

ПРИМЕНЕНИЕ НАБОРОВ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ РЕШЕНИЙ

Я. А. Ивакин^{1*}, С. Н. Потапычев¹

¹ СПИИРАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

* Адрес для переписки: ivakin@oogis.ru

Аннотация

Современные средства интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов с применением цифровых картографических наборов данных не в должной мере позволяют оперативно и с достаточной степенью адекватности учитывать изменяющиеся свойства природной среды, влияющие на диспетчерские решения, принимаемые при управлении сложно распределенными совокупностями геопространственных процессов. При этом диспетчеризация есть итоговое проявление многогранного процесса управления геопространственными процессами. **Предмет исследования.** Традиционно задача управления объектами, реализующими геопространственные процессы, решается в отрыве от учета текущего состояния природной среды их протекания, без учета изменчивости ее радиотехнических, физических и др. характеристик. Учету подлежат исключительно вопросы изменений навигационных и метеорологических условий, в части вопросов, касающихся обеспечения пространственной безопасности. Значительный интерес в современных условиях представляет более сложный вариант задачи диспетчеризации пространственных процессов: когда изменчивость среды определяет уникальные условия для диспетчеризации в каждой точке координированного географического пространства. **Метод.** Такая постановка задачи подразумевает её решение путем внедрения современных адаптивных средств мониторинга и зондирования природной среды, как подсистем наблюдения соответствующих систем диспетчеризации пространственных процессов. **Основные результаты.** Метод решения этого варианта задачи заключается в слиянии данных предметной области представления пространственных процессов с данными, соответствующими типовым моделям цифровых наборов данных, интеграции программных механизмов работы с информацией о геопространственных процессах и программ работы с картографическими наборами данных. **Практическая значимость.** Разработка обоснованной постановки и метода решения указанного варианта задачи найдет свое применение при создании комплексных систем автоматизации диспетчерских центров управления геопространственными процессами. Представления существа указанной задачи и метода её решения составляет существо данной статьи.

Ключевые слова

Геопространственные данные, многоуровневая обработка информации, интеллектуальная геоинформационная система, диспетчеризация пространственных процессов.

Информация о статье

УДК 004.896

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 12.03.18, принята к печати 01.07.18.

Ссылка для цитирования: Ивакин Я. А., Потапычев С. В. Применение наборов геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 2. С. 94–109.

METHOD OF GEOCHRONOLOGICAL TRACKING FOR HYPOTHESES TESTING BASED IN GIS

Y. Ivakin^{1*}, S. Potapichev¹

¹ SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

* Corresponding author: ivakin@oogis.ru

Abstract—State-of-the-art means for decision-making intelligent support at dispatching the geospatial processes of the sea transport that implement digital cartographic data sets do not allow an operational and adequate enough account of the natural environment changing properties affecting the dispatching decisions made at a control of complexly distributed totalities of geospatial processes. At that the dispatching is the final manifestation of a multidimensional control process of geospatial processes on the sea surface. **Research subject.** Conventionally, a control problem of the sea transport objects' that realize geospatial processes is being solved in isolation from the accounting for a current state of the marine environment and for the variability of its hydrological, hydrophysical and other characteristics. As a rule, only issues of changing the hydrographic and hydrometeorological conditions are subjected to consideration as they concern the maritime safety and navigation specifics. Now the more complex version of the spatial processes dispatching problem is of great interest, when the environment variability defines the unique dispatching conditions in each point of the coordinated geographic space. **Method.** Such problem's statement is especially actual under the circumstances of implementing the up-to-date adaptive monitoring and natural environment probing means, like subsystems for surveillance of the matching spatial sea processes dispatching systems. **Core results.** The above statement novelty as well as an approach to this version of the problem solving is in a fusion of data pertinent to the spatial processes representation area and data matching the typical models of digital data sets, integration of software mechanisms used to arrange for a proper work with information about geospatial processes and programs of dealing with cartographic data sets. **Practical relevance.** Development of a reasonable formulation and method for solving the given version of a problem forms the essence of this paper.

Keywords—Geographic information systems, GIS – technologies for historic research; geochronological track and tracking; graphs' isomorphism; statistical hypotheses testing; GIS based interdisciplinary research.

Article info

Article in Russian.

Received 12.03.18, accepted 01.07.18.

For citation: Ivakin Y., Potapichev S.: Method of Geochronological Tracking for Hypotheses Testing Based in GIS // Telecom IT. 2018. Vol. 6. Iss. 1. pp. 94–109 (in Russian).

Введение

В статье раскрывается метод решения задачи интеллектуальной поддержки принятия решений с использованием цифровых картографических наборов данных при управлении (диспетчеризации) процессами движения динамических объектов в географическом пространстве. Под термином «диспетчеризация пространственных процессов в географическом пространстве» понимается постоянное и непрерывное воздействие на контролируемые пространственные процессы с целью обеспечения безопасного характера их взаимного протекания. При этом «пространственный процесс» – процесс, развивающийся в географическом пространстве с течением времени (движение судна, полет самолета и пр.).

