УДК 004.9:[528.7+504.064.37]:628.4.038 doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-311-328

Оценка качества построения геоинформационной системы автоматизированного поиска техногенного мусора по видеоданным воздушной съемки

В.Г. Бурлов[1], А.В. Кириенко[2], В.Н. Остриков[2], О.В. Плахотников[2]

[1] Российский государственный гидрометеорологический университет
[2] Санкт-Петербургский филиал АО «КБ «Луч», ostrvad@mail.ru

Предлагается адаптация математической модели, используемой при разработке систем государственного управления, к оценке качества построения геоинформационной системы автоматизированного поиска техногенного мусора. На примере оперативного визуального поиска оператором токсичных обломков отделяющихся частей ракетоносителей, разбросанных на значительных площадях, сравниваются возможности решения задачи по данным, полученным видеоспектральной и обычной оптико-электронной аппаратурой. При близких значениях вероятности обнаружения производительность системы видеоспектральной съемки в пять раз превышает возможности геоинформационной системы, построенной на основе оптико-электронной аппаратуры существенно более высокого пространственного разрешения.

Ключевые слова: синтез геоинформационной системы, экологическая безопасность, оперативный автоматизированный поиск техногенного мусора, оптико-электронная и видеоспектральная съемка.

Quality assessment of building a geoinformation system for automated man-made debris search based on aerial video data

V.G. Burlov[1], A.V. Kirienko[2], V.N. Ostrikov[2], O.V. Plakhotnikov[2]

[1] Russian State Hidrometeorological University, St. Petersburg, Russia
[2] Saint-Petersburg branch of Joint-Stock Company «Lutch», St. Petersburg, Russia

To assess the quality of building a geoinformation system for searching for man-made debris, which provides real-time data acquisition and processing, the articles proposes to adapt the mathematical model used when developing public administration systems. The model takes into account the time spent by a decoder operator on identifying low-contrast objects based on data obtained by traditionally used optoelectronic equipment and on the results of video spectral (hyperspectral) shooting of large areas from an air carrier. Using the example of the implementation of a real-time search for inconspicuous toxic fragments of separable parts of launch vehicles scattered over large areas, the effectiveness (probability of identification and required costs) of solving the problem is compared with two types of building a geoinformation system. Based on the accepted model, the probability of correct detection of objects is calculated by automated identification of fragments of debris by spectral "cubes" of low spatial resolution. Then, for comparison, the probability of direct visual recognition of search objects is estimated from high-spatial resolution images, the requirements for which are set by the Johnson criterion. The calculations have shown that, having close final values of the probabilities of solving the problem, the performance of the video spectral survey system, taking into account the capabilities of the operator, requires the involvement of five times fewer operators to implement real-time search for objects.

Keywords: geoinformation system synthesis, environmental safety, operational automated search for man-made debris, optical-electronic and video-spectral survey.

For citation: *V.G. Burlov, A.V. Kirienko, V.N. Ostrikov, O.V. Plakhotnikov.* Quality assessment of building a geoinformation system for automated man-made debris search based on aerial video data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2021. 63: 311—328. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-311-328

Введение

Вопрос построения геоинформационных систем (ГИС) оперативного поиска наземных объектов по данным дистанционного зондирования с участием оператора, как лица принимающего решение (ЛПР), представляется актуальной проблемой [1—5]. При этом оптимальное построение таких ГИС сводится к перебору возможных вариантов их реализации с оценкой отдельных частных показателей, удовлетворяющих требуемым значениям.

Вместе с тем известен подход, используемый при разработке технологии управления социально-экономическими образованиями [1, 6], включающей в себя человеческую деятельность как элемент контура управления. Такой подход принципиально построен на основе синтеза, что обеспечивает условия гарантированного выполнения поставленной задачи с прогнозируемым результатом [7].

Предлагается адаптировать известное решение к построению ГИС поиска с оценкой качества визуального обнаружения объектов оператором. Рассмотрены два варианта синтеза: первый — по данным видеоспектральной аппаратуры с автоматизированным выделением искомых фрагментов; второй — традиционный — по результатам оптико-электронной съемки. Предлагаемый подход эффективен при реализации именно оперативного поиска, например, получения данных для своевременного обнаружения и ликвидации обломков (часто высокотоксичных) отделяющихся частей (ОЧ) ракетоносителей (РН), образующихся в ходе космических и ракетных запусков. Трудность решения такой задачи связана с необходимостью обнаружения большого количества фрагментов малого размера [2] при их возможном маскировании для глаза оператора элементами мультиконтрастного фона и их разбросе на больших площадях.

Традиционно при построении такого рода ГИС используется воздушная съемка (в том числе на дронах), реализуемая на основе оптико-электронной аппаратуры (ОЭА). Аппаратура, в соответствии с критерием Джонсона [8], должна обеспечивать пространственное разрешение, в разы превышающее характерные размеры искомых объектов. В итоге обработка больших объемов данных приводит к значительным затратам времени оператора на распознавание, особенно при необходимости обеспечения высокой вероятности решения задачи.

Как показано в [2—5], для повышения эффективности (оперативности и качества) обнаружения малозаметных объектов поиска возможно применение специальной аппаратуры — средств дистанционной съемки видеоспектрального (ВС) типа (в англоязычной литературе — «гиперспектрального»). В итоге процесс распознавания ВС данных в сравнении с данными ОЭА существенно ускоряется, поскольку оператору прилагается образ регистрируемой сцены с заведомо выявленными элементами снимка, подозрительными на наличие искомых

объектов. Кроме того, ВС данные более чувствительны к обнаружению маломерных фрагментов, что позволяет снизить пространственное разрешение аппаратуры. В итоге оперативная производительность ГИС воздушного поиска значительно повышается.

Однако, используемые выше доводы о преимуществе ВС съемки над системой с ОЭА носят качественный характер. Для синтеза средства поиска, функционирующих в реальном масштабе времени, требуются количественного сравнения. При этом необходимо учитывать конкретные свойства аппаратуры и физические возможности оператора как ЛПР. В анализируемой прикладной литературе такой метод, применительно к рассматриваемой проблеме, в явном виде найти не удается. В связи с этим цель работы состоит в разработке математической модели расчета вероятностей оперативного поиска объектов по данным двух типов: оптико-электронной съемки и видеоспектральных данных с участием оператора.

