

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869

DECISION-MAKING INTELLIGENT SUPPORT AT DISPATCHING GEOSPATIAL PROCESSES OF MARINE TRANSPORT

Y. A. Ivakin, S. N. Potapychiev

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation

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. 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. 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. 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. Development of a reasonable formulation and method for solving the given version of a problem forms the essence of this paper.

Keywords: Geospatial data, multilevel information processing, intelligent geoinformation system, dispatching of spatial processes.

For citation:

Ivakin, Yan A., and Sergei N. Potapychiev. "Decision-making intelligent support at dispatching geospatial processes of marine transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.4 (2018): 857–869. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869.

УДК 681.1.003

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация

Современные средства интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов морского транспорта с применением цифровых картографических наборов данных не в должной мере позволяют оперативно и с достаточной степенью адекватности

учитывать изменяющиеся свойства природной среды, оказывающие влияние на диспетчерские решения, принимаемые при управлении сложно распределенными совокупностями геопространственных процессов. При этом диспетчеризация есть итоговое проявление многогранного процесса управления геопространственными процессами на морской поверхности. Традиционно задача управления объектами морского транспорта, реализующими геопространственные процессы, решается в отрыве от учета текущего состояния морской среды, без учета изменчивости ее гидрологических, гидрофизических и других характеристик. Учету подлежат исключительно вопросы изменения гидрографических и гидрометеорологических условий в части вопросов, касающихся безопасности мореплавания и специфики навигации. 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. Особенно такая постановка задачи актуальна в условиях внедрения современных адаптивных средств мониторинга и зондирования природной среды как подсистем наблюдения соответствующих систем диспетчеризации пространственных процессов на море. Новизна такой постановки и метода 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. Разработка обоснованной постановки и метода решения указанного варианта задачи составляет суть данной статьи.

Ключевые слова: геопространственные данные, многоуровневая обработка информации, интеллектуальная геоинформационная система, диспетчеризация пространственных процессов.

Для цитирования:

Ивакин Я. А. Интеллектуальная поддержка принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов морского транспорта / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 857–869. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869.

Введение (Introduction)

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» — это процесс, развивающийся в географическом пространстве с течением времени (движение судна, полет самолета и др.).

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 следующих 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 сути преобразований, выполняемых на каждом из этапов метода при решении каждой частной задачи, позволяет раскрыть метод в целом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Этапы применения картографических наборов данных при интеллектуальной поддержке принятия диспетчерских решений. В основе интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов с применением цифровых картографических наборов данных лежит совокупность моделей и методов слияния данных предметной области представления пространственных процессов с данными, соответствующими типовым моделям цифровых наборов, интеграции программных механизмов работы с информацией о геопространственных процессах и программе работы с картографическими наборами данных.

Моделирование геопространственных процессов и интеллектуальная поддержка решений по их диспетчеризации осуществляются с использованием технологий работы со сложнотруктурированными 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.

Задача оптимальной диспетчеризации совокупности пространственных процессов с учетом уравнения изменения фазовых координат имеет вид [1]

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

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} :

$$u(t_i) = \{S_{t_i}, R_{t_i}, Y_{t_i}\}, S_{t_i} \in \mathcal{S}, R_{t_i} \in \mathcal{R}, Y_{t_i} \in \mathcal{Y}, i = 0, \dots, N, \quad (2)$$

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 :

$$P(u) \geq P_3, \quad (3)$$

или экстремального значения:

$$P(u) \rightarrow \max \text{ или } P(u) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Процесс выработки управляющего воздействия является заключительным элементом многоуровневой модели поддержки принятия диспетчерских решений [2] в распределенной системе диспетчеризации, обеспечивая воздействие на соответствующие элементы управляемых пространственных процессов (рис. 1).

Опираясь на концептуальные решения, представленные в работе [2], можно произвести функциональную декомпозицию процесса пошаговой диспетчеризации пространственных процессов:

$$\begin{aligned} &u_1(t_1), u_1(t_2), \dots, u_1(t_N); \\ &u_j(t_1), u_j(t_2), \dots, u_j(t_N); \\ &u_k(t_1), u_k(t_2), \dots, u_k(t_N), \end{aligned} \quad (5)$$

где $j = 1, \dots, K$ — количество диспетчеризируемых геопространственных процессов.