В основу разрабатываемого метода положен подход к организации интеллектуальной поддержки принятия решений на основе интеграции методов искусственного интеллекта и ГИС-технологий обработки цифровых картографических наборов данных. Реализация этого метода предполагается как последовательность решения ряда частных задач:

1) Конкретизация концептуальной модели применения цифровых картографических наборов данных для интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов;

2) Уточнение системы требований, логической структуры и программной архитектуры систем интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов с использованием данных из цифровых картографических наборов;

3) Определение онтологической модели предметной области диспетчеризации геопространственных процессов, как модели представления геопространственных процессов с применением цифровых картографических наборов данных;

4) Реализация комплекса методик поддержки диспетчеризации пространственных процессов.

Содержательное раскрытие существа преобразований, выполняемых на каждом из этапов метода – при решении каждой частной задачи, позволяет раскрыть метод в целом.

1 Этапы применения картографических наборов данных при интеллектуальной поддержке принятия диспетчерских решений

В основу интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов с применением цифровых картографических наборов данных положена совокупность моделей и методов слияния данных предметной области представления пространственных процессов с данными, соответствующими типовым моделям цифровых наборов данных, интеграции программных механизмов работы с информацией о геопространственных процессах и программ работы с картографическими наборами данных. Моделирование геопространственных процессов и интеллектуальная поддержка решений по их диспетчеризации осуществляется с использованием технологий работы со сложно структурированными пространственными данными на базе

онтологий предметных областей. При этом основой для выработки рекомендаций на диспетчерские воздействия является сценарий штатного протекания пространственного процесса. Именно степень отклонения того или иного геопространственного процесса от штатного сценария его протекания определяет необходимость и объем диспетчерского воздействия. Целью такого воздействия является снижение указанного отклонения до приемлемого. Предлагаемые в рамках метода отдельные средства направлены на разработку рациональных последовательностей действий по формулированию и оценке параметров таких диспетчерских воздействий [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Задача оптимальной диспетчеризации совокупности пространственных процессов с учетом уравнения изменения фазовых координат имеет вид [10]:

$$x(t_i) = f[x(t_{i-1}), u(t_i), t_i], t_i \in [0, T], i = 1, \dots, N$$

при диспетчерских воздействиях $u(t_i)$, обеспечивающих выбор корректирующих воздействий S_{t_i} , функциональной структуры (функций или режимов работы) R_{t_i} , а также связанных с оптимизацией внутренней совокупности пространственных процессов Y_{t_i} :

$$u(t_i) = \{S_{t_i}, R_{t_i}, Y_{t_i}\}, S_{t_i} \subset \Omega_S, R_{t_i} \subset \Omega_R, Y_{t_i} \subset \Omega_Y, i = 0, \dots, N$$

в общем виде формулируется как задача пошагового выбора допустимого управления $u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_i), \dots, u(t_N)$, которое обеспечивает значение показателя эффективности $P(u)$ системы не менее заданного порогового P_3 :

$$P(u) \geq P_3$$

или экстремального значения:

$$P(u) \rightarrow \max \text{ или } P(u) \rightarrow \min.$$

Процесс выработки управляющего воздействия является заключительным элементом многоуровневой модели поддержки принятия диспетчерских решений [8] в распределенной системе диспетчеризации и обеспечивает воздействие на соответствующие элементы управляемых пространственных процессов (рис. 1).

Опираясь на концептуальные решения, представленные в [10], можно произвести функциональную декомпозицию процесса пошаговой диспетчеризации пространственных процессов:

$$\begin{aligned} &u_1(t_1), u_1(t_2), \dots, u_1(t_N) \\ &u_j(t_1), u_j(t_2), \dots, u_j(t_N) \\ &u_k(t_1), u_k(t_2), \dots, u_k(t_N) \end{aligned}$$

$j = 1, \dots, K$ – количество диспетчеризуемых геопространственных процессов.

Каждый диспетчеризуемый пространственный процесс характеризуется своим объектом управления, множеством управляющих воздействий, своими критериями и показателями эффективности.