Постановка задачи и синтез модели

Адаптация известного подхода [6] к решению задачи оперативного визуального поиска фрагментов ОЧ РН состоит в построении подробной модели информационного взаимодействия оператора с видеоданными, ниже условно названной системой «решения оператора» (РО). Для построения такой системы необходимо знать закон ее функционирования [9].

Исходя из сути системы РО строится последовательность преобразований вербальной модели к формальной — математической. Для обеспечения непротиворечивой логической цепочки рассуждений поступают следующим образом.

Руководствуясь принципом трехкомпонентности познания, исследуемый процесс рассматривается на трех уровнях: методологическом (условие существования); методическом (условие перевода объекта из настоящего состояния в требуемое); технологическом (условия реализации перевода объекта из настоящего состояния в требуемое). Используя принцип целостности [6], на каждом из трех уровней представления процесс трактуется связью в виде цепочки: «объект—предназначение—действие». При этом используются методы декомпозиции, абстрагирования, агрегирования [3].

Декомпозиция — метод, при котором исследование системы (модели) в целом заменяется исследованием отдельных ее подсистем (подмоделей) с учетом их взаимного влияния друг на друга.

Абстрагирование — метод, при котором система, ее элементы представляются в сознании человека некоторыми символами.

Агрегирование — метод обобщения моделей, при котором множество элементов моделей агрегируются (обобщаются) в элементы, на которых строится модель, имеющая существенно меньшую размерность, чем исходная.

Для сохранения целостности процесса РО необходимо и достаточно установить связь между категориями в связке «объект—предназначение—действие» [6]. Далее следует интерпретация «объекта», как элемента модели решения, в виде «обстановки». То есть в ходе функционирования средства для оператора принятие

решения зависит от «обстановки» (факторы и временные условия поступления видеоданных). «Действие» следует интерпретировать, как элемент модели «решения», в виде «информационно-аналитической работы» — это изучение и анализ видеоданных об обстановке. «Предназначение» интерпретируется как элемент модели «решения» в виде его «реализации». То есть — это окончательное установление факта присутствия выделенного элемента (зоны) на рассматриваемом кадре с отнесением его либо к ложному, либо к искомому объекту. После этого следуют действия по автоматизированному определению координат объекта.

На среднем уровне (методическом) (рис. 1) реализуется причинно-следственная связь, согласованная с тремя базовыми принципами. Применяя метод абстрагирования, интерпретируются математические категории «обстановка» (модель объекта), «информационно-аналитическая работа» (модель действия) и «реализация» (предназначение).

Основным ресурсом, определяющим функционирование системы является время, поскольку принятие решения наиболее критично к показателю своевременности получения обработанных данных. Отсюда целесообразно учесть следующее.

1. Обстановку интерпретировать как среднее время поступления видеоданных, отвечающих совокупности признаков на снимке, подозрительных на наличие

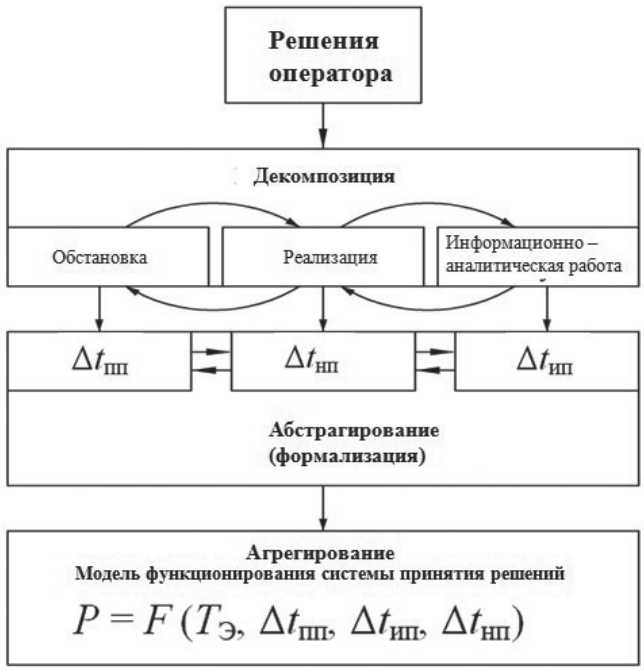

Рис. 1. Структурная схема модели «решение оператора».

Fig. 1. Block diagram of the model «operator's decision».

искомого объекта. Назовем это периодичностью появления информационной проблемы [6].

2. Информационно-аналитическую работу — как среднее время идентификации (обнаружение совокупности визуальных признаков) элементов наблюдаемого объекта.

3. Реализацию — как среднее время принятия решения на обнаруженной совокупности признаков, то есть данных о наличии объекта или его отсутствии (ложная тревога) и расчета его координат.

Поток информационных видеоданных (видеокадров) поступает оператору с определенной заданной периодичностью — $T_э$. Это время, ранее затраченное информационной системой на съемку местности. Кроме того, это время на шифрование и передачу видеоданных по радиоканалу, их декодирование и предварительную обработку (снижение шумов, повышение контрастности и удобное для оператора отображение снимка на мониторе). С другой стороны, это время, за которое оператор должен обработать весь поступивший кадр для выявления всех элементов снимка (зон), подозрительных на наличие объектов поиска.

Совокупность подозрительных зон появляется в кадре с некоторой средней периодичностью, равной $\Delta t_{ПП}$ (валовое поступление элементов снимка на анализ). Для успешного реагирования на появление проблемы (подозрительной зоны) оператору необходимо вовремя обнаружить и проанализировать каждую проблему, которая должна быть обработана до появления следующей. Проблемы распознаются оператором со средним временем — $\Delta t_{ИП}$, которое характеризует его квалификацию. После обнаружения подозрительной зоны оператор приступает к принятию окончательного решения о ее принадлежности к искомому типу или об ее отнесении к ложному проявлению. Такая процедура может потребовать затрат времени на дополнительную обработку для принятия решения, после чего оператор затрачивает время на команду фиксации координат обнаруженного объекта. Среднее время вынесения окончательного решения о принадлежности обнаруженной зоны к объекту и расчет ее координат — $\Delta t_{НП}$ (время нейтрализации проблемы).

