sp} = 0) \vee (\Omega_{Tr} = 0)) = 1$$

Здесь не имеет значение, каким образом утрачен тип производительности: по причине разрушения вычислителей, каналов связи, устройств ввода/вывода, накопителей ГИС, либо в силу переизбытка задач. В любом случае возникает ситуация, при которой текущей производительности недостаточно $\Omega < \Omega^{Треб}$.

Под *требуемой производительностью* ($\Omega^{Треб}$) будем понимать производительность, которая нужна задаче, чтобы выполняться в заданное время с заданной точностью. *Текущей производительностью* (Ω) обозначим производительность, которая доступна в текущий момент времени в геоинформационной системе и может быть выделена задаче.

Производительность $\Omega^{ГИС}$ – это производительность всей ГИС и измеряется количеством задач K , решённых ГИС за заданное время T .

$$\Omega^{ГИС} = \frac{K}{T} \quad (1)$$

Поскольку ГИС представлена в виде набора производительностей, то логично представить решаемые задачи также через набор производительностей. Дополнительно следует отметить, что у каждой k -й задачи ($0 \leq k \leq K^*$) есть время (t^k) и точность (δ^k), с которыми она должна быть решена, а также допустимые отклонения по времени (Δt^k) и точности ($\Delta \delta^k$). Используя допустимые отклонения, можно в экстренной ситуации сократить требования к ресурсам в несколько раз [12].

$$\langle \{\Omega_C^k(t), \Omega_L^k(t), \Omega_{Sp}^k(t), \Omega_{Tr}^k(t)\}, t^k, \Delta t^k, \delta^k, \Delta \delta^k \rangle ,$$

где

$k = \overline{1, K^*}$, K^* – количество поставленных перед ГИС задач,

$\Omega_C^k(t), \Omega_L^k(t), \Omega_{Sp}^k(t), \Omega_{Tr}^k(t)$ – необходимые для k -й задачи производительности вычислителей, каналов связи, памяти, устройств ввода/вывода.

Удобно описывать информационно-управляющие зависимости задач ориентированным графом G , дуги которого характеризуют направление передачи управляющих воздействий и информационных сигналов, а вершины – решаемые задачи. Интуитивно кажется, что в случае с информационными и управляющими зависимостями задач друг от друга, событие, состоящее в том, что k -я задача будет решена, также зависит от решения других задач. Однако это не так. На самом деле события являются независимыми для любого ориентированного графа G . Понимание этого факта существенно упрощает оценивание эффективности ГИС через её производительность.

Теорема. Пусть дан ориентированный граф G , отражающий зависимости между задачами. Тогда события, состоящие в решении задач, являются независимыми для любого ориентированного графа.

Допущение. ГИС является динамической системой [13], то есть ситуация в момент времени t не влияет на ситуацию в моменты $t-1, t-2, \dots$ (ситуация в моменты времени $t+1, t+2, \dots$ не влияет на ситуацию в момент t).

Доказательство. Возьмём произвольный сегмент графа из двух вершин. Все возможные варианты связей на этом графе сводятся к четырём случаям (рис.1.):

Рис.1. Варианты взаимосвязей задач

Fig.1. Task relationship options

1. Сегмент несвязен. Независимость событий друг от друга очевидна.

2. Задача A предшествует задаче B .

Вероятность совместного решения задач A и B находится по формуле

$$P(AB) = P(A)P(B/A) = P(B)P(A/B).$$

Поскольку мы допустили, что задача B никак не влияет на решение задачи A , то

$$P(A/B) = P(A), \text{ отсюда следует, что}$$

$$P(A)P(B/A) = P(B)P(A).$$

При условии, что $P(A) \neq 0$, сократим обе части равенства на $P(A)$, в результате $P(B/A) = P(B)$,

следовательно, события «решение задачи B » и «решение задачи A » независимы, что и требовалось доказать.

3. Задача B предшествует задаче A . Независимость событий доказывается аналогично случаю 2.

4. Задача B с задачей A и задача A связана с задачей B . Поскольку приведённые на графе задачи взаимосвязаны, значит, они выполняются одна за другой. Поэтому случай 4 представляется как последовательность случаев 2 и 3, для которых независимость задач уже доказана.

Вариант с двумя вершинами произвольного графа G легко распространяется на любое количество вершин. В силу того, что в доказательстве использовался произвольный сегмент, считаем теорему доказанной.

С учётом независимости задач построим модель ГИС.

Модель ГИС. Современная ГИС включает в себя активные и пассивные элементы, способные в разной степени влиять на её конфигурацию. Если элементы способны изменять конфигурацию ГИС или перемещаться в пространстве, то это – активные элементы: мобильные телефоны, ноутбуки, мобильные серверы, метеозонды, беспилотные аппараты и т.д., и активное сетевое оборудование: свитчи, роутеры, модемы и т.д. Остальные элементы ГИС назовём пассивными.

В работе ГИС условно можно выделить два режима: штатный и в условиях дестабилизации.

Модель ГИС в штатном режиме. Поскольку ГИС имеет в своём составе активные элементы, и основана на туманных вычислениях (fogcomputing), то её структура и функции изменяются во времени, то есть изменяется объект управления. Это вносит дополнительную сложность в управление ресурсами (fognodes), потому что перед выдачей управляющих воздействий необходимо провести процедуру идентификации объекта управления.