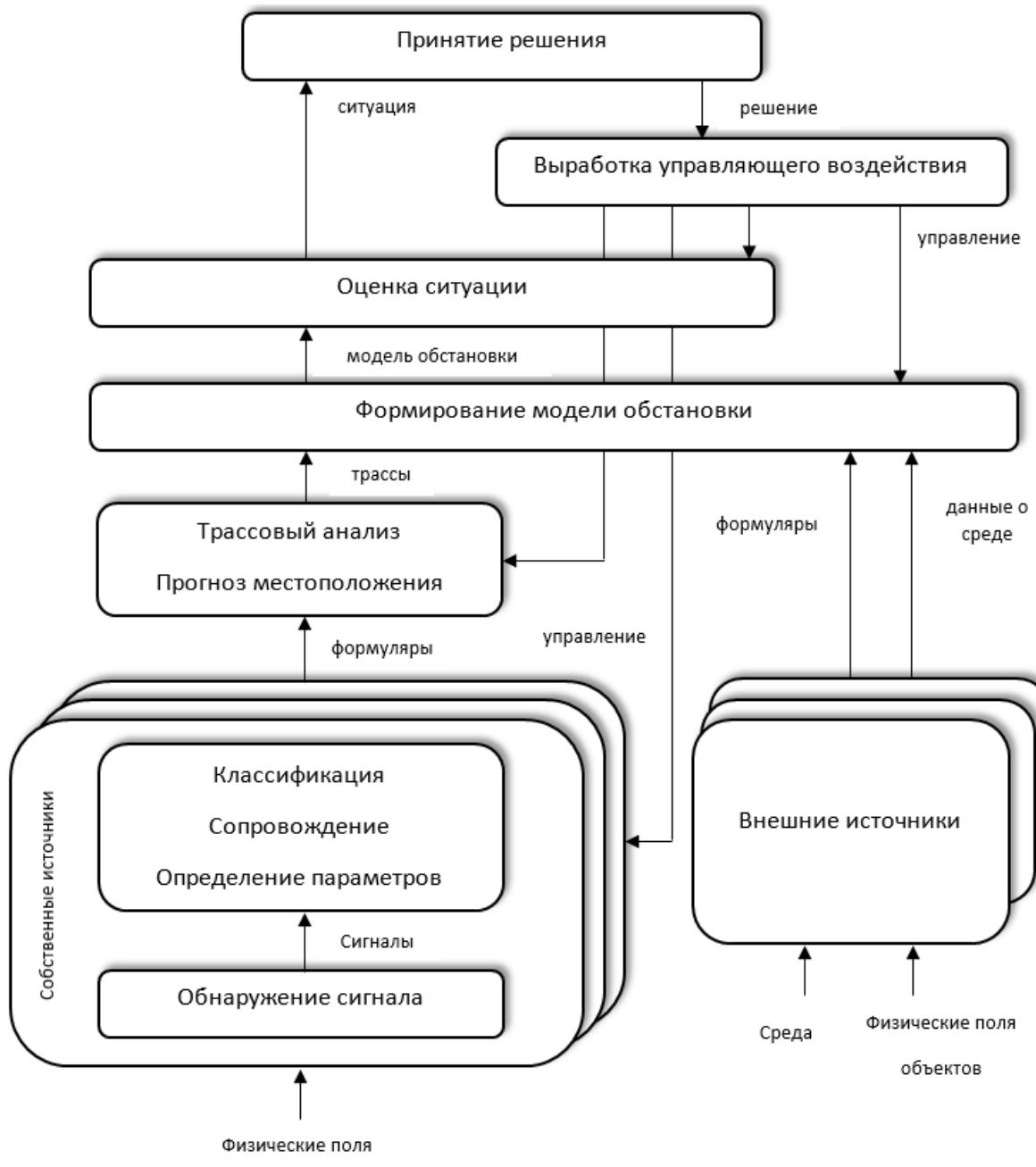


Рис. 1. Обобщенная модель поддержки принятия диспетчерских решений

Поэтому представляется рациональным далее рассмотреть специфику применения цифровых картографических данных (геопространственных данных) применительно к составляющим процесса поддержки принятия диспетчерских решений.

А. Применение цифровых картографических наборов данных при управлении распределенными источниками информации о протекании геопространственных процессов

В условиях изменчивости среды потенциал обнаружения распределенных источников информации о протекании геопространственных процессов зависит от географических координат расположения этих источников и определяется для каждого источника т. н. объемом зоны наблюдения, в пределах которой вероятность обнаружения диспетчеризуемого объекта, реализующего геопространственный процесс, является величиной не менее заданного значения. Поисковые усилия источника информации в таком варианте будут вычисляться согласно следующего соотношения:

$$\Phi_i = \iiint_{V_i} F(x, y, z) dx dy dz = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} dz \iint_S F(x, y) dx dy,$$

где $F(x, y, z)$ – потенциал обнаружения в точке, принадлежащей объемной фигуре, характеризующей зону наблюдения;

$F(x, y)$ – потенциал обнаружения на плоскости (на горизонтальном срезе) объемной фигуры;

Z_{min} – min значение глубины (высоты) возможного нахождения объекта диспетчеризации;

Z_{max} – max значение глубины (высоты) возможного нахождения объекта диспетчеризации;

S – площадь горизонтального среза зоны наблюдения.

Для варианта зоны гарантированного обнаружения объекта диспетчеризации, т. е. когда

$$F(x, y, z) = F(x, y) = 1$$

усилия соответствующего источника информации следует рассчитывать согласно:

$$\Phi_i = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} S(z) dz,$$

где $S(z)$ – площадь горизонтального среза зоны наблюдения на горизонте z .

Задача оптимального управления источниками информации в рамках всей распределенной системы диспетчеризации пространственных процессов заключается в таком размещении их в географическом пространстве, которое позволяет удовлетворить следующий критерий:

$$P_{\text{обн}} = 1 - \exp \left[- \left[\frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i}{V_0} \right] \rightarrow \max \right],$$

где $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения объекта, реализующего геопространственный процесс;

V_0 – объем географического пространства, в рамках которого действует или на которое распространяется компетенция системы диспетчеризации пространственных процессов (район диспетчеризации);

N – количество источников информации.