Показатель эффективности оператора рассматривается как функция четырех основных параметров $P = F(T_э, \Delta t_{ПП}, \Delta t_{ИП}, \Delta t_{НП})$. Все значения времени, с которыми оперирует модель, являются средними, поскольку оператор, в общем случае, может обработать кадр существенно быстрее, когда отсутствуют объекты как таковые и на снимке имеются только фоновые элементы. Он может также не задействовать все время (по каждой поступающей проблеме) на обнаружение и не привлекать дополнительные ресурсы (даже на определение координат, если объектов в кадре нет).

В итоге синтез модели системы «Решения оператора» на основе заданного показателя эффективности — вероятности решения задачи — сводится к оценке трех основных временных параметров функционирования системы при использовании четвертого параметра — такта поступления и зафиксированной на мониторе кадровой информации. То есть базовыми элементами принятия решения

в системе являются: обстановка, информационно-аналитическая деятельность и реализация — достижение конечного результата функционирования системы.

В реальных условиях оператор, в зависимости от его состояния и квалификации, может оказаться в двух ситуациях:

— он не готов к данным характеристикам сложившейся обстановки;

— он готов к разрешению возникшей проблемы в процессе обработки данных, но это требует от него дополнительных временных ресурсов.

Для учета в модели этих ситуаций выделяются ее четыре базовых состояния (рис. 2).

Первое состояние S_1 — это состояние, в котором находится система РО на начало рассматриваемого процесса (момент поступления кадра на анализ оператору).

Второе состояние S_2 характеризует достижение процессом конечного решения задачи: обнаружение и классификация искомых объектов с определением их координат либо принятие решения о наличии ложных зон.

Третье базовое состояние системы (процесса) S_3 характеризуется фактом проявления проблемы — обнаружение оператором подозрительной на наличие искомого объекта зоны. В состоянии S_3 возникает необходимость идентификации проблемы, на выполнение которой оператор тратит время $\Delta t_{\text{ип}}$. Частота перехода из состояния S_3 в состояние S_4 есть величина $\nu_1 = \dfrac{1}{\Delta t_{\text{ип}}}$, где $\Delta t_{\text{ип}}$ — среднее время

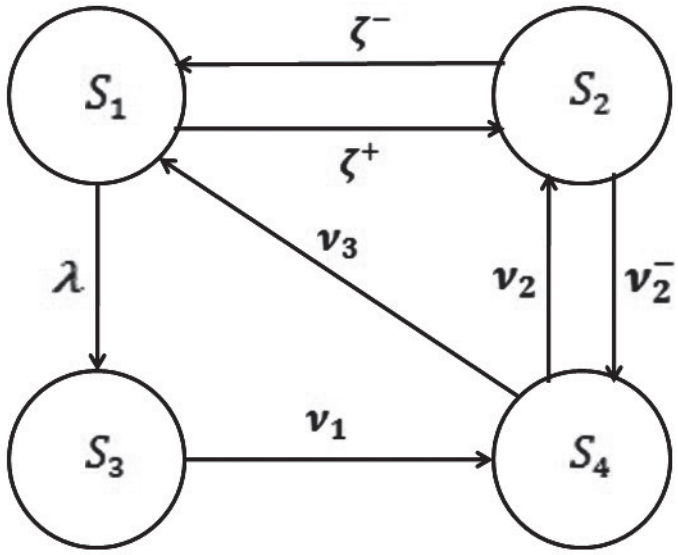

Рис. 2. Граф процесса функционирования системы «решение оператора» (обозначения приведены в тексте).

Fig. 2. Graf of the system operation process «operator's decision» (the symbols are given in the text).

идентификации проблемы. На этом этапе осуществляется подготовка к подключению дополнительных временных ресурсов. То есть в процессе анализа решения система переводится в состояние S_4, в котором оператор уже будет понимать, каким образом он должен решить задачу. Переход из состояния S_4 в состояние S_2 решается с привлечением дополнительного временного ресурса $\Delta t_{\text{НП}}$ — времени нейтрализации проблемы. В $\Delta t_{\text{НП}}$ также входит время, затрачиваемое системой на определение координат объекта, если объект поиска обнаружен. В том случае, когда оператор пропускает текущую зону, подозрительную на наличие объекта поиска, система переходит обратно в состояние S_1 с частотой ν_3, характеризующей вероятность пропуска искомого объекта.

В состоянии S_2 возможны два варианта развития ситуации:

— в процессе решения проблемы оператор затратил недопустимо большое время, что равнозначно невыполнению решения задачи. Это характеризуется переходом системы РО из состояния S_2 в состояние S_1;

— время, затраченное на решение возникшей проблемы, находится в допустимых пределах при решении задачи оператором.

Ситуация отката системы в исходное состояние характеризует способность оператора к процессу распознавания на множестве изученных им задач. Частота перехода системы из состояния S_1 в состояние S_2 (ζ^+) равна величине, обратной среднему времени выполнения целевой задачи $T_{\text{Э}}$, которая характеризует степень подготовленности оператора, а частота ζ^- характеризует среднюю частоту невыполнения текущей проблемы. Эта величина зависит от вероятности, определяющей возможную среднюю ошибку принятого решения оператором по опознанию подозрительной на объект поиска зоны.

Частота перехода из состояния S_4 в состояние S_2 есть $\nu_2 = \dfrac{1}{\Delta t_{\text{НП}}}$, где $\Delta t_{\text{НП}}$ — среднее время «нейтрализации» проблемы. От соотношения ν_2 зависит степень подготовленности оператора к решению задачи в сложных, в том числе ранее неизвестных ситуациях.

Ниже, для получения аналитического решения, принимаются следующие основные допущения и предположения.

1. Рассматривается информационная система — система взаимодействия оператора с потоком поступающих видеоданных.

2. Промежутки времени между моментами обнаружения зон, подозрительных на наличие объектов поиска (проявления проблем) являются величинами случайными.

3. Обнаруженные совокупности признаков во времени образуют поток, который весьма близок к потоку Пуассона. В большинстве случаев для моделей эргатических систем (человек—техника) это предположение достаточно обосновано [10].

4. Время обработки данных по зонам является величиной случайной.