Управлять туманными вычислениями централизованно довольно сложно, поэтому имеет смысл изучить варианты децентрализации управления: посредством создания иерархии или делегирование некоторых функций управления. ГИС обычно располагается на территории разных государств и выполняет задачи, конкурирующие друг с другом, а значит делегирование управления сталкивается с рядом организационных проблем. Поэтому остановимся на создании иерархии в управлении [14]. В работе [15] доказывается преимущество иерархических систем перед плоскими.

Система управления – это сочетание объекта управления и управляющего элемента [16]. В ГИС явно присутствуют две страты:

1. Страта-сервис. Пользователи используют ГИС именно как сервис, предоставляющий им услуги. Назовём эту страту уровнем программного обеспечения (уровнем ПО, УПО).

2. Физические элементы ГИС – это уровень физической структуры (уровень ФС, УФС). Вектор v характеризует текущее состояние элемента УФС

$$v = [v_x, v_r, v_y, v_\omega, v_v, v_s, v_l]^T,$$

где v_x – текущее положение элемента в пространстве-времени;

v_r – местонахождение элементов, с которыми есть физическая связь;

v_y – местонахождение элементов, с которыми есть логическая связь;

v_ω – текущие производительности элемента УФС $\{\omega_c^B, \omega_{sp}^B, \omega_{tr}^B, \omega_l^B\}$;

v_v – скорости перемещения элемента в пространстве;

v_s – энергозапас (измеряется ёмкостью энергетических частей или временем активного существования);

v_l – число связей, потенциально образуемых элементом УФС.

Вектор v имеет ограничения $v: v \leq v^*$.

Пользователи оценивают эффективность ГИС по тому, насколько удовлетворяет их ожидания и потребности страта-сервис, т.е. через уровень ПО: работоспособность слоёв ГИС, специальных трекинговых программ, систем построения аналитических отчётов и т.п., т.е. сколько задач способна решить ГИС за отведённое время.

Физические элементы, относящиеся к уровню ФС характеризуются «тактовой частотой», «средней пропускной способностью канала», «количеством точек на дюйм» и др. Очевидно, отсутствует уровень, где показатели УФС транслируются в показатели УПО. Добавим этот уровень и определим его как уровень логической структуры ГИС (уровень ЛС, УЛС).

На уровне ЛС создаётся виртуальная структура [17], состоящая из пулов ресурсов (fognodes), требуемых для решения задач УПО: транков, кластеров и др. Элементы уровня ФС создают физическую структуру, которая «вмещает в себя» виртуальные пулы. Метауровнем в ГИС является уровень ФС. Он задаёт требуемые пространственно-временные состояния уровню ЛС. УЛС, в свою очередь, выступает метауровнем для уровня ПО и формирует его множество требуемых пространственно-временных состояний. Влияние метауровней и «вложенных» уровней друг на друга проанализировано в работе [18].

Главной функцией УПО является выполнение пользовательских задач с требуемой точностью за требуемое время, то есть отображение множества ресурсов, доступных уровню ПО, во множество пользовательских задач:

$$f^{УПО}: \{ \langle C, \omega_C \rangle, \langle Sp, \omega_{sp} \rangle, \langle Tr, \omega_{tr} \rangle, \langle L, \omega_L \rangle \} \rightarrow K.$$

Задача решается только на конкретных физических устройствах, то есть на уровне ФС, поэтому для удовлетворения потребностей пользователя уровень ПО запрашивает необходимый физический ресурс, но не непосредственно, а через уровень ЛС (рис.2).

Получив запрос на ресурс от уровня ПО, уровень ЛС преобразует требования к производительности уровня ПО (объекты в час, запросы в секунду, размер слоя ГИС и т.д.) в показатели, характерные для физических устройств (точки на дюйм, ГГц, GFLOP, Гбайт и т.п.) и запрашивает ресурсы на уровне ФС. Уровень ФС должен предоставить ресурс. Если запрашиваемого ресурса в наличии нет, то уровень ЛС работает с тем, что есть, и пытается сформировать пул, с производительностью, запрошенной уровнем ПО:

$$f^{УЛС} = [f_c^{УЛС}, f_{sp}^{УЛС}, f_{tr}^{УЛС}, f_l^{УЛС}]^T$$

$$f_c^{УЛС}: \{ \langle C^B, \omega_C^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle C, \omega_C \rangle \},$$

$$f_{sp}^{УЛС}: \{ \langle Sp^B, \omega_{sp}^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle Sp, \omega_{sp} \rangle \},$$

$$f_{tr}^{УЛС}: \{ \langle Tr^B, \omega_{tr}^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle Tr, \omega_{tr} \rangle \},$$

$$f_l^{УЛС}: \{ \langle L^B, \omega_L^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle L, \omega_L \rangle \},$$

где

$\{ \langle C^B, \omega_C^B \rangle \}$, $\{ \langle Sp^B, \omega_{sp}^B \rangle \}$, $\{ \langle L^B, \omega_L^B \rangle \}$, $\{ \langle Tr^B, \omega_{tr}^B \rangle \}$ – соответственно множества вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода и их производительности на уровне ФС;

$\{<C, \omega_C>\}, \{<Sp, \omega_{Sp}>\}, \{<L, \omega_L>\}, \{<Tr, \omega_{Tr}>\}$ – соответственно, множества пулов, созданные из вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода и их производимости на уровне ЛС;

$f_C^{УЛС}, f_{Sp}^{УЛС}, f_L^{УЛС}, f_{Tr}^{УЛС}$ – функции, отображающие множества физических ресурсов в образованные пулы, соответственно, для вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода;

Рис. 2. Уровни геоинформационной системы в модели FIST и связи между ними

Fig.2. The geographic information system levels in the FIST model and the relationship between them

$V^0, V, \Delta V$ – начальное и текущее множество элементов физического уровня и его изменение; Ψ – дестабилизация уровня (подробнее ниже в статье).