Очевидно, что

$$V_0 = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} S_0(z) dz,$$

где $S_0(z)$ – площадь горизонтального среза объемной фигуры, характеризующей географическое пространство, в рамках которого действует или на которое распространяется компетенция системы диспетчеризации пространственных процессов.

При равномерном законе распределения объекта, реализующего геопространственный процесс, в пределах района диспетчеризации $w(x, y, z) = \text{const}$ критерий предполагает определение такой комбинации геопространственных данных (x_i, y_i, z_i) , характеризующих положение источников информации, которое позволяет добиться максимума суммарных усилий наблюдения $\sum_{i=1}^N \Phi_i$ распределенной системы диспетчеризации при ограничениях:

- на равномерность покрытия ν усилиями всего объема района диспетчеризации V_0 :

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \nu_2 = \dots = \nu_i = \dots = \nu_N, \\ \nu_i &= \frac{\Phi_i}{V_{0i}} = \text{const}, \end{aligned}$$

где V_{0i} – подобъем района диспетчеризации, выделенного для обследования i – му источнику информации о диспетчеризуемых пространственных процессах.

- на отсутствие перекрытий областей V_{0i} источников информации (при $\sum_{i=1}^N \Phi_i \leq V_0$) или одинаковый объем перекрытий для всех соседних источников информации (при $\sum_{i=1}^N \Phi_i > V_0$).

При неравномерном законе распределения объекта, реализующего геопространственный процесс, в пределах района диспетчеризации: при $w(x, y, z) \neq \text{const}$, решение задачи предполагает определение такой комбинации геопространственных данных (x_i, y_i, z_i) , характеризующих положение каждого источника информации, которое позволяет добиться выполнения в каждой точке района диспетчеризации следующего уравнения:

$$\exp[-F(x, y, z)] \omega(x, y, z) = \lambda = \text{const},$$

где $F(x, y, z)$ – потенциал по наблюдению, суммарно реализуемый источниками информации распределенной системы диспетчеризации. При этом значение λ определяет области геопространства, в которых наиболее рационально сосредоточить источники информации – реализаторов функций наблюдения.

Решение задачи заключается в следующем: повышая концентрацию источников информации – реализаторов функций наблюдения из состава системы диспетчеризации пространственных процессов в подрайоне наибольшей плотности вероятности нахождения объекта – реализатора пространственного процесса, становится возможным оценить объем усилий указанной системы диспетчеризации на управление распределенными источниками информации о протекании геопространственных процессов:

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^N \iiint_{V_i} F(x, y, z) dx dy dz.$$

Далее, задав величину λ , и соответствующий объем геопространства, в котором сосредотачиваются усилия V_u , на базе соотношения:

$$\Phi(\lambda) = \iiint_{V_u} \{\ln[\omega(x, y, z)] dx dy dz\} - V_u \ln(\lambda)$$

рассчитывается требуемый объем управляющих воздействий на распределенные источники информации о протекании геопространственных процессов, отвечающих условию:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0$$

и закрепляется та часть района, в которой сосредотачиваются усилия системы диспетчеризации V_u .

После определения части района, в которой сосредотачиваются усилия системы диспетчеризации V_u надо установить точные места размещения источников информации в пределах, ограниченных значением λ , базируясь на соотношении:

$$\Phi_i = \int_{z_{i-1}}^{z_i} dz \int_{y_{i-1}}^{y_i} dy \int_{x_{i-1}}^{x_i} \{\ln[\omega(x, y, z)] dx\} - (x_i - x_{i-1})(y_i - y_{i-1})(z_i - z_{i-1}) \ln(\lambda).$$

Если при заданных V и λ взаимным расположением источников информации добиться выполнения условия

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^N \Phi_i \geq \Phi_0$$

не получается, то их следует пересчитать для варианта $\Phi_0 = \Phi_1$ и т. д.

Вероятность успешности управления распределенными источниками информации о протекании геопространственных процессов со стороны пространственно-распределенной системы диспетчеризации, построенной по выше представленной методике, рассматривается как:

$$P_{\text{обн}} = \iiint_{V_u} \{\omega(x, y, z) dz dy dz\} - V_u \lambda.$$

Режимы работы составных частей системы диспетчеризации R_i в ходе оптимизации принимаются с учетом обеспечения каждой составной частью максимальных значений диспетчерских воздействий на управляемые источники информации о протекании геопространственных процессов:

$$R_i: \Phi_i = \iiint_{V_i} F(x, y, z) dz dy dz \rightarrow \max, R_i \subset \Omega_R.$$

B. Использование геопространственных данных в процессе анализа траекторий и прогнозирования расположений объектов, реализующих пространственные процессы

Эффективность анализа траекторий и прогнозирования расположений объектов, реализующих пространственные процессы представляется вероятно-

стью перепутывания траекторий P_n . Как показано в [8] снижение вероятности перепутывания траекторий определяется процессом уменьшения погрешности локализации расположений объектов, реализующих пространственные процессы. Это достигается отбором отметок от разнесенных источников информации по нескольким координатам, а также использованием дополняющих признаков объектов, реализующих пространственные процессы.

