

## Определение изменений траектории и ориентации беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам

*В. Г. Андронов<sup>1\*</sup>, А. А. Чув<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

\* e-mail: vladia58@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена методика определения нештатных изменений траектории и ориентации беспилотных летательных аппаратов в условиях потери сигналов от спутников в интересах повышения точности навигационного обеспечения их выхода в заданную точку маршрута горизонтального полета. Разработанная методика основана на функциональной связи разности параллаксов смежных пар снимков, получаемых бортовой фотокамерой беспилотных летательных аппаратов в процессе полета, с их отклонениями от горизонтальной траектории и изменениями ориентации. Полученные аналитические соотношения позволяют для каждой соответственной точки пары снимков сформировать и решить систему двух нелинейных уравнений с пятью неизвестными, в качестве которых используются отклонения беспилотных летательных аппаратов по высоте и направлению полета и их углы тангажа, крена и рыскания, приближенные значения которых определены инерциальной системой навигации. Представлены процедуры уточнения этих параметров, основанные на математической обработке результатов измерений плоских координат соответственных точек по методу наименьших квадратов. Предложенный подход позволяет в два раза уменьшить минимальное число обрабатываемых точек и обеспечивает точность определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от горизонтальной траектории и изменений его угловой ориентации, соизмеримую с точностью спутниковой навигации.

**Ключевые слова:** аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, навигация, параллакс изображений, девиации беспилотных летательных аппаратов

### *Введение*

Решение многих целевых задач дистанционного зондирования наземных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) предусматривает их предварительный выход в заданную точку маршрута по кратчайшей горизонтальной траектории полета [1–4]. При этом в процессе полета БЛА могут подвергаться внешним воздействиям [5–8] (прерывистый порыв ветра, воздушные ямы и т. п.). Будем здесь и далее

называть такого рода нештатные изменения положения и ориентации БЛА некоординированными отклонениями, или девиациями БЛА. Очевидно, что это может привести к отклонению маршрута полета БЛА от заданной траектории и, как следствие, к значительным погрешностям выхода БЛА в заданную точку. В настоящее время для обнаружения и определения в реальном масштабе времени таких девиаций БЛА с требуемой точностью широко и успешно используются интегрированные системы автоматического управления

БЛА, включающие в себя бортовые инерциальные датчики и приемники спутниковой информации GPS и / или ГЛОНАСС [9].

Однако на практике возможны ситуации, когда в результате нештатного функционирования или преднамеренного воздействия получаемая от навигационных спутников информация может перестать быть доступной [10–12]. Понятно, что это приводит к погрешностям выхода БЛА в заданную точку, поскольку инерциальные данные характеризуются быстрым накоплением ошибок их измерения. В этой связи актуальной является задача обработки в реальном масштабе времени наряду с инерциальными данными дополнительной автономной информации, которая в этих условиях может повысить точность инерциальных измерений. В данной работе в качестве такой дополнительной автономной информации рассматриваются перекрывающиеся изображения подстилающей поверхности, получаемые в процессе полета БЛА бортовой цифровой фотокамерой.

$$p\tau^* + \frac{y_1}{f}pv^* + \frac{x_2y_1}{f}\Delta\alpha + \left(f + \frac{x_1y_2}{f}\Delta\beta\right) + x_2\Delta\chi - q = 0,$$

где  $p$ ,  $q$  – продольный и поперечный параллаксы пары снимков;  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  – плоские координаты соответственных точек;  $\tau^*$  – угол между осью абсцисс левого снимка и следом его главной базисной плоскости;  $v^*$  – угол наклона базиса относительно левого снимка;  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\chi$  – углы взаимного продольного и поперечного наклона снимков и их разворота;  $f$  – фокусное расстояние камеры.

При этом для решения задачи на борту БЛА корреляционными методами выполняется автоматическое выделение не менее шести соответственных точек в зоне перекрытия снимков, расчет их плоских координат и параллаксов.

### Цель и задачи исследования

Целью и основной задачей исследования в настоящей работе является разработка методики определения отклонений траектории БЛА от заданного маршрута горизонтального полета и изменений его ориентации по

### Основная часть

Наиболее известны три группы методов обработки изображений в интересах решения различных навигационных задач. Методы первой группы основаны на обратной фотограмметрической засечке по опорным точкам местности [13–16], второй – на корреляционной обработке текущих изображений [17–20], третьей – на уравнениях взаимного ориентирования пары снимков [21–23]. Предметом исследования в настоящей работе являются методы последней группы. Возможность их использования для определения параметров некоординированных отклонений БЛА, как показано в работах [10–11], основана на следующем.

Пусть цифровой фотокамерой, расположенной на борту БЛА, выполнена регистрация пары плановых перекрывающихся снимков подстилающей поверхности. В этом случае, если известна связь элементов их взаимного ориентирования  $\tau^*$ ,  $v^*$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\chi$  и параметров девиаций БЛА, то рассматриваемая задача сводится к решению известного уравнения [13]

смежным парам снимков подстилающей поверхности. В качестве параметров ориентации БЛА будем использовать углы тангажа  $v$ , крена  $\omega$  и рыскания  $\tau$ , которые, как показано в работе [10], определяются следующим образом (рис. 1).

Угол тангажа  $v$  – угол между осью  $SX$  и плоскостью 1, угол крена  $\omega$  – угол между осью  $SU$  и плоскостью 1, угол рыскания  $\tau$  – угол между продольной осью БЛА, совпадающей с его нештатной траекторией полета  $r_2$  и ее проекцией 2 на плоскость 1. В качестве параметров отклонений траектории БЛА от штатного режима полета примем ее изменения по высоте и направлению полета  $\Delta H$ ,  $\Delta r_c$ . Здесь и далее под штатным режимом будем понимать горизонтальный полет БЛА с углами тангажа, крена и рыскания, равными нулю. Будем далее рассматривать пару перекрывающихся снимков  $P_1$ ,  $P_2$ , полученных цифровой фотокамерой, центр проекции которой расположен в центре тяжести БЛА, а главная оптическая ось перпендикулярна продольной оси БЛА (рис. 2).