Дополнительно уровень ЛС решает задачи по преобразованию одного типа ресурсов (типа производительности) в другой. Например, сырые данные метеодатчиков, загружаемые в ГИС требуют 10 Мбод от канала связи и процессора 1ГГц на 20 секунд. Но если данные предварительно обработать на самом датчике, то требования изменятся: 2 Мбод канала связи и процессор 1,5 ГГц на 120 секунд. При этом энергозапас датчика расходуется быстрее, чем в работе с сырыми данными.

Чтобы иметь возможность преобразовать один тип производительности в другой, необходимо выявить соответствующие закономерности. На сегодня известны некоторые из них.

$$\begin{cases} \Omega^{УЛС} \leq \sum_{i=1}^N \omega_i & \text{Элементы соединены параллельно} \\ \Omega^{УЛС} \leq \min_{i=1, N}(\omega_i) & \text{элементы соединены последовательно} \end{cases} \quad (2)$$

Если ресурсы в пуле каналов связи или вычислителей соединены параллельно, то общая производительность пула не превосходит сумму производительностей всех элементов пула. Если – последовательно, то общая производительность пула равна худшей производительности элемента.

Пул с требуемой физической производительностью уровень ЛС формирует путём выдачи команд на перемещение/ коммутацию элементов уровня ФС.

Главное назначение уровня ФС заключается в распределении в пространстве-времени физической производительности таким образом, чтобы уровень ЛС получил возможность собрать пул с требуемой производительностью:

$$f^{УФС} = [f_C^{УФС}, f_{Sp}^{УФС}, f_{Tr}^{УФС}, f_L^{УФС}]^T$$

$$f_C^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle C^B, \omega_C^B \rangle, v'_\omega \},$$

$$f_{Sp}^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle Sp^B, \omega_{Sp}^B \rangle, v'_\omega \},$$

$$f_{Tr}^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle Tr^B, \omega_{Tr}^B \rangle, v'_\omega \},$$

$$f_L^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle L^B, \omega_L^B \rangle, v'_\omega \},$$

где

v' – новое состояние элемента УФС;

$f_C^{УФС}, f_{Sp}^{УФС}, f_L^{УФС}, f_{Tr}^{УФС}$ – функции, распределяющие в пространстве-времени, соответственно, физические ресурсы вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода.

Согласно введённому выше определению, корректировать своё положение в пространстве и изменять конфигурацию ГИС способны только активные элементы. Такие изменения подробно изучаются в теории киберфизических, голономных систем [19] и описываются дифференциальными уравнениями движения, радиофизики, электротехники, оптики и др.

В случаях, когда физический ресурс не может быть распределён требуемым образом в пространстве, данные об этом передаются уровню ЛС. Уровень ЛС пытается собрать из других элементов новый пул, имеющий требуемую производительность.

Если и новый пул не может быть собран, то уровень ЛС выбирает пул, имеющий наибольшую производительность, и передаёт уровню ПО. Уровень ПО решает задачи пользователя, исходя из доступных ресурсов, при необходимости используя допустимые для задач погрешности [12].

Приведём пример моделирования беспилотной системы обнаружения и реагирования военной морской базы ВМФ (UDRS), поставляющей данные об охраняемом периметре в ГИС корабля в реальном масштабе времени.

Пусть необходимо патрулировать внешний периметр в 5000 км беспилотной группой (БГ). Активные элементы моделируемой системы: беспилотные летательные аппараты (БПЛА) типа «Орлан 10» и пассивные элементы – пульта управления БПЛА (ПУ) [20].

Состав БГ включает 4 БПЛА и 1 ПУ. БПЛА могут ретранслировать сигналы друг друга в ПУ. Начальные векторы состояний элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Начальные векторы состояний элементов

Начальный вектор состояния V_{0}^{HP} БГ	Начальный вектор состояния V_{0}^{TV} ПУ
$v_x = [0; 0]$ – текущее положение $v_r = [-; -]$ – местонахождение элементов, с которыми есть физическая связь $v_y = [-; -]$ – координаты элементов, с которыми связан логически v_ω – текущие производительности $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 200 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [100 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – максимальная и текущая скорость перемещения $v_s = 18 \text{ ч}$ – энергетические запасы БПЛА $v_l \leq 4-3$ соединения с БПЛА из БГ, и одно для подключения к ПУ	$v_x = [0; 0]$ – текущее положение $v_r = [-; -]$ – местонахождение элементов, с которыми есть физическая связь $/v_x - v_r / \leq 120 \text{ км}$ – ограничения на удалённость БПЛА $v_y = [-; -]$ – координаты элементов, с которыми связан логически v_ω – текущие производительности $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 800 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [0 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – максимальная и текущая скорость перемещения $v_s = \infty$ – энергетические запасы ПУ $v_l \leq 5$ – максимальное допустимое количество БПЛА, подключаемых к ПУ, равно 4 и одно подключение к серверу

Table 1. Initial vectors of elements states

Initial state vector V_{0}^{HP} unmanned group	Initial state vector V_{0}^{TV} remote control
$v_x = [0; 0]$ – current position $v_r = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a physical connection $v_y = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a logical connection v_ω – current performance $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 200 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [100 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – maximum and current travel speed $v_s = 18 \text{ ч}$ – энергетические запасы БПЛА $v_l \leq 4-3$ connections with UAVs of unmanned group, and one for connection for remote control	$v_x = [0; 0]$ – current position $v_r = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a physical connection $/v_x - v_r / \leq 120 \text{ км}$ – limits on the distance of the UAV $v_y = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a logical connection v_ω – current performance $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 800 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [0 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – maximum and current travel speed $v_s = \infty$ – энергетические запасы ПУ $v_l \leq 5$ – the maximum allowable number of UAVs connected to the remote control is 4 and one connection to the server

Информация о ходе патрулирования передаётся на ПУ. Длина периметра 5000км (рис.3). Время патрулирования $T=10$ ч. Трансляция изображения должна быть не хуже 200км/0,5ч, чтобы обеспечить требуемую точность локализации нарушителя периметра.