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

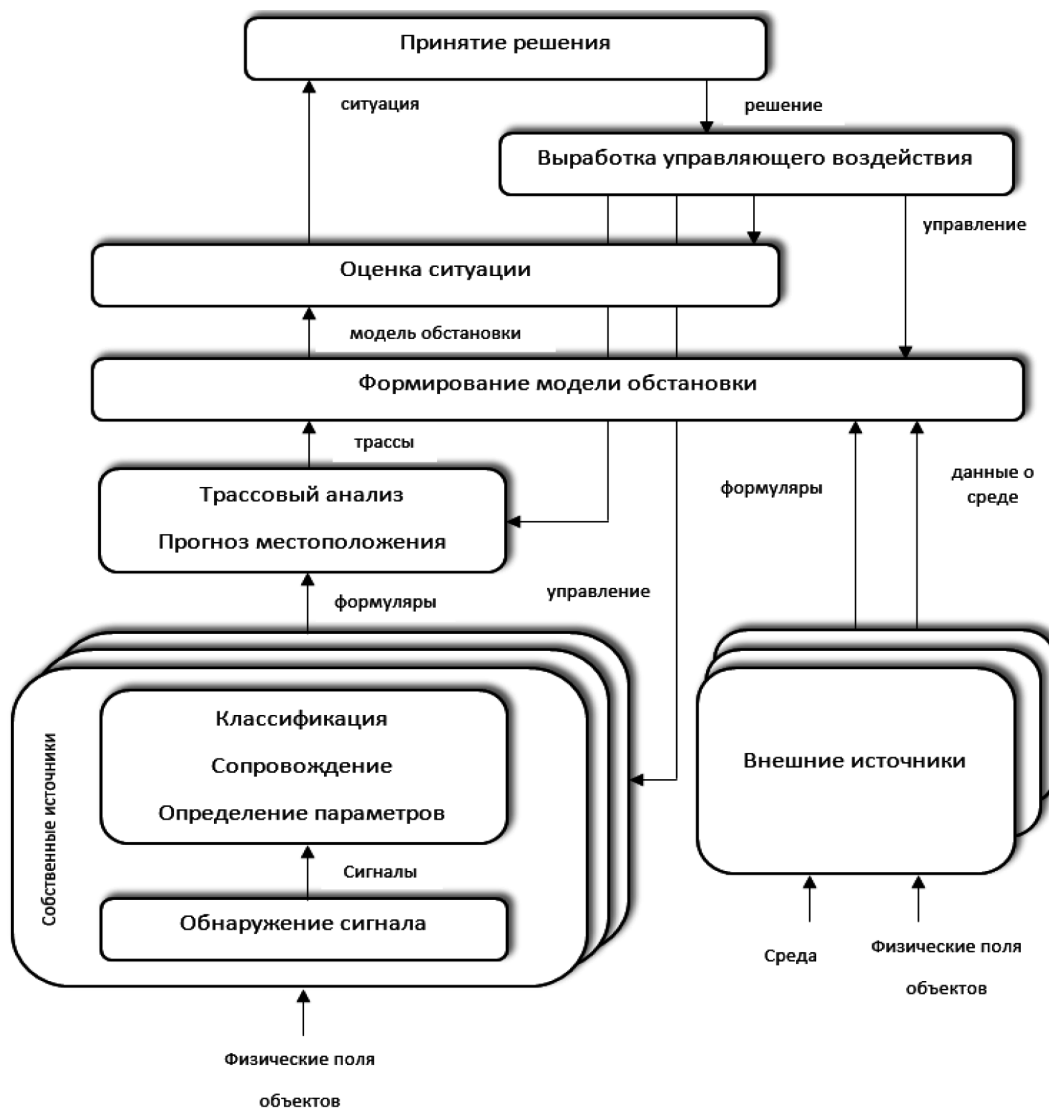


Рис. 1. Обобщенная модель поддержки принятия диспетчерских решений

Основные результаты (Main Results)

Специфика применения цифровых картографических данных при диспетчеризации пространственных процессов. Представляется рациональным рассмотреть данный вопрос применительно к следующим составляющим процесса поддержки принятия диспетчерских решений.