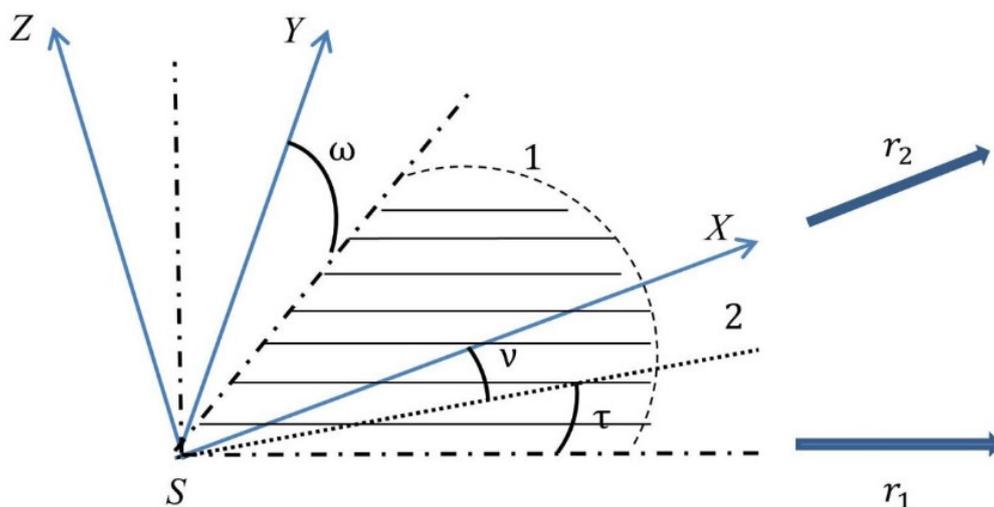


Рис. 1. Параметры ориентации БЛА:

$S$  – центр тяжести БЛА;  $SXYZ$  – система координат, связанная с осями инерции БЛА; 1 – плоскость, параллельная плоскости местного горизонта; 2 – проекция продольной оси БЛА, совпадающей с его нештатной траекторией  $r_2$ , на плоскость 1;  $r_1$  – штатная траектория горизонтального полета БЛА

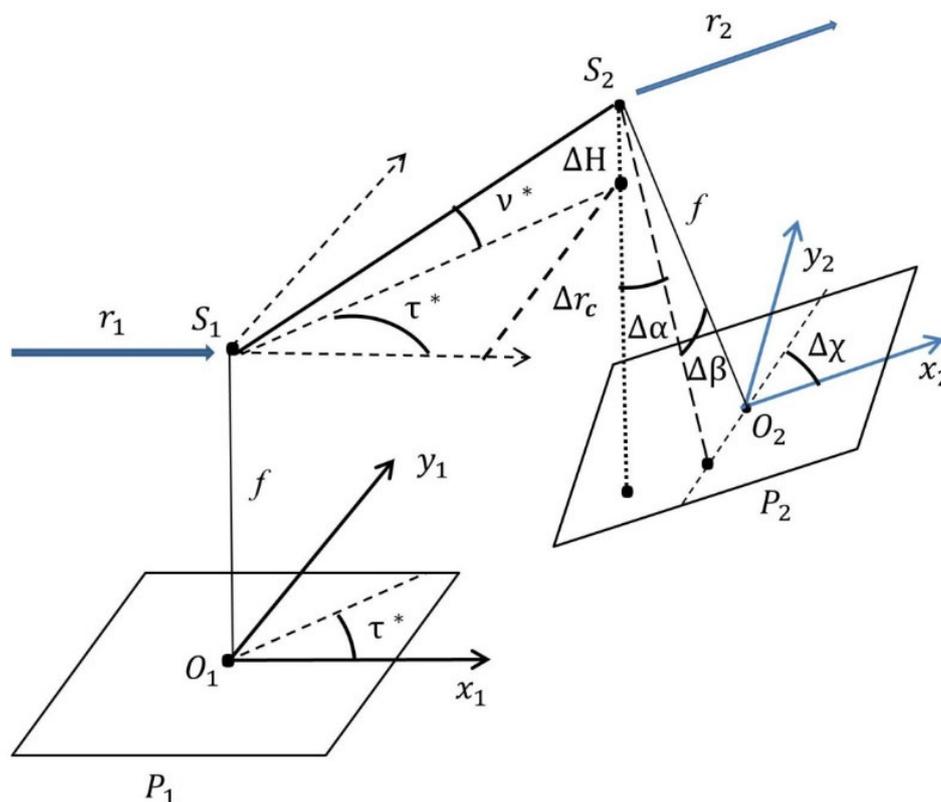


Рис. 2. Углы взаимной ориентации снимков  $P_1, P_2$

Поскольку в этом случае системы координат снимков будут параллельны системам координат, связанным с БЛА в моменты их получения, параметры угловых девиаций БЛА представляют собой углы  $\nu, \omega, \tau$ , которые совпадают с углами взаимной ориентации снимков  $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\chi$ . При этом параметры линейных девиаций  $\Delta H, \Delta r_c$  определяются углами ориентации  $\nu^*, \tau^*$  базиса этой пары снимков. С учетом этого постановка задачи заключается в следующем.

**Постановка задачи**

Пусть в процессе полета БЛА по штатной траектории  $r_1$  после потери спутниковой информации получены две пары снимков, а именно:  $P_1, P_2$  и  $P_1, P_2$  (рис. 3).