БГ летят один за другим. Чтобы покрыть защищаемый периметр в 5000км с учётом ограничения на максимальное расстояние «Орланов» до ПУ $v_1 \leq 120$ км, требуется $5000/120 \approx 42$ комплекта БГ.

Количество комплектов можно сократить, переместив ПУ в центр окружности. Тогда расстояние до ПУ в 120км будет максимально допустимым радиусом окружности (диаметр 240км). Следовательно, для патрулирования необходимо $5000/240 \approx 21$ комплект БГ.

Количество решаемых задач $K=1$. Считаем, что $\omega_c^B = 1,6$ ГГц, $\omega_{sp}^B = 1$ Гб, $\omega_l^B = 11$ Мб/с достаточно для решения поставленных задач, поэтому опишем задачу так:

$$K = \{ \langle \omega^k = \omega_{Tr}^{Треб} = 200 \text{ км/0,5ч}, t^k = 10 \text{ ч}, \Delta t^k = 0, \delta^k = 5 \text{ м}, \Delta \delta^k = \pm 1 \text{ м} \rangle \}$$

Пользователь на срок $t^k = 10$ ч через УПО требует ресурс $\omega_{Tr}^{Треб} = 400$ км/ч. УЛС транслирует уровню ФС запрос на срок $t^k = 10$ ч ресурса $\omega_{Tr}^{B, Треб} = 200$ км/0,5ч.

Однако, согласно исходным данным, такого ресурса нет в наличии. УФС имеет только $\omega_{Tr}^B = 200$ км/ч на больший срок $t = 18$ ч. УФС имеет 4 БПЛА в комплекте с таким ресурсом. Данные об этом возвращаются уровню ЛС. На уровне ЛС делается вывод о том, что для решения поставленной задачи необходим пул ресурсов. Учитывая (2), для предоставления $\omega_{Tr}^{Треб} = 200$ км/0,5ч необходимо объединение в пул двух БПЛА. УЛС формирует пул из имеющихся БПЛА, удовлетворяющий запрос пользователя, закладывает данные об этом в БГ. БГ начинает работу согласно заложенной программе, реализуемой собственной системой управления.

Рис.3. Моделирование UDRS
 Fig.3. UDRS modeling

Модель ГИС в условиях дестабилизации. С точки зрения управления ГИС представляется как объект, имеющий функции (терминальная модель), или как объект, обладающий структурой (графовая модель). Поэтому дестабилизация ГИС (Ψ), возникающая в ходе эксплуатации, связана с разрушением функций (Ψ_F) или структуры ГИС (Ψ_S). Сформулируем это утверждение в виде аксиомы.

Аксиома дестабилизации. Дестабилизация Ψ влияет только на функции Ψ_F и/или структуру Ψ_S ГИС:

$$\Psi = \Psi_F \cup \Psi_S.$$

Обратим внимание, что в модели FIST ничего не говорится о причинах дестабилизации. Значение имеют только последствия.

Все возможные варианты дестабилизации описаны в документе [21]. Согласно модели FIST, дестабилизация классифицируется по уровням ГИС $\Psi = \{\Psi^{УПО}, \Psi^{УФС}, \Psi^{УЛС}\}$ следующим образом (рис. 2):

1. Дестабилизация уровня ПО $\Psi^{УПО} = \Psi_S^{УПО} \cup \Psi_F^{УПО}$: атаки типа Slowloris, применение exploits, умышленный или нет запуск вредоносного программного кода пользователями, создание избыточного потока задач и т.д. Дестабилизация выражается в изменении распределения задач по ресурсам, изменяется количество решённых задач $\Psi_S^{УПО} = \{\Delta f^{УПО}, \Delta K\}$.
2. Дестабилизация уровня ЛС $\Psi^{УЛС} = \Psi_S^{УЛС} \cup \Psi_F^{УЛС}$: нарушение штатного режима функционирования ГИС путём перегрузки созданных пулов (fognodes), сбои в системе управления пулами, разрушение самих пулов с помощью программных или программно-аппаратных средств и т.п. Возможно изменение в структуре пулов $\Psi_S^{УЛС} = \{\Delta f^{УЛС}, \Delta\{C, Sp, Tr, L\}\}$ и в их функциональной части – производительности $\Psi_F^{УЛС} = \{\Delta\omega_c, \Delta\omega_{sp}, \Delta\omega_{tr}, \Delta\omega_l\}$.
3. Дестабилизация уровня ФС $\Psi^{УФС} = \Psi_S^{УФС} \cup \Psi_F^{УФС}$: выход из зоны видимости мобильных элементов ГИС, использование технических средств для несанкционированного доступа, паразитное электромагнитное излучение, потоки отказов или сбоев оборудования, хищение элементов ГИС и т.п., то есть имеет место вывод из строя элементов ГИС, разрушение каналов связи $\Psi_S^{УФС} = \{\Delta f^{УФС}, \Delta\{C^B, Sp^B, Tr^B, L^B\}\}$. С точки зрения функций дестабилизация проявляется в изменении векторов состояний $\Psi_F^{УФС} = \{\Delta V\}$.