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 так называемым *объемом зоны наблюдения*, в пределах которой вероятность обнаружения диспетчеризируемого объекта, реализующего геопространственный процесс, является величиной не менее заданного значения. Поисковые усилия источника информации в таком варианте будут вычисляться согласно следующего соотношения:

$$\Phi_i = \iiint_{V_i} F(x, y, z) dx dy dz = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} dz \iint_S F(x, y) dx dy, \quad (6)$$

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

$$F(x, y, z) = F(x, y) = 1, \quad (7)$$

усилия соответствующего источника информации следует рассчитывать согласно соотношению

$$\Phi_i = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} S(z) dz, \quad (8)$$

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:

$$P_{\text{обн}} = 1 - \exp \left[- \left[\frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i}{V_0} \right] \rightarrow \max \right], \quad (9)$$

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

$$V_0 = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} S_0(z) dz, \quad (10)$$

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 следующих ограничениях:

– на равномерность покрытия v усилиями всего объема района диспетчеризации V_0 :

$$v_1 = v_2 = \dots = v_i = \dots = v_N; \quad (11)$$

$$v_i = \frac{\Phi_i}{V_{0i}} = \text{const}, \quad (12)$$

где V_{0i} — подобъем района диспетчеризации, выделенного для обследования i -го источника информации о диспетчеризируемых пространственных процессах.

– на отсутствие перекрытий областей V_{0i} источников информации при $\sum_{i=1}^N \Phi_i \leq V_0$ или одина-

ковый 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 условия:

$$\exp[-F(x, y, z)]\omega(x, y, z) = \lambda = \text{const}, \quad (13)$$

где $F(x, y, z)$ — потенциал по наблюдению, суммарно реализуемый источниками информации распределенной системы диспетчеризации; значение λ определяет области геопространства, в которых наиболее рационально сосредоточить источники информации, т. е. реализаторы функций наблюдения.

Решение задачи заключается в следующем: повышая концентрацию источников информации, а именно 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:

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^N \iiint_{V_i} F(x, y, z) dx dy dz. \quad (14)$$

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

$$\Phi(\lambda) = \iiint_{V_n} \{\ln[\omega(x, y, z)] dx dy dz\} - V_n \ln(\lambda) \quad (15)$$

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

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0, \quad (16)$$

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

После определения части района, в которой сосредотачиваются усилия системы диспетчеризации V_n , необходимо установить точные места размещения источников информации в пределах, ограниченных значением λ , на основе соотношения

$$\Phi_i = \int_{z_{i-1}}^{z_i} dz \int_{y_{i-1}}^{y_i} dy \int_{x_{i-1}}^{x_i} \{\ln[\omega(x, y, z)] dx\} - (x_i - x_{i-1})(y_i - y_{i-1})(z_i - z_{i-1}) \ln(\lambda). \quad (17)$$

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

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^N \Phi_i \geq \Phi_0 \quad (18)$$

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 представленной ранее методике, рассматривается как

$$P_{\text{обн}} = \iiint_{V_n} \{\omega(x, y, z) dz dy dx\} - \bar{V}_n \lambda. \quad (19)$$

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, определяемые в виде

$$R_i : \Phi_i = \iiint_{V_i} F(x, y, z) dz dy dx \rightarrow \max, R_i \subset \Omega. \quad (20)$$

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 вероятностью перепутывания траекторий P_n . Как показано в источнике [2], 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. Обязательным условием воплощения таких методов стробирования и обработки первичной информации является 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;
- придание дополнительных возможностей по интерпретации цифровых пространственных данных о характеристиках объектов, реализующих геопространственные процессы, поступающие от взаимодействующих информационных и управляющих систем;
- учёт при выдвижении гипотез о траекториях движения объектов, реализующих пространственные процессы некоторых геопространственных данных по району диспетчеризации соответствующей системы.

Применение геопространственных данных в качестве базовой основы модели обстановки.

Информационная модель обстановки создается по данным составных частей и источников системы диспетчеризации пространственных процессов. Она представляет собой 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 [2]. Информационная модель обстановки есть базовая основа, на основе анализа которой производится определение класса складывающейся в процессе функционирования системы диспетчеризации пространственной ситуации. Также на её основе выполняется прогноз развития пространственной ситуации и вырабатываются диспетчерские воздействия, обеспечивающие решение заданного круга задач диспетчеризации в объективно формирующейся обстановке.