5. Обработанные в системе данные о зонах используются далее для принятия конечных решений.

6. Рассматривается случай, когда время пребывания получаемых зон ограничено и соизмеримо со временем, которое необходимо для их идентификации, а также обработки данных и принятия решений.

7. Разрабатываемая система предназначена для оценивания потенциальных возможностей системы РО в зависимости от сложившейся обстановки.

При изучении марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем в описываемом графе состояний системы над стрелками, ведущими из состояния S_i в S_j, проставляют соответствующие интенсивности λ_{ij}. Такой граф называют «размеченным» [6]. Формализация системы имеет следующий общий вид.

Пусть некоторая система S имеет конечное число состояний S_0, S_1, S_2, …, S_n. Случайный процесс, протекающий в этой системе, описывается вероятностями $p_0(t)$, $p_1(t)$, $p_2(t)$, …, $p_n(t)$, где $p_i(t)$ — вероятность того, что система S в момент t находится в состоянии S_i. Для любого t выполняется соотношение:

$$\sum_{i=1}^{n} p_i(t) = 1. \tag{1}$$

Вероятности состояний $p_i(t)$ находят путем решения системы дифференциальных уравнений [2]:

$$\frac{dp_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_{ji} p_j(t) - p_i(t) \sum_{j=1}^{n} \lambda_{ij}, \text{ где } i, j = 1, \ldots n. \tag{2}$$

Здесь величина $\lambda_{ji} p_j(t)$ называется потоком вероятностей перехода из состояния S_i в S_j, причем интенсивность потоков λ_{ij} может в общем случае зависеть от времени или быть постоянной.

Уравнения типа (2) составляют по размеченному графу состояний [11] системы, пользуясь следующим мнемоническим правилом: производная вероятности каждого состояния равна сумме всех потоков вероятности, идущих из других состояний в данное состояние, минус сумма всех потоков вероятности, идущих из данного состояния в другие.

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова—Чепмена [11] для рассматриваемой ситуации. Она принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dp_1(t)}{dt} = -\left(\zeta^{+} + \lambda\right) p_1(t) + \zeta^{-} p_2(t) + \nu_3 p_4(t) \\ \dfrac{dp_2(t)}{dt} = \zeta^{+} p_1(t) - \left(\nu_2^{-} + \zeta^{-}\right) p_2(t) + \nu_2 p_4(t) \\ \dfrac{dp_3(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - \nu_1 p_3(t) \\ \dfrac{dp_4(t)}{dt} = \nu_2^{-} p_2(t) + \nu_1 p_3(t) - \left(\nu_2 + \nu_3\right) p_4(t) \end{cases}. \tag{3}$$

Здесь, как было отмечено выше, введены обозначения:

$$\zeta^{+} = \frac{1}{T_{\text{Э}}},\ \lambda = \frac{1}{\Delta t_{\text{ПП}}},\ \nu_1 = \frac{1}{\Delta t_{\text{ИП}}},\ \nu_2 = \frac{1}{\Delta t_{\text{НП}}}.$$

Выше введен показатель частоты срыва процесса решения задачи (ζ^{-}), определяющий, насколько часто результаты обработки данных могут не соответствовать требованиям процесса распознавания.

Применительно к статическому случаю, представленному на графе по рис. 2, описываемому системой уравнений (3), матрица алгебраических уравнений A, вектор B (правой части) и вектор решений P будут иметь нижеозначенный вид (производные в левой части приравниваются нулю). При этом система преобразуется дополнением условия полноты [11], то есть вместо четвертого уравнения в (3) используется условие: $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$. Тогда:

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\zeta^{+} + \lambda\right) & \zeta^{-} & 0 & \nu_3 \\ \zeta^{+} & -\left(\nu_2^{-} + \zeta^{-}\right) & 0 & \nu_2 \\ \lambda & 0 & -\nu_1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};\ B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix};\ P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix}. \qquad (4)$$

В итоге решение уравнений вероятностей состояний системы имеет вид:

$$P = A^{-1}B. \qquad (5)$$

То есть с учетом приведенного конкретного вида вектора B решение представляет собой правый столбец матрицы, обратной A. Рассчитываемые вероятности характеризуют степень меры возможностей системы РО в соответствующем состоянии.

Показателем эффективности функционирования системы РО является вероятность того, что каждая зона, подозрительная на наличие искомого объекта (задача), возникающая перед системой, будет идентифицирована, и задача решена при соответствующих значениях, входящих в систему уравнений (4)—(5) параметрах. Этот факт определяется составляющей p_2 вектора P — соотношением для ее состояния S_2. Таким образом, в итоге установлена аналитическая зависимость обобщенных характеристик «обстановки» $\Delta t_{\text{ПП}}$, «информационно-аналитической деятельности» $\Delta t_{\text{ИП}}$ и «нейтрализации проблемы» $\Delta t_{\text{НП}}$. Следуя работе [12], получен так называемый и определенный там «системообразующий фактор создания системы» в форме соотношения (5).

В общем случае можно задаться показателем уровня эффективности функционирования системы. Это вероятность того, что задача распознавания местности при поступлении кадров с заданной периодичностью $T_{\text{Э}}$ будет успешно решена. При этом каждая зона, подозрительная на наличие объекта поиска, выявленная в ходе анализа оператором, распознается и решается за время жизни кадра на мониторе. В результате реализуется процесс формирования запросов. Этот процесс представляется как функция среднего времени (постановки проблемы) перед

оператором для конечного распознавания в форме $\Delta t_{\text{ПП}} = f_1(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Функция связывает между собой состояния процесса формирования запросов и соответствующие обстоятельства, обеспечивающие получение этих запросов. Располагая характеристикой обстановки (средним временем проявления запросов), оператор, исходя из условия обеспечения показателя эффективности системы, формирует для каждого кадра следующие два процесса:

1) процесс идентификации запроса (выявление конкретных признаков), описанием которого является функция $\Delta t_{\text{ИП}} = f_2(y_1, y_2, \ldots, y_m)$;

2) процесс нейтрализации проблемы, описанием которого является функция $\Delta t_{\text{НП}} = f_3(z_1, z_2, \ldots, z_k)$ (то есть решение о распознавании объекта поиска и его конечная обработка).