Обсуждение результатов. На приведённом выше примере с патрулированием периметра рассмотрим работу модели FIST.

В примере пользователь поставил перед ГИС единственную задачу: патрулирование периметра. Следовательно, зависимости задач между отсутствуют, и $\Psi_S^{УПО}$ ограничено только структурным разрушением программного обеспечения, управляющего БГ.

$\Psi_F^{УПО}$ может возникнуть, например, если появятся данные о новом более быстром объекте, нарушающем периметр, что потребует увеличения до $\omega_{Tr}^{Треб}$ с 200км/0,5ч до 200км/0,25ч. Адаптация ГИС к дестабилизации в данном случае состоит в создании на уровне ЛС нового пула с большей разрешающей способностью. Это потребует изменить состояния элементов уровня ФС: количество БПЛА и порядок их следования.

В том случае, если по каким-то злоумышленным или естественным причинам (компьютерные вирусы, действия диверсионно-разведывательных групп, естественный отказ каналов связи и пр.) некоторые БПЛА будут выведены из строя $\Psi_S^{УЛС} = \{\Delta f^{УЛС}\}$, $\Psi_F^{УЛС} = \{\Delta\omega_l\}$, придётся создавать новые пулы, чтобы сохранить требования пользователей (требования уровня ПО) к производительности.

$\Psi_F^{УФС}$ возникает, когда злоумышленник установит генератор помех, изменяющий $\omega_l^B \ll 11 \text{ Mb/s}$. В результате нарушится передача снятого изображения с БПЛА в ПУ, что проявится на уровне ЛС в виде разрушения пула, и точность обнаружения упадёт. Один из вариантов адаптации к дестабилизации заключается в переносе некоторых частей обработки изображения на борт БПЛА, что сократит требования к каналу передачи данных и позволит сохранить качество обнаружения.

Поскольку ГИС, использующая туманные вычисления, имеет много элементов, то существует большое количество возможных структур ГИС и вариантов адаптации к дестабилизации.

ции. Живучесть неоднородных структур и выбор оптимальной структуры рассмотрены в [22]. Для выбора варианта адаптации необходим соответствующий показатель эффективности.

Известные показатели эффективности, характеризующие стоимость системы [23], снижение рисков информационной безопасности [24] мало говорят о том, пригодна ГИС для решения поставленных задач или нет. Показатели, оптимизирующие надёжность структуры, вероятность безотказной работы [25] или средние времена восстановления [11], частично отвечают на вопрос о пригодности структуры ГИС решать задачи, но они упускают функциональные возможности, требуют время на проведение статистических испытаний и не могут рассчитываться в реальном масштабе времени.

Все приведённые показатели не учитывают тот факт, что структура ГИС изменяется во времени. Некоторые авторы даже вводят дополнительный механизм, запрещающий элементам ГИС (fognodes) выходить из структуры и прекращать вычисления в одностороннем порядке [26].

Предложим показатели свободные от названных недостатков. Будем отталкиваться от того факта, что дестабилизация ГИС является угрозой и работа с ней состоит из трёх этапов: формирование угрозы, распознавание угрозы, устранение угрозы [27].

Интегральный показатель эффективности. Пусть события, состоящие в решении задач, являются независимыми (см. теорему выше). Введём интегральный показатель эффективности P , показывающий, какая часть поставленных задач решена за заданное время T .

$$P = \frac{K}{K^*}, \quad (3)$$

где K^* – количество поставленных перед ГИС задач,

K – количество решённых ГИС задач.

Согласно определению, производительность Ω – это количество задач K , выполненных за интервал времени Δt :

$$K(\Delta t) = \Omega(\Delta t) \Delta t. \quad (4)$$

Выражение (4) подставим в (3) и устремим $\Delta t \rightarrow 0$. Просуммировав по всем интервалам, получим общий вид показателя:

$$P(t) = \frac{\int_0^t \Omega(z) dz}{\int_0^T \Omega^*(z) dz}, \quad (5)$$

где Ω – текущая производительность,

Ω^* – производительность, необходимая поставленной задаче (требуемая производительность/требуемый ресурс),

T – время, за которое задачи ГИС должны быть решены.

t – текущее время,

Основные свойства интегрального показателя:

1. $P(0)=0$;
2. $P(t) \in [0;1]$, так как $0 \leq K \leq K^*$;
3. $P(t)$ – неубывающая монотонная функция.

Не дожидаясь, пока закончится отведённое для выполнения задач время, через интегральный показатель эффективности видно, насколько ГИС справляется с решением поставленных задач. Для этого достаточно замерить текущую производительность, например, командой *TOP*, и соотнести результаты с развёрнутыми во времени требованиями к производительности, предъявляемыми задачами.

Дифференциальный показатель эффективности ГИС. Текущая производительность ГИС обычно оценивается через загрузку ресурсов в единицу времени, и замеряется за опреде-

лённые временные интервалы Δt_i ($i=1, n$, где n – количество интервалов, прошедших с начала работы ГИС до текущего момента времени t). Интервалы имеют примерно одинаковый размер, поэтому опустим индекс i в обозначении интервала $\Delta t_i = \Delta t$ и в выражении (5) перейдём от интеграла к сумме Римана.

$$P(\Delta t) = \frac{\sum \Omega(\Delta t) \Delta t}{\sum \Omega^*(\Delta t) \Delta t} = \frac{\Delta t \sum \Omega(\Delta t)}{\Delta t \sum \Omega^*(\Delta t)}. \quad (6)$$

Сократив на Δt , получим дифференциальный показатель μ , отражающий «запас производительности», ГИС, то есть ресурс, который может быть выделен решаемой задаче.

$$\mu = \frac{\sum \Omega(\Delta t)}{\sum \Omega^*(\Delta t)}.$$

Когда $\mu < 1$, то в ГИС нехватка производительности, а значит, существует риск не уложиться в заданное время при выполнении поставленных задач.