Будем считать, что снимки  $P_1, P_2$  и  $P_1$  являются горизонтальными, а снимок  $P_2$  – плановым, полученным в условиях девиаций БЛА, как по высоте и/или по направлению полета, так и по его угловой ориентации. Положим далее, что характер рельефа местности в полосах захвата этих снимков является однородным. Тогда можно считать, что горизонтальные снимки  $P_1, P_2$  и  $P_1$  получены с одной и той же высоты  $H$ , а плановый снимок  $P_2$  – с высоты  $H + \Delta H$ . Очевидно, что возможны варианты, когда правый снимок второй пары (снимок  $\bar{P}_2$ ) получен в условиях только линейных девиаций БЛА по высоте и/или по направлению полета. Снимок  $\bar{P}_2$  иллюстрирует случай, когда и линейные, и угловые девиации отсутствуют.

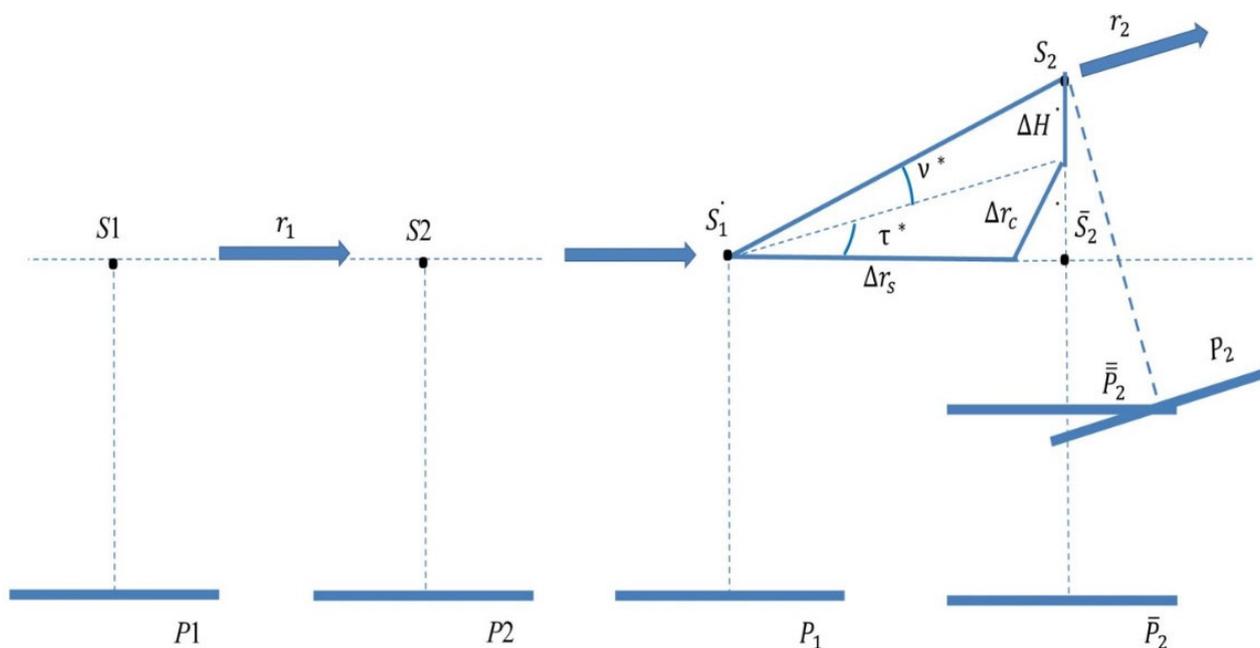


Рис. 3. К постановке задачи

Допустим, что определены плоские координаты соответственных точек  $(x_{1i}, y_{1i}, x_{2i}, y_{2i})$ ,  $(x_{1i}, y_{1i}, x_{2i}, y_{2i})$ , выделенных в зонах перекрытия этих пар снимков, и вычислены продольные и поперечные параллаксы  $p_{\text{ши}} = x_{1i} - x_{2i}$ ;  $q_{\text{ши}} = y_{1i} - y_{2i}$ ;  $p_i = x_{1i} - x_{2i}$ ;  $q_i = y_{1i} - y_{2i}$  и их разности  $\Delta p = p_i - p_{\text{ши}}$ ;  $\Delta q = q_i - q_{\text{ши}}$ , где  $i = \overline{1, I}$ . Известны также приближенные значения  $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}, \Delta \tilde{H}, \Delta \tilde{r}_c$  параметров девиаций БЛА, измеренные его средствами инерциальной навигации. Необходимо определить значения параметров девиации и получить оценки их точности.

Для решения задачи отметим следующее. Из теории фотограмметрии известно [13], что для параллаксов горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полета БЛА, можно записать, что  $p_{\text{ши}} = \text{const}$ ;  $q_{\text{ши}} = 0$ . Отсюда вытекает, что отличие от нуля разностей параллаксов смежных пар снимков является критерием возникновения некоординированных отклонений БЛА.