При этом вектор X характеризует процесс образования запросов, Y — процесс первичной идентификации, Z — процесс конечного обнаружения и оценку координат выявленного объекта поиска. Набор векторов X, Y, Z формируется на основе изучения свойств функционирования системы и оператора, в зависимости от его опыта, физических возможностей и состояния. Рассмотренный синтез системы при совокупности полученных соотношений позволяет реализовать подход к ее конкретному построению.

На основе вышеизложенного реализация расчета на основе модели состоит из следующей последовательности.

1. Исходя из нужной скорости получения данных, задается время поступления кадров $T_{\text{Э}}$ и рассчитывается частота $\zeta^+ = \dfrac{1}{T_{\text{Э}}}$.

2. Из требования качественного функционирования системы задается вероятность исправной работы аппаратуры и средства воздушной съемки $p_{\text{Э}}$, на основе которой оценивается частота сбоя системы $\zeta^- = \dfrac{1 - p_{\text{Э}}}{p_{\text{Э}}}\zeta^+$ (более детально формирование выражения определено ниже, применительно к практической реализации).

3. Исходя из предварительной оценки, задается среднее возможное число зон, обнаруживаемых на видеокадре $N_{\text{в}}$. Отсюда временной интервал поступления зон $\Delta t_{\text{ПП}} = \dfrac{T_{\text{Э}}}{N_e}$ и частота $\lambda = \dfrac{1}{\Delta t_{\text{ПП}}}$.

4. На основании имеющегося опыта по оценке временного интервала, необходимого для обнаружения каждой зоны оператором, задается время «идентификации проблемы» $\Delta t_{\text{ИП}}$. Отсюда частота $\nu_1 = \dfrac{1}{\Delta t_{\text{ИП}}}$.

5. Исходя из заранее известного опыта функционирования оператора по распознаванию и обслуживанию зон, задается требуемое ему время, как $\Delta t_{\text{НП}}$ (время «нейтрализации проблемы»). Тогда частота $\nu_2 = \dfrac{1}{\Delta t_{\text{НП}}}$.

6. Учитывая свойства функционирования рассматриваемой системы с учетом ее реальных свойств (с обеспечением автоматизированного спектрального поиска или без оного, а также реализуемого пространственного разрешения аппаратуры), задается вероятность идентификации зоны оператором $p_{\text{ИП}}$. Тогда частота сбоя обнаружения объекта $\nu_3 = \nu_1 \dfrac{1 - p_{\text{ИП}}}{p_{\text{ИП}}}$.

7. Общее среднее время, необходимое для обработки принятых $N_{\text{в}}$ зон, подозрительных на наличие искомого объекта, составит, в общей сложности, $\left(\Delta t_{\text{НП}} + \right.$ $\left. + \Delta t_{\text{ИП}}\right) N_e$. Общая длительность жизни кадра для оператора составляет $T_{\text{Э}}$, отсюда вероятность («нейтрализации проблемы») $p_{\text{НП}} = p_{\text{ИП}} \dfrac{T_e}{\left(\Delta t_{\text{НП}} + \Delta t_{\text{ИП}}\right) N_e}$. Тогда частота сбоя системы применительно к окончательному выявлению объекта будет $\nu_2^- = \nu_2 \dfrac{1 - p_{\text{НП}}}{p_{\text{НП}}}$.

8. Рассчитанные величины $\zeta^+, \zeta^-, \lambda, \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_2^-$ полностью определяют элементы матрицы A в выражении (4), откуда на основе (5) рассчитывается вектор P, второй элемент которого p_2 является оценкой вероятности функционирования системы РО для заданных параметров.

Практическая реализация ГИС поиска и оценка ее качества

Как было отмечено выше, построение системы поиска ОЧ РН на основе данных воздушной съемки целесообразно рассмотреть для двух вариантов — применительно к средствам ВС съемки и применению ОЭА (традиционно используемой). На рис. 3 — пример представления данных воздушной съемки для случая мониторинга ОЧ РН. Здесь приведены результаты, полученные в ходе реального эксперимента по наблюдению фрагментов ОЧ РН на фоне травы в сентябре 2017 г. [2]. После передачи данных по радиолинии на наземный пункт обработки осуществляется автоматическая предварительная обработка данных с выделением зон потенциального нахождения объектов поиска. Применительно к ВС съемке весь полученный кадр укладывается на один экран монитора и к нему прилагается попиксельно совмещенный образ спектрального обнаружения искомых фрагментов (совмещен с образом сцены). Данные, полученные на основе ОЭА укладываются в 25 кадров и имеют в 5 раз более высокое пространственное разрешение в силу необходимости получения качественного распознавания. В эксперименте предполагается, что в поле зрения ВС кадра, а также всех 25 кадров для ОЭА находятся 6 реальных объектов ОЧ РН с размерами от 0,5 до 2 м.

Размеры формирующего кадра для ВС съемки составляли 2000 элементов (пикселей) по вертикали (по направлению вектора скорости) и 1000 элементов по горизонтали [2], что соответствует полномасштабному отображению кадра на экране монитора. Высота наблюдения — 1150 м. Параметры аппаратуры соответствуют на этой высоте геометрическому разрешению на местности в 0,646 м.

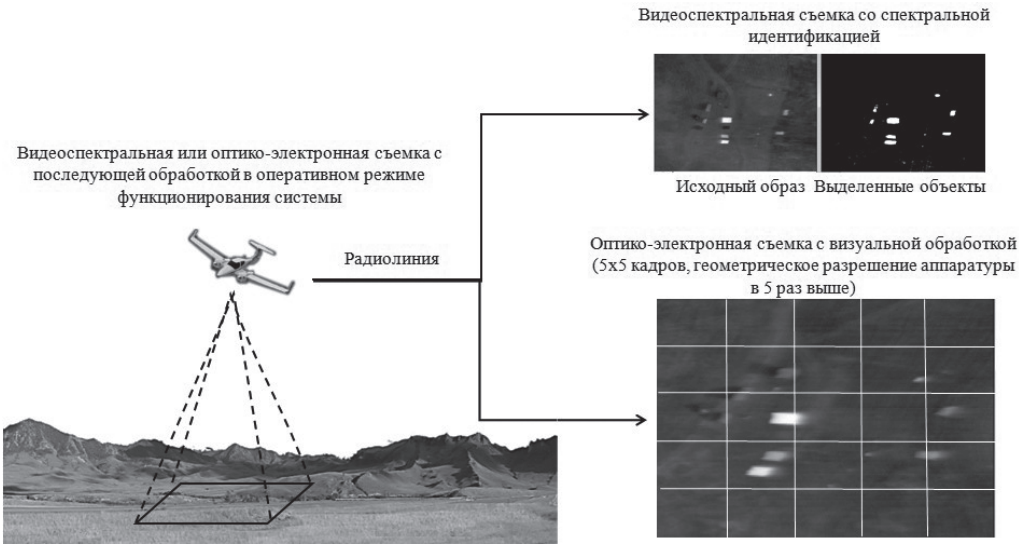

Рис. 3. Схема двух вариантов представления данных воздушной съемки.