При $\mu = 1$, ГИС функционирует штатно. Если $\mu > 1$, то ГИС обладает резервом производительности и может взять дополнительные задачи. В примере с UDRS для ω_{Tr}^B без дестабилизации до формирования пула $\mu = 200/200 * 0,5 = 0,5$, что характеризует нехватку производительности и требует создать пул.

Пул, собранный на базе 2 БПЛА из БГ, имеет $\mu = 2 * 200/200 * 0,5 = 1$ – производительности достаточно для решения задач.

Если в пул включить все четыре БПЛА, доступные в БГ, то $\mu = 4 * 200/200 * 0,5 = 2$ – присутствует резерв производительности.

Предложенные показатели с точки зрения теории эффективности обладают особенностями:

- применимы для всех уровней иерархии ГИС: физической и логической структур, уровня программного обеспечения;
- отображают, насколько ГИС пригодна для решения пользовательских задач, в том числе в условиях дестабилизации. Если доступная производительность не меньше требуемой $\Omega \geq \Omega^*$ ($\mu \geq 1$), то ГИС пригодна;
- позволяют оценить, предоставлена ли требуемая производительность в требуемые сроки, а значит, с помощью P и μ оценивается скорость адаптации;
- характеризуют наличие ресурсов («запас прочности»), необходимые для адаптации ГИС.

Отдельно предстоит изучить вопрос о выведении закономерностей, описывающих производительность пулов в зависимости от способов включений элементов, и преобразования одного типа ресурсов в другой. Это позволит обоснованно перераспределять задачи между элементами, назначать задачи ближе к центру ГИС или переносить на границу системы.

Вывод. Предложенная модель ГИС (FIST) описывает предоставление в виде услуги (Fog-as-a-Service) не только вычислительных ресурсов или каналов связи, но и устройств ввода/вывода и накопителей, учитывает влияние дестабилизации на работу ГИС.

Интегральный и дифференциальный показатели эффективности могут использоваться как оптимизируемые показатели в ходе адаптивного управления ГИС в условиях штатного функционирования и дестабилизации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ), проект 08/2020.

Библиографический список:

1. Куделькин В. А. Опыт интеграции распределенных информационных систем / Куделькин В. А., Денисов Ф. В. // ИТ Стандарт, 2017. № 1. С. 24–30.
2. Winchell R. J. Comparing geographic information system-based estimates with trauma center registry data to assess the effects of additional trauma centers on system access / R. J. Winchell, J. Broecker, A. J. Kerwin, B. Eastridge, M. Crandall // Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 2020. Vol. 89, Issue 6. pp. 1131–1135. DOI 10.1097/TA.0000000000002943.
3. Столетов О. В. Геоинформационное сопровождение средиземноморской ветви Шелкового пути / О. В. Столетов, И. А. Чихарев, О. А. Москаленко, Д. В. Маковская // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2019. Т. 25, № 1. С. 102–113. DOI 10.35595/2414-9179-2019-1-25-102-113.
4. Burlov V. Development of a model for the management of environmental safety of the region, taking into account of the GIS capacity / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov // MATEC Web of Conferences, 2018. 02038 p. DOI 10.1051/mateconf/201819302038.
5. Грызунов В. В. Структура живучей сети метеоконфлюэтов транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» / В. В. Грызунов, А. О. Нестерова // Гидрометеорология и экология, 2020. № 59, С. 111–123. DOI 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123.
6. IEEE Standard Association et al. IEEE 1934-2018-IEEE standard for adoption of open-fog reference architecture for fog computing, 2018.
7. Panidi E. Fog computing perspectives in connection with the current geospatial standards / E. Panidi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2017. Vol. 42. pp. 171–174.
8. Das J. Spatio-Fog: A green and timeliness-oriented fog computing model for geospatial query resolution / J. Das, A. Mukherjee, S. K. Ghosh, R. Buyya // Simulation Modelling Practice and Theory, 2020. – Vol. 100. – P. 102043.
9. Sun Y. Multi-objective optimization of resource scheduling in fog computing using an improved NSGA-II / Y. Sun, F. Lin, H. Xu // Wireless Personal Communications, 2018. Vol. 102. № 2. pp. 1369–1385. – DOI 10.1007/s11277-017-5200-5.
10. Грызунов В. В. Модель целенаправленных агрессивных действий на информационно-вычислительную систему / В. В. Грызунов // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах (Эрго-2018) : Труды Третьей международной научно-практической конференции / под ред. А. Н. Анохина [и др.]. 2018. С. 300–305.
11. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем / В. Г. Хорошевский. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 520 с.
12. Грызунов В. В. Методика решения измерительных и вычислительных задач в условиях деградации информационно-вычислительной системы / В. В. Грызунов // Вестник СибГУТИ, 2015. № 1. С. 35–44.
13. Калинин В. Н. Теоретические основы системных исследований : краткий авторский курс лекция для адъюнктов академии / В. Н. Калинин. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. – 278 с.
14. Месарович М. Теория многоуровневых иерархических систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
15. Chekired D. A. Industrial IoT data scheduling based on hierarchical fog computing : A key for enabling smart factory / D. A. Chekired, L. Khokhi, H. T. Mouftah // IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018. Issue 14, № 10. pp. 4590–4602. DOI 10.1109/TII.2018.2843802.
16. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем / Цыпкин Я. З. М. : Наука, 1977. 560 с.
17. Монахов О. Г. Параллельные системы с распределенной памятью : структуры и организация взаимодействий / О. Г. Монахов, Э. А. Монахова. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. – 242 с.
18. Грызунов В. В. Аналитическая модель целостной информационной системы / В. В. Грызунов // Доклады ТУСУР, 2009. – №1 (19), ч. 1. – С. 226–230.
19. Добронравов В. В. Основы механики неголономных систем / В. В. Добронравов. М. : Высшая школа, 1970. 270 с.
20. Комплекс беспилотной воздушной разведки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dfnc.ru/katalog-vooruzhenij/bpla/orlan-10> (дата обращения 20.11.2020).
21. ГОСТ Р 51275-2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/1200057516> (дата обращения 20.11.2020).
22. Грызунов В.В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С.28-35.
23. Файзуллин Р. В. Методика формирования допустимых вариантов организационного состава и структуры автоматизированной системы управления кибербезопасностью [Электронный ресурс] / Р. В. Файзуллин, Ш. Херинг, К. А. Василенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2020. Т. 8, № 1 (28). – С. 39–40. Режим доступа : https://moit.vivt.ru/wpcontent/uploads/2020/02/FaizullinSoavtors_1_20_1.pdf (дата обращения 27.08.2020). DOI 10.26102/2310-6018/2020.28.1.025.
24. Селифанов В. В. Показатель эффективности управления защитой информации в геоинформационных системах / В. В. Селифанов и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 10. С. 176–181.
25. Мельник Э. В. Применение концепции "туманных" вычислений при проектировании высоконадежных информационно-управляющих систем / Э. В. Мельник, А. Б. Клименко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020. № 2. С. 273–283.
26. Jia B. Double-matching resource allocation strategy in fog computing networks based on cost efficiency / B. Jia et al. // Journal of Communications and Networks, 2018. Iss. 20, № 3. pp. 237–246. DOI 10.1109/JCN.2018.000036.
27. Burlov V. System integration of security maintenance processes in knowledge management / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov, N. Somga-Bichoga // Proceedings of the European Conference on Knowledge Management, ECKM, 2018. pp. 112–122.