Поскольку по условиям задачи  $x_{1i} - x_{2i} = x_{1i} - \bar{x}_{2i}$ ;  $y_{1i} - y_{2i} = y_{1i} - y_{2i}$ , справедливы соотношения  $\Delta p = \bar{x}_{2i} - x_{2i}$ ;  $\Delta q = \bar{y}_{2i} - y_{2i}$ . Тогда, как показано в работе [11], разности параллаксов  $\Delta p, \Delta q$  снимков  $P_1, P_2$  и  $P_1, P_2$  будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta p = \left( f + \frac{x_2^2}{f} \right) v + \frac{x_2 y_2}{f} \omega - y_2 \tau + x_2 \left( 1 + \frac{x_2^2}{f} \right) v^2 + x_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{y_2^2}{f^2} \right) \omega^2 - \frac{1}{2} x_2 \tau^2 + 2 \frac{x_2^2}{f^2} v \omega - \\ - 2 \frac{x_2 y_2}{f} v \tau + \left( x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) \omega \tau + x_2 \frac{\Delta H}{H}; \\ \Delta q = \frac{x_2 y_2}{f} v + \left( f + \frac{y_2^2}{f} \right) \omega + x_2 \tau + y_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{x_2^2}{f^2} \right) v^2 + y_2 \left( 1 + \frac{y_2^2}{f^2} \right) \omega^2 - \frac{1}{2} y_2 \tau^2 + \\ + x_2 \left( 1 + 2 \frac{y_2^2}{f^2} \right) v \omega + \left( x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) v \tau + 2 \frac{x_2 y_2}{f} \omega \tau + y_2 \frac{\Delta H}{H} + p_{\text{ш}} \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}. \end{cases} \quad (1)$$

При этом углы ориентации  $v^*, \tau^*$  базиса съемки  $S_1, S_2$  и линейные параметры  $\Delta H, \Delta r_c$  девиаций БЛА связаны соотношениями  $v^* = \frac{\Delta H}{\Delta r_s} \tau^*$ ;  $\tau^* = \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}$ , где  $\Delta r_s$  – расстояние между центрами проекции  $S_1$  и  $S_2$ . Из (1) следует, что при  $v = \omega = \tau = \Delta H = \Delta r_c = 0$ , то есть при отсутствии девиаций БЛА, справедливы соотношения  $\Delta p = \Delta q = 0$ . Поэтому система уравнений (1) описывает функциональную связь разности параллаксов смежных пар снимков и параметров линейных и угловых девиаций БЛА.

### Методика определения параметров девиаций БЛА

Для каждой соответственной точки сформируем векторно-матричное уравнение поправок

$$\mathbf{M} \Delta \bar{\mathbf{U}}_i = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_i + \bar{\boldsymbol{\vartheta}}_i. \quad (2)$$

В уравнении (2) приняты следующие обозначения:

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} \frac{\partial(\Delta p)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p)}{\partial \tau} & \frac{\partial(\Delta p)}{\partial(\Delta H)} & \frac{\partial(\Delta p)}{\partial(\Delta r_c)} \\ \frac{\partial(\Delta q)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q)}{\partial \tau} & \frac{\partial(\Delta q)}{\partial(\Delta H)} & \frac{\partial(\Delta q)}{\partial(\Delta r_c)} \end{vmatrix} \text{ – матрица частных производных;}$$

$$\Delta \bar{\mathbf{U}} = \begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \\ \Delta \tau \\ \Delta H \\ \Delta r_c \end{pmatrix} \text{ – вектор поправок к приближенным значениям } \tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}, \tilde{\Delta H}, \tilde{\Delta r_c};$$

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \begin{pmatrix} \Delta p^0 - \Delta \tilde{p} \\ \Delta q^0 - \Delta \tilde{q} \end{pmatrix} \text{ – вектор свободных членов, где } \Delta p^0, \Delta q^0 \text{ – разности измеренных значений}$$

параллаксов;  $\Delta \tilde{p}, \Delta \tilde{q}$  – разности приближенных значений параллаксов;

$$\bar{\boldsymbol{\vartheta}}_i = \begin{pmatrix} \vartheta^p \\ \vartheta^q \end{pmatrix} \text{ – вектор поправок в значения } \Delta p^0, \Delta q^0.$$

Дифференцируя уравнения (1), найдем частные производные:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial v} &= 2x_2 \left( 1 + \frac{x_2^2}{f} \right) v + 2 \frac{x_2^2}{f^2} \omega - 2 \frac{x_2 y_2}{f} \tau + \left( f + \frac{x_2^2}{f} \right); \\
 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial \omega} &= 2 \frac{x_2^2}{f^2} v + 2x_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{y_2^2}{f^2} \right) \omega + \left( x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) \tau + \frac{x_2 y_2}{f}; \\
 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial \tau} &= -2 \frac{x_2 y_2}{f} v + \left( x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) \omega - x_2 \tau - y_2; \\
 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial(\Delta H)} &= -\frac{x_2}{H}; \\
 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial(\Delta r_c)} &= 0; \\
 \frac{\partial(\Delta q)}{\partial v} &= 2y_2 \left( \frac{1}{2} + \frac{x_2^2}{f^2} \right) v + x_2 \left( 1 + 2 \frac{y_2^2}{f^2} \right) \omega + \left( x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) \tau + \frac{x_2 y_2}{f}; \\
 \frac{\partial(\Delta q)}{\partial \omega} &= x_2 \left( 1 + 2 \frac{y_2^2}{f^2} \right) v + 2y_2 \left( 1 + \frac{y_2^2}{f^2} \right) \omega + 2 \frac{x_2 y_2}{f} \tau + \left( f + \frac{y_2^2}{f} \right); \\
 \frac{\partial(\Delta q)}{\partial \tau} &= \left( x_2^2 - \frac{y_2^2}{f} \right) v + 2 \frac{x_2 y_2}{f} \omega - y_2 \tau + x_2; \\
 \frac{\partial(\Delta q)}{\partial(\Delta H)} &= -\frac{y_2}{H}; \\
 \frac{\partial(\Delta q)}{\partial(\Delta r_c)} &= \frac{p_{ш}}{\Delta r_s}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В уравнениях (2), (3) элементы матрицы  $\mathbf{M}$  вычисляются при приближенных значениях  $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}, \Delta \tilde{H}, \Delta \tilde{r}_c$  параметров девиаций БЛА. При этом размерность уравнения поправок (2) определяется размерностью вектора свободных членов  $\bar{\mathbf{e}}$ , а именно в миллиметрах. Поэтому углы тангажа, крена и рыскания БЛА и поправки к ним должны быть выражены в радианах, параметры  $\Delta H, \Delta r_c$  – в метрах, а плоские координаты  $x_2, y_2$  точек и фокусное расстояние  $f$  цифровой камеры – в миллиметрах.