Современные способы обработки указанных данных позволяют создать стробы сопровождения не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости. Для этого в соответствующих составных частях системы диспетчеризации реализуются соответствующие методы, позволяющие добиться локализации положения объектов, реализующих пространственные процессы, в вертикальной плоскости. Обязательное условие воплощения таких методов стробирования и обработки первичной и информации есть применение геопространственных данных, поддерживающих определение передаточной функции среды распространения зондирующих сигналов. Также геопространственные данные применяются для идентификации объектов, реализующих пространственные процессы и выявленных разными источниками информации из состава системы диспетчеризации. В частности, для определения гипотезы о характере перемещения ведомого несколькими источниками информации объекта, реализующего пространственный процесс.

В этом случае рациональным инструментарием обработки пространственных данных выступает экспертная система, которая реализует следующий прикладной функционал:

- выявление признаков, характерных для маневров специфических объектов, реализующих пространственные процессы;
- приданье дополнительных возможностей по интерпретации цифровых пространственных данных о характеристиках объектов, реализующих геопространственные процессы, поступающие от взаимодействующих информационных и управляемых систем;
- учёт при выдвижении гипотез о траекториях движения объектов, реализующих пространственные процессы, некоторых геопространственных данных по району диспетчеризации соответствующей системы.

C. Применение геопространственных данных в качестве базовой основы модели обстановки

Информационная модель обстановки создается по данным составных частей и источников системы диспетчеризации пространственных процессов. Она есть множество условных знаков геопространственных объектов, нанесенных на электронную карту и отображающих существование объектов реального мира, наличие инфраструктуры и природной среды в рамках заданного геопространственного района [8]. Информационная модель обстановки есть базовая основа, на основе анализа которой производится определение класса складывающейся в процессе функционирования системы диспетчеризации пространственной ситуации. Так же на её основе производится прогноз развития пространственной ситуации и вырабатываются диспетчерские воздействия, обеспечивающие решение заданного круга задач диспетчеризации в объективно формирующейся обстановке.

В информационной модели обстановки традиционно выделяют выделить два аспекта – статический и динамический.

Статический аспект представляет собой совокупность графических объектов и их свойств, других данных обстановки, которые неизменны во времени, т. е. неизменны в пределах временных рамок (цикла) принятия управленческих решений в системе диспетчеризации геопространственных процессов. Для формирования статического аспекта информационной модели обстановки используются геопространственные данные, сконцентрированные в определенных специализированных базах данных.

Динамический аспект есть совокупность графических объектов и их свойств, других данных, характеризующих обстановку, которые могут изменяться в пределах временных рамок (цикла) принятия управленческих решений в системе диспетчеризации геопространственных процессов.

Для формирования динамического аспекта обстановки используются системно обновляемые геопространственные данные. Такие цифровые данные могут применяться, поступая от источников информации, так и после предварительной обработки экспертной системой, специальными логико-математическими методами.

Разработанные методы пространственного моделирования дают сегодня возможность формировать на основе геопространственных данных как двухмерные, так и трехмерные модели обстановки [8].

Критерий результативности формирования информационной модели обстановки есть достижение максимального значения ее достоверности P_d к реальной обстановке, наблюдаемой в районе диспетчеризации. Соответственно, достоверность характеризуется полнотой p_s , точностью p_σ и своевременностью p_t представляемых диспетчеру графических объектов, отражающих геопространственную обстановку, т. е.:

$$P_d = f(p_s, p_\sigma, p_t) \rightarrow \max.$$

Трехмерные информационные модели обстановки нагляднее чем двухмерные, но нуждаются при формировании в дополнительных данных, предполагают создание базы трехмерных изображений, предъявляют более высокие требования к аппаратным средствам, реализующим этот вид моделей.

D. Применение геопространственных данных для оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий

Применение пространственных данных значительно увеличивает возможности по синтезу параметров, определяющих пространственную ситуацию, подлежащую диспетчеризации. Для оценки таких параметров используют специализированные программные аналитические модели. В итоге применение геопространственных данных для оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий позволяет принять диспетчерское решение о классе пространственной ситуации, о необходимости применения диспетчерских воздействий на контролируемые пространственные процессы. Критерием эффективности оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий является достижение максимального значения вероятности правильного отнесения такой ситуации

к соответствующему классу ситуаций $p_{\text{кл}}$, а также достижения минимального времени определения класса ситуации $T_{\text{кл}}$.

Резюмирующим этапом функционирования системы диспетчеризации пространственных процессов является именно реализация управляющих воздействий на объекты, реализующие геопространственные процессы. Описания конкретизированных программных технологий, предназначенные для реализации приведенных выше подходов по работе с геопространственными данными при диспетчеризации пространственных процессов приведены в [8, 9].

Обобщенная архитектура программной реализации системы работы с картографическими наборами цифровых данных при интеллектуальной поддержке диспетчерских решений показана на рис. 2.