References:

1. Kudelkin V. A. Opyt integratsii raspredelennykh informatsionnykh sistem / V. A. Kudelkin, V. F. Denisov [Experience of integration of distributed information systems] // IT standard, 2017. No. 1. pp. 24–30. (In Russ).
2. Winchell R. J. Comparing geographic information system-based estimates with trauma center registry data to assess the effects of additional trauma centers on system access / R. J. Winchell, J. Broecker, A. J. Kerwin, B. Eastridge, M. Crandall // Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 2020. Vol. 89, Issue 6. pp. 1131–1135. DOI 10.1097/TA.0000000000002943.
3. Stoletov O. V. Geoinformatsionnoye soprovozhdeniye sredizemnomorskoy vetvi Shelkovogo puti / O. V. Stoletov, I. A. Chikharev, O. A. Moskalenko, D. V. Makovskaya [Geoinformation support of the mediterranean branch of the silk road] // InterCarto. InterGis. 2019. Part 25, no. 1. pp. 102–113. DOI 10.35595/2414-9179-2019-1-25-102-113 (In Russ).
4. Burlov V. Development of a model for the management of environmental safety of the region, taking into account of the GIS capacity / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov // MATEC Web of Conferences, 2018. 02038 p. DOI 10.1051/mateconf/201819302038.
5. Gryzunov V. V. Struktura zhivuchey seti meteokompleksov transportno-logisticheskikh sistem «Industrii 4.0» / Gryzunov V. V., Nesterova A. O. [Survivable structure of network of meteorological complexes of transport and logistics systems “industry 4.0”] // Gidrometeorologiya i ekologiya, 2020. No. 59. pp. 111–123. – DOI 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123 (In Russ).
6. IEEE Standard Association et al. IEEE 1934-2018-IEEE standard for adoption of open-fog reference architecture for fog computing, 2018.
7. Panidi E. Fog computing perspectives in connection with the current geospatial standards / E. Panidi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2017. Vol. 42. pp. 171–174.
8. Das J. Spatio-Fog: A green and timeliness-oriented fog computing model for geospatial query resolution / J. Das, A. Mukherjee, S. K. Ghosh, R. Buyya // Simulation Modelling Practice and Theory, 2020. Vol. 100. pp. 102043.
9. Sun Y. Multi-objective optimization of resource scheduling in fog computing using an improved NSGA-II / Y. Sun, F. Lin, H. Xu // Wireless Personal Communications, 2018. Vol. 102. № 2. pp. 1369–1385. DOI 10.1007/s11277-017-5200-5.
10. Gryzunov V. V. Model' tselenapravlennykh agressivnykh deystviy na informatsionno-vychislitel'nyuyu sistemu / V. V. Gryzunov [Model of Purpose Aggressive Actions on the Information-Computing System] // Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO)s and Environments (ERGO). Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8443814> (accessed by 23.08.2020). DOI 10.1109/ERGO.2018.8443814 (In Russ).
11. Horoshevskiy V. G. Arhitektura vychislitel'nykh sistem / V. G. Horoshevskiy [Architecture of computing systems]. M. : MG TU im. N. Ye. Bauman Publ., 2008. 520 p. (In Russ).
12. Gryzunov V. V. Metodika resheniya izmeritel'nykh i vychislitel'nykh zadach v usloviyakh degradatsii informatsionno-vychislitel'noy sistemy / V. V. Gryzunov [Problem solving method of measuring and calculating tasks under conditions of data computing system degradation] // Vestnik SibGUTI, 2015. No. 1. pp. 35–44. (In Russ).
13. Kalinin V. N. Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy : kratkiy avtorskiy kurs lekcij dlya ad`junktov akademii / V. N. Kalinin [Theoretical foundations of system research : a short author's course of lectures for adjuncts of the Academy]. –Spb. : VKA im. A. F. Mozhajskogo Publ., 2011. 278 p. (In Russ).
14. Mesarovich M. Teoriya mnogourovnevnykh ierarhicheskikh sistem / M. Mesarovich, D. Mako, I. Takahara [Theory of multilevel theoretical systems]. M. : Mir Publ., 1973. 344 p. (In Russ).
15. Chekired D. A. Industrial IoT data scheduling based on hierarchical fog computing : A key for enabling smart factory / D. A. Chekired, L. Khokhi, H. T. Mouftah // IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018. Issue 14, no. 10. pp. 4590–4602. DOI 10.1109/TII.2018.2843802.