Для каждой точки  $i$ , находящейся в зоне перекрытия изображений  $P_1, P_2$ , составляется два уравнения поправок. Тогда структура общей системы уравнений поправок в векторно-матричной форме для всех включенных в обработку точек  $I$  будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{M}_{[2I,5]} \Delta \bar{\mathbf{U}}_{\langle 5,1 \rangle} = \bar{\mathbf{e}}_{\langle 2I,1 \rangle} + \bar{\mathbf{g}}_{\langle 2I,1 \rangle}. \tag{4}$$

В соответствии с методом наименьших квадратов для решения задачи с оценкой точности полученных результатов необходимо иметь переопределенную систему уравнений поправок (4), для чего в зоне перекрытия достаточно выделить три точки. Итерационный процесс нахождения поправок к приближенным значениям инерциальных измерений производится по известной формуле [13], которая с учетом принятых обозначений будет иметь следующий вид:

$$\Delta \bar{U}_{<5,1>(\xi)} = \left( \mathbf{M}_{[5,2I]}^T \cdot \mathbf{M}_{[2I,5I]} \right)_{(\xi)}^{-1} \cdot \mathbf{M}_{[5,2I]}^T \bar{\epsilon}_{<2I,1>(\xi)},$$

где  $\xi$  – порядковый номер итерации.

### Варианты реализации разработанной методики

Порядок использования разработанной методики может быть реализован следующим образом. После выхода БЛА на заданную траекторию горизонтального полета задача обнаружения и определения параметров отклонений маршрута полета решается штатными средствами инерциальной и спутниковой навигации. При потере сигналов от спутников включается бортовая цифровая фотокамера в режиме съемки перекрывающихся пар изображений с некоторым интервалом между ними. После регистрации каждой пары корреляционными методами в реальном масштабе времени производится их фотограмметрическая обработка в части поиска, идентификации и расчета плоских координат трех соответственных точек в их зонах перекрытия. Далее по найденным координатам вычисляются разности продольных и поперечных параллаксов смежных пар (первой и второй, третьей и четвертой и т. д.) и в соответствии с разработанной методикой выполняется определение и оценка уровня параметров девиации БЛА. Заслуживает также внимания, но требует дополнительных исследований вариант реализации технологии с использованием результатов, получаемых на этапе планирования программы полета БЛА. Имеется в виду, что, задавая значения  $\nu, \omega, \tau, H, r_c$  допустимых девиаций БЛА, можно в соответствии с выражениями (1) априорно рассчитать пороговые уровни разностей параллаксов, превышения которых будут свидетельствовать о возникновении критических отклонений БЛА от заданной траектории. Тогда получаемые в реальном масштабе времени разности параллаксов сравниваются с этими пороговыми значени-

ями, и определение параметров девиаций БЛА путем решения системы уравнений (1) производится только в случае их превышения.

### Экспериментальные исследования

Исследования работоспособности и точности разработанной методики проводились путем моделирования макетных данных в условиях отсутствия ошибок их измерений. Макетные данные были сформированы на основе характеристик камеры Nikon P700 [24] с фокусным расстоянием  $f = 2,4$  мм, размерами матрицы КМОП и светочувствительных элементов соответственно 8 на 6 мм и  $2,2 \cdot 10^{-3}$  мм и числом этих элементов  $3\,648 \times 2\,736$ . При этом процент перекрытия снимков  $P_1, P_2$  полагался равным 50 %, высота съемки  $H = 285$  м, расстояние между центрами проекций пары снимков  $\Delta r_s = 95$  м, параллаксы:  $p_{ш} = 4$  мм,  $q_{ш} = 0$ , формат снимка  $P_2$ :  $-4 \text{ мм} \leq x_2 \leq 4 \text{ мм}$ ;  $-3 \text{ мм} \leq y_2 \leq 3 \text{ мм}$ . Рассматривалось два варианта числа включенных в обработку точек (3 и 4) и три варианта (A, B, C) их взаимного расположения в зоне перекрытия. Характеристики макетных точек представлены в табл. 1, а варианты их конфигурации – на рис. 4, а, б.

Во всех вариантах в первом приближении задавались следующие значения параметров девиации БЛА:  $\tilde{\nu} = \tilde{\omega} = \tilde{\tau} = 2^\circ$ ,  $\Delta \tilde{H} = \Delta \tilde{r}_c = 1 \text{ м}$ . Оценка точности разработанной методики выполнялась путем определения абсолютных ошибок  $\Delta \nu, \Delta \omega, \Delta \tau, \Delta H, \Delta r_c$  как разностей между заданными контрольными значениями параметров девиации  $\nu = \omega = \tau = 5^\circ$ ,  $\Delta H = \Delta r_c = 5 \text{ м}$  и их уточненными в последней итерации значениями  $\nu^* \omega^* \tau^* \Delta H^* \Delta r_c^*$ .