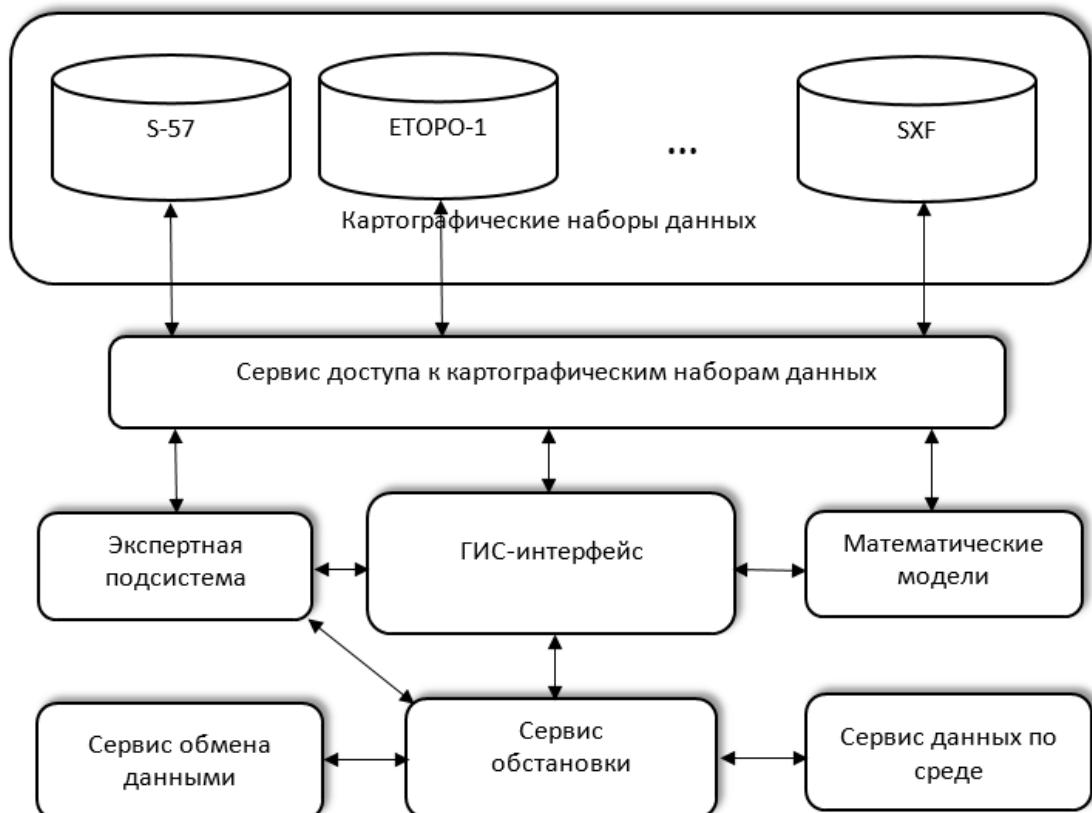


Рис. 2. Архитектура программной системы работы с картографическими наборами данных при диспетчеризации пространственных процессов

2 Интеллектуализация моделирования геопространственных процессов

Моделирование геопространственных процессов, осуществляющееся в системах диспетчеризации, можно рассмотреть, как некоторое гомоморфное преобразование, т. к. любой гомоморфизм порождает модель, т. е. каждая модель определяется некоторым гомоморфизмом, причем выбор соответствующего гомоморфизма зависит от того, какие свойства исходного процесса считаются существенными при моделировании. При таком подходе основным принципом системного моделирования является принцип многомодельности. Его реализация

применительно к задаче выявления нештатных ситуаций в протекании нескольких геопространственных процессов выражается в построении и использовании на практике иерархической системы моделей экспертных знаний. Так, можно принять, что на множестве моделей экспертных знаний существует модель $M = \{M_i, i = \overline{1, n}\}$ бинарного отношения $r_m = \langle M, R_m \rangle, R_m \subseteq M \times M$. Указанное отношение далее именуется отношением моделирования, определяемым на основе введения понятия уровня моделирования: модель $M_i (i = \overline{1, n})$ является моделью экспертных знаний $-i$ -го уровня моделирования (формализации) и моделью $(i - j)$ -го уровня по отношению к модели $M_j (j = \overline{1, i})$. Например, модель M_3 является моделью экспертных знаний 3-го уровня и моделью 2-го уровня по отношению к M_1 . Таким образом, тот факт, что некоторая упорядоченная пара моделей $\langle M_i, M_j \rangle (i, j = \overline{1, n}, i \geq j)$ связана отношением моделирования (что записывается как $M_i r_M M_j$ или как $\langle M_i, M_j \rangle \in R_M$) содержательно означает: модель экспертных знаний M_i есть модель (метамодель) $(i - j)$ -го уровня по отношению к модели (объектной модели) M_j . Естественно предположить наличие у введенного отношения моделирования следующих свойств:

а) рефлексивности

$$\forall (i = \overline{1, n}) M_i r_M M_i, \quad (1)$$

т. е. каждая из моделей экспертных знаний есть «модель (0-го уровня моделирования) самой себя»;

б) антисимметричности

$$\forall (i, j = \overline{1, n}, i \neq j) M_i r_M M_j \Rightarrow \neg (M_j r_M M_i), \quad (2)$$

т. е. имеет место «направленность» отношения моделирования в сторону возрастания степени формализации модельных представлений (модель более низкого уровня формализации не может быть моделью по отношению к модели более высокого уровня);

с) транзитивности

$$\forall (i, j, k = \overline{1, n}) M_i r_M M_j \wedge M_j r_M M_k \Rightarrow (M_i r_M M_k), \quad (3)$$

т. е. при наличии «промежуточной» модели результирующий уровень моделирования определяется как сумма связанных с ней уровней формализации $i - k = (i - j) + (j - k)$, при этом модель $-i$ -го уровня выступает одновременно в двух ролях - как метамодель по отношению к M_k и как объектная модель по отношению к модели M_i ;

д) полноты

$$\forall (i, j = \overline{1, n}) M_i r_M M_j \vee M_j r_M M_i, \quad (4)$$

т. е. имеется возможность сравнения по отношению r_M моделей экспертных знаний M .