Fig. 3. Diagram of the two options for obtaining aerial survey data.

Скорость движения носителя — 161 км/час. То есть расстояние, соответствующее длине кадра в 2000 строк, носитель пролетает за время 28,9 с.

Отсюда частота поступления кадров:

$$\zeta^{+} = \frac{1}{T_{Э}} = \frac{1}{28,9} = 0,035.$$

Оценку сбоя системы получения данных определим из следующих соображений. Рассмотрим автономно два состояния системы S_1 и S_2. Зададим вероятность исправной работы системы $p_{Э} = 0,98$. Это вероятность правильного функционирования аппаратуры с учетом возможных сбоев средства формирования кадра из-за технических, внешних неполадок или ошибок его настроек. В этом случае первое уравнение в системе (3) преобразуется в вид:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -\zeta^{+} p_1(t) + \zeta^{-} p_2(t) \text{ при } p_1 + p_2 = 1.$$

Или в статическом режиме, используя вышеприведенные соображения, приравнивая производную в левой части нулю, получим:

$$\zeta^{-} = \frac{1 - p_2}{p_2}\zeta^{+}.$$

Учитывая, что в данном случае $p_2 = p_{Э}$, рассчитаем:

$$\zeta^{-} = \frac{1 - p_{Э}}{p_{Э}}\zeta^{+} = \frac{1 - 0,98}{0,98}0,035 = 0,0007.$$

Примем вполне реальное предположение, что на наблюдаемой в кадре площади может находиться, в среднем, N_e = 10 зон, обнаруженных отметками на видеокадре, спектральные свойства которых соответствуют или близки спектрам искомых объектов, из них 6 истинные и 4 ложных [2]. Тогда временной интервал $\Delta t_{\text{ПП}} = \frac{T_{\text{Э}}}{N_e} = \frac{28,9}{10} = 2,9$ с. Отсюда $\lambda = \frac{1}{\Delta t_{\text{ПП}}} = 0,35.$

Исходя из имеющегося накопленного опыта визуального дешифрирования, аналогичного анализу, приведенному в [9], зададим среднее время, требуемое оператору на обнаружение зоны, подозрительной на наличие объекта, как $\Delta t_{\text{ИП}}$ = = 1,0 с. Тогда частота $\nu_1 = \frac{1}{\Delta t_{\text{ИП}}} = 1,0.$

Поскольку в системе наблюдения с применением ВС аппаратуры обработка данных предполагает не обезличенное обнаружение объектов поиска, а только таких, которые заведомо идентичны (или близки) по своим спектральным свойствам опорной сигнатуре, зададим высокую вероятность обнаружения реального объекта как $p_{\text{ИП}}$ = 0,98. Эта вероятность была подтверждена в серии экспериментов [2], несмотря на соизмеримое значение геометрического разрешения на местности данных ВС и минимального размера объектов поиска. Отсюда, следуя по аналогии вышеприведенной схемы (использована при определении ζ^-), частота сбоя обнаружения объекта определится как ν_3 = 0,02.

Опять же, исходя из накопленного опыта функционирования дешифровщика по распознаванию и обслуживанию обнаруженных на кадре зон, зададим время, требуемое оператору на обнаружение и обслуживание зоны, подозрительной на наличие объекта, как $\Delta t_{\text{НП}}$ = 2,0 с. Тогда частота $\nu_2 = \frac{1}{\Delta t_{\text{НП}}} = 0,5.$

В рассматриваемом варианте общее среднее время, необходимое для обработки принятых выше 10-ти зон, подозрительных на наличие искомого объекта, составит, в общей сложности, 30 с (сумма $\Delta t_{\text{НП}}$ и $\Delta t_{\text{ИП}}$, умноженная на возможное число зон). Вместе с тем общая длительность жизни кадра для дешифровщика составляет 28,9 с. Отсюда, для данного случая, вероятность $p_{\text{НП}} = 0,98\frac{28,9}{30,0} = 0,95.$ Тогда частота сбоя системы применительно к окончательному выявлению объекта определится как $\nu_2^- = \nu_2 \frac{1 - p_{\text{НП}}}{p_{\text{НП}}} = 0,5\frac{1 - 0,95}{0,95} = 0,03.$

В итоге выше заданы все требуемые для расчета вероятностей решения задачи параметры применительно к обработке данных на основе ВС аппаратуры.

В соответствии с выражением (5) вероятность решения задачи системой составит p_2 = 0,94. Это вторая составляющая вектора вероятности системы в состоянии S_2 на графе рис. 2.

На основе данных ОЭА Теперь рассмотрим второй вариант построения визуального поиска фрагментов оператором.

Схему построения ОЭА определим из соображения необходимости обнаружения объектов поиска размером 0,5 м на соизмеримой площади охвата местности по отношению к ВС съемке. Для выполнения условия правильного обнаружения объектов поиска размером 0,5 м по уровню вероятности, равном 0,95, в соответствии с критерием Джонсона [8], разрешение на местности должно быть не хуже 0,12 м, что в 5 раз выше требуемого разрешения, чем для ВС съемки. При соизмеримом охвате местности примем панхроматическую ОЭА, состоящую из линейки пяти кадров аналогичного формата, с последовательной съемкой в количестве пяти раз. Таким образом, за аналогичное время полета носителя 28,9 с ОЭА сделает 5×5 кадров требуемого формата, геометрическое разрешение которых будет в 5 раз выше и составит 0,12 м. При этом следует иметь в виду, что реальное, реализуемое для оператора, оптическое разрешение ОЭА обычно может быть еще в 1,2—1,5 раза хуже [9].