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики макетных точек

Вариант расположения точек в зоне перекрытия	Номер точки	Число точек			
		3		4	
		Плоские координаты точек в системе координат снимка $P_2$			
		$x_2$ , мм	$y_2$ , мм	$x_2$ , мм	$y_2$ , мм
A	1	-2,0	1,5	-1,0	1,5
	2	-2,0	1,0	-2,0	1,5
	3	-2,0	0	-1,0	0,5
	4			-2,0	0,5
B	1	-2,0	-1,5	-1,0	-1,0
	2	-2,0	-1,0	-2,0	-1,0
	3	-2,0	0	-1,0	-1,5
	4			-2,0	-1,5
C	1	-2,0	1,5	-1,0	1,5
	2	-2,0	0	-2,0	1,5
	3	-2,0	-1,5	-1,0	-1,5
	4			-2,0	-1,5

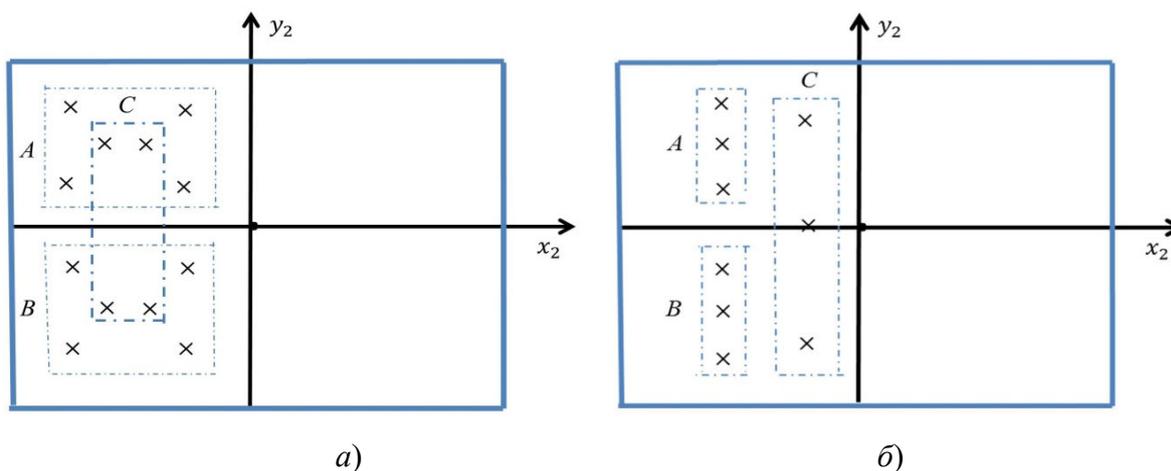


Рис. 4. Конфигурация включенных в обработку макетных точек:

а) четыре точки; б) три точки

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Вариант расположения точек / число точек	Параметры девиации БЛА					Абсолютные ошибки					
	$\nu^*$ , град	$\omega^*$ , град	$\tau^*$ , град	$\Delta H^*$ , м	$\Delta r_c^*$ , м	$\Delta \nu$ , град	$\Delta \omega$ , град	$\Delta \tau$ , град	$\Delta H$ , м	$\Delta r_c$ , м	
A	1-я итерация										
	3	4,98	4,77	5,12	4,7	5,4	0,02	0,23	0,05	0,3	0,4
	4	4,84	5,12	4,88	3,16	4,92	0,16	0,12	0,12	0,44	0,08
	2-я итерация										
	3	5,00	5,001	4,99	5,01	4,99	0	0,001	0,001	0,01	0,01
4	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Вариант расположения точек / число точек	Параметры девиации БЛА					Абсолютные ошибки					
	$v^*$ , град	$\omega^*$ , град	$\tau^*$ , град	$\Delta H^*$ , м	$\Delta r_c^*$ , м	$\Delta v$ , град	$\Delta \omega$ , град	$\Delta \tau$ , град	$\Delta H$ , м	$\Delta r_c$ , м	
В	1-я итерация										
	3	5,02	4,37	5,06	4,98	5,79	0,02	0,44	0,05	0,02	0,5
	4	5,1	4,49	4,74	4,92	5,37	0,1	0,51	0,26	0,08	0,37
	2-я итерация										
	3	5,01	4,993	5,01	5,05	5,01	0,01	0,007	0,01	0,05	0,01
	4	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
С	1-я итерация										
	3	5,01	4,58	5,1	5,48	5,6	0,01	0,42	0,05	0,5	0,4
	4	4,97	4,82	4,91	5,4	5,12	0,03	0,18	0,09	0,06	0,48
	2-я итерация										
	3	5,00	5,00	5,0	5,03	4,99	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01
	4	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Анализ полученных данных позволяет отметить следующее. В условиях отсутствия ошибок определения координат соответственных точек, несмотря на значительную начальную разницу между приближенными и истинными (контрольными) значениями, составляющую три градуса по угловым и четыре метра по линейным параметрам девиации БЛА, процесс решения задачи надежно сходится за две итерации. При этом уже после первой итерации абсолютные ошибки не превышают  $0,05^\circ$  по углам тангажа и рыскания,  $0,5^\circ$  – по углу крена и  $0,5$  м – по траектории. Увеличение числа включенных в обработку точек и их конфигурация не оказывают заметного влияния на точность получаемых результатов. Предметом дальнейших исследований является оценка влияния ошибок измерений исходных данных на точность получаемых результатов.

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

1. При решении задачи навигационного обеспечения выхода БЛА в заданную точку маршрута по кратчайшей горизонтальной тра-

ектории полета в условиях потери сигналов от спутников актуальной является задача обработки в реальном масштабе времени наряду с инерциальными данными дополнительной автономной информации, которая обеспечивает повышение точности инерциальных измерений. В качестве такой информации могут быть использованы изображения подстилающей поверхности, получаемые в процессе полета БЛА бортовой цифровой фотокамерой.

2. Разработанная методика основана на функциональной связи разности параллакс смежных пар снимков, получаемых с заданным интервалом бортовой фотокамерой в процессе полета, с отклонениями беспилотных летательных аппаратов от горизонтальной траектории. При этом в отличие от известных подходов предлагаемая методика позволяет в два раза уменьшить минимальное число обрабатываемых соответственных точек на перекрывающихся изображениях.