Свойства (1–3) определяют наличие на множестве M частичного (нестрого- го) порядка, а свойство (4) превращает данный порядок в строгий (линей- ный). Количество звеньев в цепочке моделей должно определяться, с одной

стороны, спецификой моделируемых геопространственных процессов и характером решаемых задач по их диспетчеризации, с другой, особенностями работы эксперта и инженера по знаниям в процессе многоэтапной многоуровневой формализации экспертных знаний. К системе моделей экспертных знаний при этом предъявляются следующие требования:

- переходы между уровнями моделирования не должны вызывать затруднений у эксперта и инженера по знаниям в процессе их совместной деятельности по созданию базы знаний интеллектуальной подсистемы поддержки решений диспетчера;
- при переходе от модели экспертных знаний одного (более высокого) к модели другого (более низкого) уровня формализации недопустимы потеря и (или) искажение информации.

Учитывая указанные требования, а также исходя из особенностей предметной области диспетчеризации пространственных процессов, можно предложить ряд уровней моделирования (формализации) экспертных знаний, которые условно могут быть названы: содержательным, структурно-содержательным, структурно-формальным, формальным и программным.

Особенности представления экспертных знаний на каждом из уровней моделирования сводятся к следующему:

1) Содержательная (концептуальная) модель экспертных знаний, являясь их «первой» моделью, соответствует верbalному (словесному) описанию экспертом множества понятий, выделяемых в предметной области диспетчеризации пространственных процессов, и их взаимосвязей (онтологии предметной области). К ним также должны быть отнесены различного рода положения правоустанавливающих документов, руководств, наставлений, инструкций и т. п., принимаемые для описания стандарта пространственной ситуации.

2) Построение структурно-содержательной модели экспертных знаний связано со структурированием выделенной совокупности понятий предметной области – формированием структуры понятийной системы в явном виде.

3) Структурно-формальная модель экспертных знаний содержит две компоненты: структурную и формальную. Первая из них тождественна соответствующей компоненте структурно-содержательной модели, а вторая, формальная компонента, есть результат формализации содержательной составляющей структурно-содержательной модели средствами некоторого формального языка.

4) Формальная модель экспертных знаний, в отличие от структурно-формальной модели, характеризуется отсутствием структурной компоненты и наличием формально-языковых конструкций, с помощью которых осуществляется формализация экспертных знаний.

5) Программная модель экспертных знаний образуется в результате представления формальной модели с помощью соответствующих программных и инструментальных средств представления экспертных знаний.

Комплекс разработанных моделей составляет базу знаний экспертной системы для интеллектуальной поддержки решений по диспетчеризации пространственных процессов, которая, в свою очередь, является средством формирования отдельных эталонных пространственных ситуаций и сценариев корректного развития диспетчеризуемых пространственных процессов.

Заключение

Эффективность диспетчеризации пространственных процессов в соответствующем географическом районе определяется качеством обработки информации на отдельных этапах функционирования многоуровневой системы поддержки диспетчерских решений. Существующие направления развития интеллектуальных средств поддержки принятия решений, комплексов работы с цифровыми картографическими данными различной тематической направленности, моделей окружающей географической среды дают возможность применения геопространственных данных на всех уровнях диспетчеризации и управления объектами, реализующими пространственные процессы. В свою очередь, этот факт дает основу для повышения степени достоверности соответствующих информационных моделей обстановки и принятия более обоснованных диспетчерских решений. Однако, работа с геопространственной информацией требует не только применения сложных логико-математических и программно-расчетных моделей, но и оригинального подхода к интеллектуализации моделирования обработки соответствующей информации. Реализация указанных моделей и подходов, интеллектуализация поддержки принятия диспетчерских решений в ближайшем будущем обеспечат принципиально новый уровень автоматизации функционирования систем диспетчеризации геопространственных процессов [11, 12, 13, 14, 15].

Поддержка исследований. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №18-07-00437), а также Государственной Работы –Проведение фундаментальных научных исследований по программам РАН № 0073-2018-0003.