16. Cypkin Ja. Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem / Ja. Z. Cypkin [Fundamentals of the theory of automatic systems]. – M. : Nauka Publ., 1977. 560 p. (In Russ).
17. Monahov O. G. Parallelnye sistemy s raspredelennoj pam'at'yu : struktury i organizatsiya vzaimodeystviy / O. G. Monahov, Ye. A. Monahova [Parallel systems with distributed memory : structures and organization of interactions]. – Novosibirsk : SO RAN Publ., 2000. 242 p. (In Russ).
18. Gryzunov V. V. Analiticheskaya model' tselostnoy informatsionnoy sistemy / V. V. Gryzunov [The analytical model of the whole information system] // Doklady TUSUR, 2009. No. 1 (19), part 1. pp. 226–230. (In Russ).
19. Dobronravov V. V. Osnovy mehaniki negolonomnykh sistem / V. V. Dobronravov [Fundamentals of mechanics of nonholonomic systems]. – M. : Vysshaya shkola Publ., 1970. 270 p. (In Russ).
20. Kompleks bespilotnoj vozduшной razvedki [Elektronnyy resurs] [Unmanned aerial reconnaissance complex [Electronic resource]]. – Available at : <https://dfnc.ru/katalog-vooruzhenij/bpla/orlan-10> (accessed 20.08.2020) (In Russ).
21. GOST R 51275-2006. Zashhita informacii. Ob`ekt informatizacii. Faktory, vozdeystvuyushhie na informaciyu [Elektronnyy resurs] [GOST R 51275-2006. Information protection. About ect Informatization. Factors affecting information [Electronic resource]]. – Available at : <http://docs.cntd.ru/document/1200057516> (accessed 20.08.2020) (In Russ).
22. Gryzunov V.V. The estimation of the survivability of heterogeneous structure // Vestnik SibGUTI. 2011. № 1. pp.28-35. (In Russ).
23. Fajzullin R. V. Metodika formirovaniya dopustimnykh variantov organizatsionnogo sostava i struktury avtomatizirovannoy sistemy upravleniya kiberbezopasnost'yu [Elektronnyy resurs] / R. V. Fajzullin, Sh. Hering, K. A. Vasilenko [Methodology for the formation of acceptable options for the organizational composition and structure of an automated cybersecurity manage-

- ment system [Electronic resource]] // Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii, 2020. Iss. 8, no. 1 (28). pp. 39–40. Access mode : https://moit.vivt.ru/wpcontent/uploads/2020/02/FaizullinSoavtors_1_20_1.pdf (accessed 27.08.2020). DOI10.26102/2310-6018/2020.28.1.025 (In Russ).
24. Selifanov V. V. Pokazatel' effektivnosti upravleniya zashchitoy informatsii v geoinformatsionnykh sistemakh / V. V. Selifanov et al. [Performance indicator management information protection in geoinformation systems] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2018. No. 10. pp. 176–181. (In Russ).
25. Mel'nik Je. V. Primeneniye kontseptsii "tumannyykh" vychisleniy pri proyektirovanii vysokonadezhnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem / Je. V. Mel'nik, A. B. Klimenko [A fog-computing concept applying for high-reliable management information system design] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2020. No. 2. pp. 273–283. (In Russ).
26. Jia B. Double-matching resource allocation strategy in fog computing networks based on cost efficiency / B. Jia et al. // Journal of Communications and Networks, 2018. Iss. 20, No. 3. pp. 237–246. DOI [10.1109/JCN.2018.000036](https://doi.org/10.1109/JCN.2018.000036).
27. Burlov V. System integration of security maintenance processes in knowledge management / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov, N. Somga-Bichoga // Proceedings of the European Conference on Knowledge Management, ECKM, 2018. pp. 112–122.

Сведения об авторе:

Грызун Виталий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем безопасности, e-mail.ru: viv1313r@mail.ru, ORCID 0000-0003-4866-217X

Information about the author:

Vitaly V. Gryzunov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Information Technologies and Security Systems; e-mail.ru: viv1313r@mail.ru, ORCID 0000-0003-4866-217X

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.01.2021.

Принята в печать 27.02.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 28.01.2021.

Accepted for publication 27.02.2021.