3. Методика инвариантна к конфигурации расположения соответственных точек в зоне перекрытия пары снимков и обеспечивает точность определения отклонений БЛА от горизонтальной траектории и изменений его угловой ориентации, соизмеримую с точностью спутниковой навигации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельничук Ю. Ю. Аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов // Землеустройство и кадастры: актуальные проблемы и пути их решения: сб. науч. тр. молодых исследователей. – Волгоград : Волгогр. гос. аграр. ун-т, 2019. Вып. 1. – С. 62–65.
2. Gairabekov G., Hamzatov A. I., Mishieva A. T., Ibragimova E. I., Gayrabekova A. I. Development of a digital surface model and a digital terrain model based on ERS data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 905: 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2020). – 2020. – P. 12025. – DOI 10.1088/1757-899x/905/1/012025.
3. Stødle D. et al. High-performance visualisation of UAV sensor and image data with raster maps and topography in 3D // International Journal of Image and Data Fusion. – 2014. – Vol. 5, No. 3. – P. 244–262.
4. Koeva M. et al. Using UAVs for map creation and updating. A case study in Rwanda // Survey Review. – 2018. – Vol. 50, № 361. – P. 312–325.
5. Elkaim G. H., Lie F. A. P., Gebre-Egziabher D. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs // Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. – Springer, 2015. – P. 347–380.
6. Rehak M., Mabillard R., Skaloud J. A micro-UAV with the capability of 137 direct georeferencing // ISPRS Archives, 2013.
7. Canis B. Unmanned aircraft systems (UAS): Commercial outlook for a new industry. – Congressional Research Service Washington, DC, 2015.
8. Chudley T. R. et al. High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control // Cryosph. Copernicus GmbH, 2019. Vol. 13, № 3. – P. 955–968.
9. Веремеенко К. К., Кошелев Б. В., Соловьев Ю. А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации, 2010. – № 4. – С. 32–41.
10. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности // Изв. Юго-Западного государственного ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2022. – № 1 (12). – С. 129–144.
11. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полета беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Изв. Юго-Западного государственного ун-та. – 2021. – № 25 (4). – С. 145–161. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.
12. Салычев О. С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой – основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.teknol.ru/trash/uav\\_autopilot\\_salychev\\_2602182965.pdf](http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf).
13. Лобанов А. Н. Фотограмметрия. – М. : Недра, 1984. – 552 с.
14. Коршунов Р. А., Носков В. В., Погорелов В. В. Нецентральная обратная фотограмметрическая засечка // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 67–71.
15. Ессин А. С., Ессин С. С. Разработка методики пространственной фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки, полученной с беспилотного летательного аппарата // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 3. – С. 48–52.
16. Захлебин А. С. Метод обработки материалов аэрофотосъемки для построения геопривязанного ортофотоплана местности с телевизионной камеры беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO // Доклады АН ВШ РФ. – 2021. – № 4 (53). – С. 26–35.
17. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. – М. : Физматкнига, 2010. – 672 с.
18. Мустаев А. Ф. Использование технологии «машинного зрения» для управления БПЛА // Междунар. науч. журнал «Вестник науки». – 2019. – Т. 5, № 12 (21). – С. 195–198.
19. Зоев И. В., Марков Н. Г., Рыжова С. Е. Интеллектуальная система компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга технологических объектов предприятий нефтегазовой отрасли // Изв. Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 11. – С. 34–49.
20. Степанов Д. Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. – 2014. – № 1. – С. 150–157.

21. Добрынин Н. Ф., Пимшина Т. М. Взаимное ориентирование аэроснимков с новым сочетанием угловых элементов в стереопаре // Инженерный вестник Дона. – 2014. – 2(29). – С. 43.
22. Овчинникова Н. Г., Медведков Д. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 98–108.
23. Баклыков М. А. Применение модифицированных дронов при проведении топографо-геодезических работ // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 2. – С. 19–21.
24. Раков Д. Н., Никитин В. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 27–36.

### Об авторах

Владимир Германович Андронов – доктор технических наук, старший научный сотрудник, зав. кафедрой космического приборостроения и систем связи.

Андрей Алексеевич Чуев – старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи.

Получено 18.01.2023

© В. Г. Андронов, А. А. Чуев, 2023

## Determination of changes in the trajectory and orientation of unmanned aerial vehicles from overlapping images

V. G. Andronov<sup>1</sup>\*, A. A. Chuev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University, Kursk, Russian Federation

\* e-mail: [vladia58@mail.ru](mailto:vladia58@mail.ru)

**Abstract.** The article considers a method for determining abnormal changes in the trajectory and orientation of unmanned aerial vehicles in the conditions of loss of signals from satellites in the interests of improving the accuracy of navigation support for their exit to a given point of the horizontal flight route. The developed technique is based on the functional relationship of the difference in parallaxes of adjacent pairs of images obtained by the onboard camera of unmanned aerial vehicles during flight, with their deviations from the horizontal trajectory and changes in orientation. The obtained analytical relations allow for each corresponding point of a pair of images to form and solve a system of two nonlinear equations with five unknowns, which use deviations of unmanned aerial vehicles in altitude and direction of flight and their pitch, roll and yaw angles, approximate values of which are determined by the inertial navigation system. The procedures for the refinement of these parameters based on the mathematical processing of the measurement results of the plane coordinates of the corresponding points by the method of least squares are presented. The proposed approach makes it possible to halve the minimum number of processed points and ensures the accuracy of determining the deviations of unmanned aerial vehicles from the horizontal trajectory and changes in its angular orientation, commensurate with the accuracy of satellite navigation.