Литература

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. М.: Наука. 1972. 544 с.
2. ДеМарко Т., Листер Т. Вальсируя с медведями. Управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения. М.: ДН. 2005. 196 с.
3. ДеМарко Т. Deadline. Роман об управлении проектами. М.: Манн, Иванов и Фербер. 2016. 352 с.
4. Дюваль П. М., Матиас С., Гловер А. Непрерывная интеграция. Улучшение качества программного обеспечения и снижение риска. СПб.: Символ. 2016. 240 с.
5. Потапычев С. Н., Ермоляев В. И., Ивакин Я. А. Геоинформационная поддержка управления морской распределенной системой наблюдения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2016. № 3. С. 3–16.
6. Потапычев С. Н., Ивакин Я. А., Смирнова О. В. Применение ГИС-инструментария геохронологического трекинга для анализа данных // Информация и космос. 2017. № 1 (7). С. 132–138.
7. Ermolaev V. Modeling of Search Actions under the Conditions of Environment Properties' Variability // Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. 2013. PP. 107–117.
8. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки // Под ред. Юсупова Р. М., Поповича В. В. СПб.: Наука. 2013. 284 с.
9. Ивакин Я. А., Мичурин С. В. Результативность и качество программных комплексов ситуационного управления для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 19–24.
10. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука. 2000. 549 с.

11. Муся А. М. Геоинформационная система для тренажерных комплексов // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 151–159.
12. Kochura A. E., Podkolzina L. B., Ivakin Ya. A., Nidziev I. I. Singular Matrix Bundles in a Generalized Symmetric Problem of Eigenvalues // SPIIRAN Proceedings. 2013. No. 3 (26). pp. 253–276.
13. Ermolaev B. I. Применение интеллектуальных геоинформационных систем при проектировании гидроакустических средств // Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России». 2016. С. 446–450.
14. Popovich V., Leontev Y., Ermolaev V., Chirov D., Smirnova O. 3D+т Acoustic Fields Modeling Based on Intelligent GIS // Coordinates. 2015. Vol. XI. Iss. 2. PP. 18–22.
15. Цветков М. В., Малышева Д. О. Использование интеллектуальной географической информационной системы для выявления опасных ситуаций, связанных с безопасностью судоходства по северному морскому пути // 9-я Российская мультиконференция по проблемам управления «Информационные технологии в управлении». 2016. С. 465–475.

References

1. Kron G. The Study of Complex Systems in Parts – Diakoptics. M.: Nauka. 1972. 544 p.
2. DeMarco T., Lister T. Waltzing with Bears: Managing Risk on Software Projects. M.: DH. 2005. 196 p.
3. DeMarco T. The Deadline. A Novel about Project Management. M.: Mann, Ivanov i Ferber. 2016. 352 p.
4. Duvall P. M., Matyas S., Glover A. Continuous Integration: Improving Software Quality and Reducing Risk. SPb.: Simvol. 2016. 240 p.
5. Potapychев S., Ermolaev V., Ivakin Ya. Geoinformation Support of Maritime Surveillance Distribution System // Vestnik SPbGUTD. Seriya 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2016. No. 3. pp. 3–16.
6. Potapychev S., Ivakin Ya., Smirnova O. Application of GIS Tools of Geochronological Tracking for Network Analysis of Biographical Data // Informatsiya i kosmos. 2017. No. 1 (7). pp. 132–138.
7. Ermolaev V. Modeling of Search Actions under the Conditions of Environment Properties' Variability // Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. 2013. pp. 107–117.
8. Intelligent geographic information systems for the marine environment monitoring // Edited by Yusupov R. M., Popovich V. V. SPb.: Nauka. 2013. 284 p.
9. Ivakin Ya., Michurin S. The Effectiveness and Quality of Situational Management Software for Automated Dispatching of Air Transport Spatial Processes // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2016. No. 4. pp. 19–24.
10. Miroshnik I., Nikiforov V., Fradkov A. Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems. SPb.: Nauka. 2000. 549 p.
11. Musya A. Geographic Information System for Training Complexes // Voprosy radioelektroniki. 2015. No. 1. pp. 151–159.
12. Kochura A., Podkolzina L., Ivakin Ya., Nidziev I. Singular Matrix Bundles in a Generalized Symmetric Problem of Eigenvalues // SPIIRAN Proceedings. 2013. No. 3 (26). pp. 253–276.
13. Ermolaev V. Application of Intelligent Information Systems in Design Sonar // St. Petersburg Interregional Conference “Information Security of Russian Regions”. 2016. pp. 446–450.
14. Popovich V., Leontev Y., Ermolaev V., Chirov D., Smirnova O. 3D+т Acoustic Fields Modeling Based on Intelligent GIS // Coordinates. 2015. Vol. XI. Iss. 2. pp. 18–22.
15. Tsvetkov M., Malysheva D. Using intelligent geographic information system to identify hazards related to navigation safety for the Northern Sea Route // The Ninth Russia Multiconference on Control Problems “Information technologies in management”. 2016. pp. 465–475.

Ивакин Ян Альбертович

– ведущий научный сотрудник,
доктор технических наук, профессор, СПИИРАН,
Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация,
ivakin@oogis.ru

Потапычев Сергей Николаевич – старший научный сотрудник,
кандидат технических наук, СПИИРАН,
Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация,
potapychev@oogis.ru

Ivakin Yan – Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences,
Full Professor, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178,
Russian Federation, ivakin@oogis.ru

Potapichev Sergey – Senior Research Officer,
Candidate of Engineering Sciences, SPIIRAS,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation,
potapychev@oogis.ru