В информационной модели обстановки традиционно выделяют два аспекта: статический и динамический. *Статический аспект* представляет собой совокупность графических объектов и их свойств, а также 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, а также 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 применяются системно обновляемые геопространственные данные. Такие цифровые данные могут быть использованы как при поступлении от источников информации, так и после предварительной обработки экспертной системой, с помощью использования специальных логико-математических методов. Разработанные методы пространственного мо-

делирования позволяют формировать на основе геопространственных данных как двухмерные, так и трехмерные модели обстановки [2].

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

$$P_d = f(p_s, p_o, p_t) \rightarrow \max. \quad (21)$$

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.

Применение геопространственных данных для оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий.

Применение пространственных данных значительно увеличивает возможности синтеза 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 и 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 $p_{п.кл}$, а также достижение минимального времени определения класса ситуации $T_{кл}$.

Резюмирующим этапом функционирования системы диспетчеризации пространственных процессов является именно реализация управляющих воздействий на объекты, реализующие геопространственные процессы. Описание конкретизированных программных технологий, предназначенных для реализации приведенных выше подходов по работе с геопространственными данными при диспетчеризации пространственных процессов, приведено в работе [3].

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

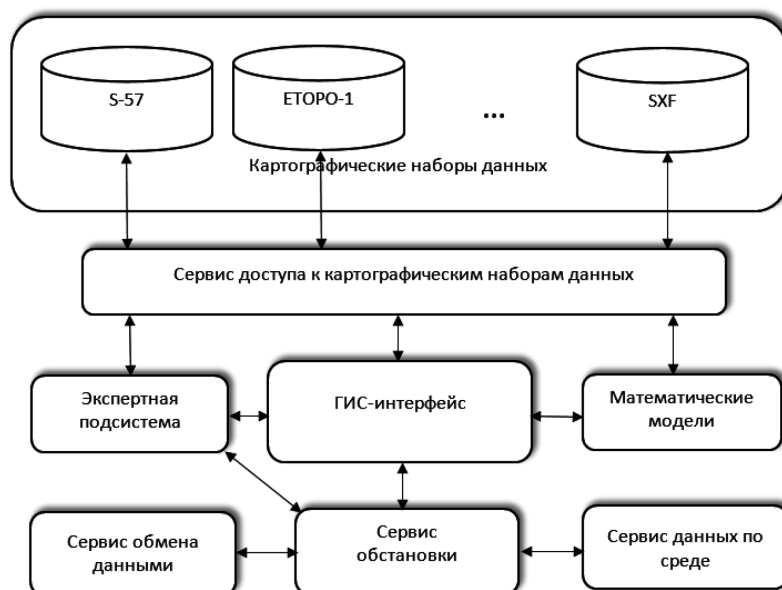


Рис. 2. Архитектура программной системы для работы с картографическими наборами данных при диспетчеризации пространственных процессов

Интеллектуализация моделирования геопространственных процессов. Моделирование геопространственных процессов, осуществляемое в системах диспетчеризации, можно рассмотреть как некоторое гомоморфное преобразование, так как 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 [4]. При таком подходе основным принципом системного моделирования является *принцип многомодельности*, реализация которого применительно к задаче выявления нештатных ситуаций в процессе протекания 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 $r_M = M, R_M, R_M \subseteq M \times M$. 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 $M_j (j = \overline{1, i})$ [5]. 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 $M_i, M_j (i, j = \overline{1, n}, i \geq j)$ связана отношением моделирования (что записывается как $M_i r_M M_j$ экспертные знания M или как $M_i, M_j \in R_M$) содержательно означает, что 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:

– *рефлексивности*:

$$\forall (i = \overline{1, n}) M_i r_M M_i, \quad (22)$$

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

– *антисимметричности*:

$$\forall (i, j = \overline{1, n}, i \neq j) M_i r_M M_j \Rightarrow \neg (M_j r_M M_i), \quad (23)$$

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);

– *транзитивности*:

$$\forall (i, j, k = \overline{1, n}) M_i r_M M_j \wedge M_j r_M M_k \Rightarrow (M_i r_M M_k), \quad (24)$$

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_j ;

– *полноты*:

$$\forall (i, j = \overline{1, n}) M_i r_M M_j \vee M_j r_M M_i, \quad (25)$$

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

Свойства (22) – (24) определяют наличие на множестве M частичного (нестроого) порядка, а свойство (25) превращает данный порядок в строгий (линейный). Количество звеньев в цепочке моделей должно определяться, с одной стороны, спецификой моделируемых геопространственных процессов и характером решаемых задач по их диспетчеризации, а 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 [5], [6]:

– 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 могут быть условно названы: содержательным, структурно-содержательным, структурно-формальным, формальным и программным [7].