**Keywords:** aerial photography, unmanned aerial vehicle, navigation, parallax images, deviation of unmanned aerial vehicles

### REFERENCES

1. Melnichuk, Y. Y. (2019). Aerial photography from unmanned aerial vehicles. In *Sbornik nauchnykh trudov molodykh issledovateley: Vyp. 1. Zemleustroystvo i kadastry: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya [Collection of Scientific Works of Young Researchers: Issue 1. Land Management and Cadastres: Actual Problems and Ways to Solve them]* (pp. 62–65). Volgograd: Volgograd State Agrarian University Publ. [in Russian].
2. Gairabekov, G., Hamzatov, A. I., Mishieva, A. T., Ibragimova, E. I., & Gayrabekova, A. I. (2020). Development of a digital surface model and a digital terrain model based on ERS data. *IOP Conference Series:*

*Materials Science and Engineering: Vol. 905: 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2020)* (P. 12025). doi: 10.1088/1757-899x/905/1/012025.

3. Stødle, D., & et al. (2014). High-performance visualisation of UAV sensor and image data with raster maps and topography in 3D. *International Journal of Image and Data Fusion*, 5(3), 244–262.

4. Koeva, M., & et al. (2018). Using UAVs for map creation and updating. A case study in Rwanda. *Survey Review*, 50(361), 312–325.

5. Elkaim, G. H., Lie, F. A. P., & Gebre-Egziabher, D. (2015). Principles of guidance, navigation, and control of UAVs. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicle* (pp. 347–380). Springer.

6. Rehak, M., Mabillard, R., & Skaloud, J. (2013). A micro-UAV with the capability of 137 direct georeferencing. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 317–323. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-317-2013.

7. Canis, B. (2015). *Unmanned aircraft systems (UAS): Commercial outlook for a new industry*. Congressional Research Service Washington, DC.

8. Chudley, T. R., & et al. (2019). High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control. *Cryosph. Copernicus GmbH*, 13(3), 955–968.

9. Veremeenko, K. K., Koshelev, B. V., & Soloviev, Yu. A. (2010). Analysis of the state of development of integrated inertial-satellite navigation systems. *Novosti navigatsii [Navigation News]*, 4, 32–41 [in Russian].

10. Andronov V. G., Chuev A. A., & Knyazev A. A. (2022). Determination and assessment of the level of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory from images of the underlying surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie [Proceedings of the Southwestern State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer science. Medical Instrumentation]*, 1(12), 129–144 [in Russian].

11. Andronov, V. G., Chuev, A. A., & Knyazev, A. A. (2021). Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the Southwest State University]*, 25(4), 145–161. Retrieved from <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161> [in Russian].

12. Salychev, O. S. (n. d.). Autopilot of a UAV with an inertial integrated system – the basis for safe operation of unmanned complexes. Retrieved from [http://www.teknol.ru/trash/uav\\_autopilot\\_salychev\\_2602182965.pdf](http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf) [in Russian].

13. Lobanov, A. N. (1984). *Fotogrammetriya [Photogrammetry]*. Moscow: Nedra Publ, 552 p. [in Russian].

14. Korshunov, R. A., Noskov, V. V., & Pogorelov, V. V. (2013). Non-central reverse photogrammetric serif. *Izvestia vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 5, 67–71 [in Russian].

15. Essin, A. S., & Essin, S. S. (2007). Development of a technique for spatial photogrammetric processing of digital aerial photography materials obtained from an unmanned aerial vehicle. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2007: T. 3 [Proceedings of GEO-Siberia-2007: Vol. 3]* (pp. 48–52). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

16. Zakhlebin, A. S. (2021). A Method of processing aerial photography materials for building a georeferenced orthomosaic of the terrain from a television camera of the unmanned aerial vehicle DJI Phantom 4 PRO. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii [Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences]*, 4(53), 26–35 [in Russian].

17. Vizilter, Y. V., Zheltov, S. Y., Bondarenko, A. V., Ososkov, M. V., & Morgin, A. V. (2010) *Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya [Image processing and analysis in machine vision tasks]*. Moscow: Fizmatkniga Publ., 672 p. [in Russian].

18. Mustaev, A. F. (2019). Using "machine vision" technology to control UAVs. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal "Vestnik nauki" [International scientific journal "Bulletin of Science"]*, Vol. 5, No. 12(21), 195–198 [in Russian].

19. Zoev, I. V., Markov, N. G., & Ryzhova, S. E. (2019). Intelligent computer vision system of unmanned aerial vehicles for monitoring technological facilities of oil and gas industry enterprises. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering]*, 330(11), 34–49 [in Russian].

20. Stepanov, D. N. (2014). Methods and algorithms for determining the position and orientation of an unmanned aerial vehicle using onboard video cameras. *Programmnye produkty i sistemy [Software products and systems]*, 1, 150–157 [in Russian].

21. Dobrynin, N. F., & Pimshina, T. M. (2014). Relative orientation of the aerial views with the new combination of the corner piece within the stereo mate. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2(29), P. 43 [in Russian].
22. Ovchinnikova, N. G., & Medvedkov, D. A. (2019). The use of unmanned aerial vehicles for land management, cadastre and urban planning. *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy [Economy and Ecology of Territorial Entities]*, 3(1), 98–108 [in Russian].
23. Baklykov, M. A. (2020). The use of modified drones during topographic and geodetic works. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in industry]*, 2, 19–21 [in Russian].
24. Rakov, D. N., & Nikitin, V. N. (2012). The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: sbornik molodykh uchenykh SSGA [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Collection of Young Scientists]* (pp. 27–36). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

#### Author details

*Vladimir G. Andronov* – D. Sc., Senior Researcher, Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems.

*Andrey A. Chuev* – Senior Lecturer, Department of Space Instrumentation and Communication Systems.

Received 18.01.2023

© V. G. Andronov, A. A. Chuev, 2023