Частота поступления такой линейки из 5 кадров составит $\zeta^+ = \frac{1}{T_э} = \frac{1}{5,78} = 0,17.$

Вероятность правильного функционирования системы примем ту же, что и выше: $p_э = 0,98$. Отсюда $\zeta^- = \frac{1-p_э}{p_э}\zeta^+ = \frac{1-0,98}{0,98}0,17 = 0,0035.$

Примем также, что на наблюдаемой в линейке из пяти кадров площади будет в среднем, $N_e = 10$ зон, 2 из них — истинные объекты поиска, 8 — ложные (число ложно обнаруживаемых зон для результатов первичной обработки данных ОЭА существенно больше). Отсюда временной интервал $\Delta t_{ПП} = \frac{T_э}{N_e} = \frac{5,78}{10} = 0,58$ с. Тогда $\lambda = \frac{1}{\Delta t_{ПП}} = 1,73.$

Зададим время, требуемое оператору на обнаружение зоны, подозрительной на наличие объекта: $\Delta t_{ИП} = 1,5$ с. Увеличенное время обусловлено необходимостью перемещения внимания между зонами ввиду того, что все 5 кадров линейки не умещаются полностью на экран в полном масштабе. Отсюда частота $\nu_1 = \frac{1}{\Delta t_{ИП}} = 0,7.$ Вероятность обнаружения объекта поиска зададим по критерию Джонсона [8] в соответствии с приведенными выше условиями съемки ОЭА как $p_{ИП} = 0,95$. Тогда частота сбоя обнаружения объекта определится как $\nu_3 = 0,035$.

Зададим время, требуемое оператору на обслуживание зоны, подозрительной на наличие объекта: $\Delta t_{НП} = 2,0$ с. Отсюда частота $\nu_2 = \frac{1}{\Delta t_{НП}} = 0,5.$ Вероятность нейтрализации одной проблемы определим также по критерию Джонсона в соответствии приведенными выше условиями съемки ОЭА как $p_{НП0} = 0,8$, исходя из соображений различения объектов поиска по 2-му уровню («определение ориентации»). Допущенное упрощение в данной конкретной задаче допустимо ввиду того, что обломки не имеют конкретной геометрической конфигурации, а условия их поиска обычно не связаны с множеством однотипных объектов.

В рассматриваемом варианте общее среднее время, необходимое для обработки принятых выше 10-ти зон в линейке, подозрительных на наличие искомого объекта, составит, в общей сложности, 35 с. Вместе с тем, общая длительность жизни линейки кадров для дешифровщика составляет 5,78 с, отсюда, для данного случая, вероятность $p_{\text{НП}} = 0,8\dfrac{5,78}{35,0} = 0,13.$ Тогда частота сбоя системы применительно к окончательному выявлению объекта определится как $\nu_2^- = \nu_2 \dfrac{1 - p_{\text{НП}}}{p_{\text{НП}}} =$

$= 0,5\dfrac{1 - 0,13}{0,13} = 3,28.$

При принятых выше параметрах системы для данных на основе ОЭА в соответствии с выражением (5) рассчитанная вероятность решения задачи составляет $p_2 = 0,12$.

То есть для принятых выше параметров в рассмотренном варианте систему оперативного поиска объектов на основе съемки ОЭА невозможно реализовать. Для повышения вероятности решения задачи уменьшим нагрузку на оператора, определив на обработку каждого кадра из линейки по отдельному оператору. При этом уменьшается количество зон на каждого оператора до двух и уменьшается $\Delta t_{\text{ИП}}$ до 1 с. Тогда получим, что вероятность решения задачи составляет $p_2 = 0,75$.

То есть использование системы оперативного визуального поиска фрагментов ОЧ РН на основе съемки ОЭА несколько ниже по вероятности относительно применения аппаратуры ВС съемки с той же высоты. При этом, для необходимости обеспечения качественного дешифрирования, обрабатываемая площадь анализируемой сцены одним оператором в 5 раз меньше. Отсюда конечная эффективность использования системы поиска на основе ВС съемки (по ее производительности), в рассматриваемом варианте расчета, в среднем в 5 раз выше по сравнению с применением ОЭА. Необходимо также учесть, что принятое в расчете упрощение задачи нахождения ОЧ РН в соответствии с критерием Джонсона [8] соответствует 2-му уровню различения. Для полноценного решения задачи с помощью ОЭА требуется использование 3-го уровня различения, что приводит к повышению разрешения на местности до 2,5—5 см. Отсюда дополнительное увеличение ресурсов аэрофотосъемки и привлечения операторов.

Как это следует из вышеприведенного описания, вероятностные оценки результатов функционирования средства поиска в оперативном режиме того или иного построения существенно зависят от квалификации используемых операторов, параметров аппаратуры, принятой схемы синтеза системы. Однако, в любом случае, что также подтверждается данными зарубежных источников [3—5], для оперативного режима решения подобных задач весьма существенным преимуществом обладают именно системы, построенные на основе ВС съемки. Так, в военном применении систем с конечной идентификацией до типа объекта наблюдения, где фактор времени оперативной обработки поступающих данных

особенно важен, именно такое использование средств ВС съемки является, по сути, традиционным. Здесь, на первом этапе, на основе ВС образа сначала спектрально выделяются объекты поиска, а затем, на втором этапе, с использованием данных синхронной съемки с ОЭА более высокого разрешения, осуществляется конечная идентификация (до типа) зон, подозрительных на конкретные объекты наблюдения.