Особенности представления экспертных знаний на каждом из уровней моделирования сводятся к следующему [8] – [16]:

1. Содержательная (концептуальная) модель экспертных знаний, являясь их «первичной» моделью, соответствует вербальному (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.

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

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

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.

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 диспетчеризируемых пространственных процессов.

Заключение (Conclusion)

Эффективность диспетчеризации пространственных процессов в соответствующем географическом районе Мирового океана определяется качеством обработки информации на отдельных этапах функционирования многоуровневой системы поддержки диспетчерских решений по управлению объектами морского транспорта. 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 гео-

пространственной 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 на морском транспорте.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошник И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 549 с.
2. Ermolaev V. Modeling of Search Actions Under the Conditions of Variable Environment Properties / V. Ermolaev // Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013). — Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. — Pp. 107–117. DOI: 10.1007/978-3-642-31833-7_7.
3. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / Под общ. ред. чл.-кор. РАН Р. М. Юсупова и д-ра техн. наук В. В. Поповича. — СПб.: Наука, 2013. — 284 с.
4. Крон Г. Исследование сложных систем по частям — диакоптика / Г. Крон. — М.: Наука, 1972. — 544 с.
5. Де Марко Т. Вальсируя с медведями. Управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения / Т. Де Марко, Т. Листер. — М.: Изд. дом ДН, 2005. — 196 с.
6. Де Марко Т. Deadline. Роман об управлении проектами / Т. Де Марко. — М.: Изд-во «Манн-Иванов-Фербер», 2016. — 352с.
7. Дюваль П. М. Непрерывная интеграция. Улучшение качества программного обеспечения и снижение риска / П. М. Дюваль, С. Матиас, Э. Гловер. — СПб.: Символ, 2016. — 240 с.
8. Ермолаев В. И. Геоинформационная поддержка управления морской распределенной системой наблюдения / В. И. Ермолаев, С. Н. Потапычев, Я. А. Ивакин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. — 2016. — № 3. — С. 3–9.
9. Ивакин Я. А. Применение ГИС-инструментария геохронологического трекинга для сетевого анализа биографических данных / Я. А. Ивакин, О. В. Смирнова, С. Н. Потапычев // Информация и космос. — 2017. — № 1. — С. 132–138.
10. Мичурин С. В. Результативность и качество программных комплексов ситуационного управления для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта / С. В. Мичурин, Я. А. Ивакин // Информационно-управляющие системы. — 2016. — Т. 83. — № 4. — С. 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.
11. Ивакин Я. А. Обеспечение эффективности геоинформационных систем управления пространственными процессами / Я. А. Ивакин, А. М. Муся // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Системы и средства отображения информации и управления спецтехникой. — 2015. — № 1. — С. 151–159.
12. Кочура А. Е. Сингулярные матричные пучки в обобщенной симметричной проблеме собственных значений / А. Е. Кочура, Л. В. Подколызина, Я. А. Ивакин, И. И. Нидзиев // Труды СПИИРАН. — 2013. — № (26). — С. 253–276.
13. Ермолаев В. И. Применение интеллектуальных геоинформационных систем при проектировании гидроакустических средств / В. И. Ермолаев // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. Санкт-Петербургского общества информатики, вычислительной техники, систем связи и управления. — 2016. — С. 446–450.
14. Popovich V. 3D+t Acoustic Fields Modeling Based on Intelligent GIS / V. Popovich, Yu. Leontev, V. Ermolaev, D. Chirov, O. Smirnova // Coordinates. — 2015. — Vol. XI. — Is. 02. — Pp. 18–21.

15. Цветков М. В. Использование интеллектуальной географической информационной системы для выявления опасных ситуаций, связанных с безопасностью судоходства по северному морскому пути / М. В. Цветков, Д. О. Малышева // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016): материалы 9-й конф. по проблемам управления. — СПб.: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»». — С. 465–475.

16. Ивакин Я. А. Методы интеллектуализации промышленных геоинформационных систем на основе онтологий: дисс. д-ра техн. наук / Я. А. Ивакин. — СПб.: СПбГЭТУ, 2009. — 356 с.

REFERENCES

1. Miroshnik, I. V., V. O. Nikiforov, and A. L. Fradkov. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami*. SPb.: Izd-vo Nauka, 2000.
2. Ermolaev, Victor. "Modeling of Search Actions Under the Conditions of Variable Environment Properties." *Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. 107–117. DOI: 10.1007/978-3-642-31833-7_7.
3. Yusupov, R. M., and V. V. Popovich, eds. *Intellectual'nye geograficheskie informatsionnye sistemy dlya monitoringa morskoi obstanovki*. SPb: Nauka, 2013.
4. Kron, G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam – diakoptika*. M.: Nauka, 1972.
5. DeMarko, T., and T. Lister. *Val'siruya s medvedyami. Upravlenie riskami v proektakh po razrabotke programmnogo obespecheniya*. M.: Izdatel'skii dom DH, 2005.
6. DeMarko, T. *Deadline. Roman ob upravlenii proektami*. M.: Izdatel'stvo «Mann-Ivanov-Ferber», 2016.
7. Dyugal', P. M., S. Matias, and E. Glover. *Nepreryvnaya integratsiya. Uluchshenie kachestva programmnogo obespecheniya i snizhenie riska*. SPb.: Simvol, 2016.
8. Ermolaev, V. I., S. N. Potapychev, and J. A. Ivakin. "Geoinformation support of maritime surveillance distribution system." *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical science* 3 (2016): 3–9.
9. Ivakin, Ya. A., O. V. Smirnova, and S. N. Potapychev. "Primenenie GIS-instrumentariya geokhronologicheskogo trekinga dlya setevogo analiza biograficheskikh dannykh." *Informatsiya i kosmos* 1 (2017): 132–138.
10. Michurin, S. V., and Ya. A. Ivakin. "The Effectiveness and Quality of Situational Management Software for Automated Dispatching of Air Transport Spatial Processes." *Information and Control Systems* 83.4 (2016): 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.
11. Ivakin, Ya. A., and A. M. Musya. "Obespechenie effektivnosti geoinformatsionnykh sistem upravleniya pro-stranstvennymi protsessami." *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Sistemy i sredstva otobrazheniya informatsii i upravleniya spetstekhniki* 1 (2015): 151–159.
12. Kochura, Alexander Eugenyevich, Ludmila Victorovna Podkolzina, Yan Albertovich Ivakin, and Ivan Ivanovich Nidziev. "Singular matrix bundles in a generalized symmetric problem of eigenvalues." *SPIIRAS Proceedings* 3(26) (2013): 253–276.
13. Ermolaev, V. I. "Primenenie intellektual'nykh geoinformatsionnykh sistem pri proektirovanii gidroakusticheskikh sredstv." *Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost' Sbornik trudov. Sankt-Peterburgskoe obshchestvo informatiki, vychislitel'noi tekhniki, sistem svyazi i upravleniya*. 2016. 446–450.
14. Popovich, Vasily, Yuri Leontev, Victor Ermolaev, Dmitry Chirov, and Oksana Smirnova. "3D+t Acoustic Fields Modeling Based on Intelligent GIS." *Coordinates* XI.02 (2015): 18–21.
15. Tsvetkov, M. V., and D. O. Malysheva. "Ispol'zovanie intellektual'noi geograficheskoi informatsionnoi sistemy dlya vyyavleniya opasnykh situatsii, svyazannykh s bezopasnost'yu sudokhodstva po severnomu morskому puti." *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016): Materialy 9-i konferentsii po problemam upravleniya*. SPb.: Kontsern "Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut "Elektroprigor". 465–475.
16. Ivakin, Ya. A. *Metody intellektualizatsii promyshlennykh geoinformatsionnykh sistem na osnove ontologii*. Dr. diss. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet «LETI», 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивакин Ян Альбертович —

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14 линия В. О., д. 39
e-mail: ivakin@oogis.ru

Потапычев Сергей Николаевич — кандидат
технических наук, старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)

199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14 линия В. О., д. 39
e-mail: potapychev@oogis.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivakin, Yan A. —

Dr. of Technical Sciences, professor,
leading researcher
St. Petersburg Institute
for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: ivakin@oogis.ru

Potapychev, Sergei N. —

PhD, senior researcher
St. Petersburg Institute
for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: potapychev@oogis.ru

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

Received: June 19, 2018.