Выводы

Предложенная модель синтеза ГИС поиска техногенных загрязнений позволяет прогнозировать реализуемый показатель эффективности ее функционирования — вероятности решения задачи обнаружения фрагментов ОЧ РН в оперативном режиме. Она строится в зависимости от принятой структуры обработки, временных параметров поступления видеоданных и показателей качества работы оператора. Представленный анализ позволяет сделать вывод о том, что ГИС поиска на основе ВС аппаратуры воздушной съемки имеют подавляющее преимущество в эффективности (по показателю производительности работы оператора). То есть ее применение для оперативного обнаружения экологически токсичных обломков, по сравнению с вариантом на основе оптико-электронной аппаратуры (при приблизительно одинаковой или более высокой вероятности идентификации объектов поиска), существенно эффективней.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 19.04.2021
Принята к публикации 18.05.2021

Список литературы

1. *Бурлов В.Г., Попов Н.Н., Гарсия Эскалона Х.А.* Управление процессом применения космической геоинформационной системы в интересах обеспечения экологической безопасности региона // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 118—129.
2. *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В.* Применение авиационной видеоспектральной съемки для поиска на местности фрагментов отделяющихся частей ракет-носителей // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 45—54.
3. *Haase H.* Evaluating the Quality of Scientific Visualizations: The Q-VIS Reference Model // Proc. of SPIE. 1998. V. 3298. P. 123—131.
4. *Koligman M., Copeland A.* Real-Time Airborne Hyperspectral Detection Systems // Proc. of SPIE. 2000. V. 4049. P. 230—238.
5. *Kendall W.B.* Real-time geo-spatial registration of target images from the WAR HORSE sensor // Proc. of SPIE. 2002. V. 4741. P. 282—288.
6. *Бурлов В.Г.* Методологические основы моделирования социально-экономических и политических процессов (Модели. Технологии). СПб.: СПбГПУ, 2006. 287 с.
7. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
8. *Студитский А.С.* Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки. Дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук. М.: МНПО «Спектр», 2013. 112 с.
9. *Анохин П.К.* Системные механизмы высшей нервной деятельности. М.: Наука, 1979. 454 с.

10. *Губинский А.И.* Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л.: Наука, 1982. 270 с.
11. *Мирошин Р.Н.* О некоторых решениях интегрального уравнения Колмогорова—Чепмена // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Сер. 1: Математика, механика, астрономия. 2007. Вып. 4. С. 22—29.
12. *Рубахин В.Ф.* Психологические основы обработки первичной информации. Л: Наука, 1974. 296 с.

References

1. *Burlov V.G., Popov N.N., Garsiya Escalona H.A.* Managing the process of using the space geoinformation system in the interests of ensuring the environmental safety of the region. Saint-Peterburg: *Ucheniye Zapisky RGGMU.* Proceedings of the Russian State Hydrometeological University. 2018, 50: 118—129. [In Russian].
2. *Ostrikov V.N., Plakhotnikov O.V., Kirienko A.V.* Aerial Video-Spectral Survey in the Search for Fragments of Separated Parts of Launch vehicles on the Ground. *Yssedovaniye zemly iz kosmosa.* Research of the Earth from space. 2019, 2: 45—54. [In Russian].
3. *Haase H.* Evaluating the Quality of Scientific Visualizations: The Q-VIS Reference Model. Proc. of SPIE. 1998, 3298: 123—131.
4. *Koligman M., Copeland A.* Real-Time Airborne Hyperspectral Detection Systems. Proc. of SPIE. 2000, 4049: 230—238.
5. *Kendall W.B.* Real-time geo-spatial registration of target images from the WAR HORSE sensor. Proc. of SPIE. 2002, 4741: 282—288.
6. *Burlov V.G. Metodologicheskiye osnovy modelirovaniya sotsialno-economicheskih I politicheskih protsesov (Modely. Tehnologyy*). Methodological foundations of modeling socio-economic and political processes (Models. Technologies.). St. Petersburg: St. Petersburg State Politehnic University, 2006: 287 p. [In Russian].
7. *Malinin V.N. Statistidheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsiyi. (Uchebnic)*. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. Textbook. St. Peterburg: Russian State Hydrometeological University. 2008: 408 p. [In Russian].
8. *Studitsky A.S. Yssledovaniye i razrabotka mnogofunksionalnogo optico-electronnogo sredstva nabludeniya i razvedky*. Research and development of a multifunctional optoelectronic surveillance and reconnaissance tool. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Moscow: MNPO "Spectr", 2013: 112 p. [In Russian].
9. *Anohin P.K. Sistemnye mekhanizmy vysshei nervnoi deyatelnosty.* Systemic mechanisms of higher nervous activity. Moscow: *Nauka*, Science, 1979: 454 p. [In Russian].
10. *Gubinsky A.I. Nadeznost i kachestvo funksionirovaniya ergaticheskih sistem.* Reliability and quality of functioning of ergatic systems. Leningrad: *Nauka*, Science, 1980: 270 p. [In Russian].
11. *Miroshin R.N. O necotoryh resheniyah integralnogo uravneniya Kolmogorova—Chepmena*. On some solutions of the Kolmogorov—Chapman integral equation. Bulletin of the Saint Petersburg State University. Ser.1: Mathematics, Mechanics, astronomy. V. 4. St. Petersburg: St. Petersburg State University. 2007: 22—29. [In Russian].
12. *Rubahin V.F. Psyhologicheskiye osnovy obrabotky pervichnoy informatsiyi*. Psychological foundations of primary information processing. Leningrad: *Nauka*, Science, 1974: 296 p. [In Russian].

Сведения об авторах

Бурлов Вячеслав Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), burlovvg@mail.ru.

Кириенко Андрей Васильевич, начальник отдела Санкт-Петербургского филиала АО «КБ «Луч», kirienko13@mail.ru.

Остриков Вадим Николаевич, канд. техн. наук, доцент, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала АО «КБ «Луч», ostrvad@mail.ru.

Плахотников Олег Владимирович, канд. техн. наук, заместитель директора Санкт-Петербургского филиала АО «КБ «Луч», oleg-vl@yandex.ru.

Information about authors

Burlov Vyacheslav Georgievich, Grand PhD (Tech. Sci), Professor, Russian State Hydrometeological University.

Kirienko Andrey Vasilyevich, the department head of Saint-Petersburg branch of Joint-Stock Company «Lutch».

Ostrikov Vadim Nikolayevich, PhD (Tech. Sci), the main scientist of Saint-Petersburg branch of Joint-Stock Company «Lutch».

Plakhotnikov Oleg Vladimirovich, PhD (Tech. Sci), the associate director of Saint-Petersburg branch of Joint-Stock Company «Lutch».