УДК 528.8

Модели уточнения координат подвижных элементов системы дистанционного зондирования Земли

Models for clarifying the coordinates of mobile elements of the Earth remote sensing system

Чернов / Chernov I.
Иван Владимирович
(4ern86@bk.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
доцент кафедры картографии.
г. Санкт-Петербург

Осипов / Osipov G.
Георгий Константинович
(vka@mil.ru)
доктор географических наук, профессор.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
профессор кафедры картографии.
г. Санкт-Петербург

Краузе / Krauze D.
Дмитрий Сергеевич
(vka@mil.ru)
начальник топографической службы
(Южный военный округ).
г. Санкт-Петербург

Корнеев / Korneev B.
Борис Николаевич
(vka@mil.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
адъюнкт кафедры картографии.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: летательный аппарат-марка – aircraft-sighting mark; система дистанционного зондирования Земли – Earth remote sensing system; модель уточнения – refinement model; элементы внешнего ориентирования – elements of external orientation; недоступная местность – inaccessible terrain.

Статья открывает цикл работ, посвящённых системе дистанционного зондирования Земли, в нём предпринята попытка решения проблемы получения координат объектов местности без использования наземной планово-высотной основы.
В статье описана процедура уточнения координат мобильного объекта с оцениванием их ожидаемой точности, являющаяся составной частью алгоритма определения параметров системы дистанционного зондирования Земли, обеспечивающей определение с заданной точностью координат объектов местности. При этом принцип получения элементов внешнего ориентирования кадровых снимков и остальные процедуры реализации алгоритма в данной публикации описаны в общих чертах. Полному их описанию и численному эксперименту по проверке их работоспособности будут посвящены следующие публикации.

The article opens a series of works devoted to the Earth remote sensing system, it attempts to solve the problem of obtaining the coordinates of terrain objects without using a ground-based planning and altitude basis.
The article describes the procedure for clarifying the coordinates of a mobile object with an assessment of its expected accuracy, which is an integral part of the algorithm for determining the parameters of the Earth remote sensing system, which ensures the determination of the coordinates of terrain objects with a given accuracy. At the same time, the principle of obtaining elements of external orientation of frame images and other procedures for implementing the algorithm are described in general terms in this publication. The following publications will be devoted to their full description and numerical experiment to check their operability.

Введение

До сих пор в практике топогеодезических работ актуальной остаётся проблема определения координат объектов на недоступной по каким-либо причинам местности (например, непроходимой). В этих условиях, как правило, применяется дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) [5], в том числе аэрокосмическая фотосъёмка (АКФС) (далее речь идёт о кадровой съёмке). Для определения координат по материалам АКФС используются элементы внешнего ориентирования (ЭВО) снимков [5]. Когда определить ЭВО

3 2023.indd 97 02.10.2023 12:32:21

снимка с применением планово-высотной подготовки невозможно, могут быть использованы два подхода.

Первый подход состоит в определении ЭВО на основе данных бортовых систем навигации и ориентации [5, 7], часто на основе приёмников сигналов радионавигационных систем (РНС), интегрированных с инерциальными бортовыми навигационными системами и/или системами ориентации по звёздам [5].

Второй подход ориентирован на определение ЭВО с применением различных методических приёмов. Например, с применением каркасных маршрутов [5] или определение координат точек местности на недоступной территории [9] с применением одновременного фотографирования доступной и недоступной территории.

Также одним из способов второго направления является способ определения ЭВО снимка местности по изображениям летательных аппаратов-марок (ЛАМ) на фоне исследуемой местности [8]. Работоспособность этого способа подтверждена согласованностью данных макетных снимков с результатами моделирования функционирования системы, реализующей способ, которые готовятся к публикации.

Предложенный способ [8] предназначен для его последовательной реализации с прямой фотограмметрической засечкой. Это позволяет получать координаты объектов недоступной местности. Очевидно, что точность определения координат будет зависеть от параметров организации системы ДЗЗ, реализующей разработанный способ [8].

После доказательства работоспособности способа [8] необходимо будет создать алгоритм, позволяющий оценивать ожидаемую точность определения координат объектов недоступной местности и корректировать параметры системы ДЗЗ для обеспечения определения координат объектов недоступной местности с заданной точностью.

Алгоритм определения параметров системы дистанционного зондирования Земли, обеспечивающей определение координат объектов недоступной местности с заданной точностью

Исходными данными для реализации алгоритма (рис. 1) являются прежде всего директивная среднеквадратическая погрешность (СКП) m^{∂}_{M} определения координат объектов недоступной местности (шаг 2), получаемая в результате анализа задания (шаг 1) на проведение геоинформационного обеспечения (ГИО).

На основе директивной СКП m^{∂}_{M} определения координат объектов недоступной местности: формулируется критерий (шаг 10) пригодности ожидаемых результатов определения координат; вычисляется (шаг 3) директивная СКП $m^{\partial}_{\text{ЭВО}}$ определения ЭВО, которая используется для формулирования критерия пригодности ожидаемых результатов определения ЭВО, реализуемого в рамках шага 8.

Также исходными данными (шаг 4) описываемого алгоритма являются приближённые параметры системы ДЗЗ, характеризующие элементы, строение, связи, функции и обеспечивающие её направленное функционирование [1, 12]. Параметры организации системы ДЗЗ разделены на две группы [12]: параметры структуры (более устойчивые параметры) и динамические параметры.

К параметрам структуры системы ДЗЗ отнесены: СКП m_{R} определения координат подвижных объектов (ЛАМ и ЛА ДЗЗ) в моменты получения навигационных решений; точность фиксации или синхронизации моментов получения навигационных решений и моментов фотографирования; разрешение, фокусное расстояние съёмочного оборудования.

К динамическим параметрам системы ДЗЗ отнесены: удалённость точки фотографирования от объекта местности; скорость ЛАМ и ЛА ДЗЗ в момент фотографирования; дальности между летательными аппаратами-марками и летательным аппаратом ДЗЗ.

Критерии пригодности $G_{\text{ЭВО}}$ и G_{M} ожидаемых результатов определения ЭВО снимка и координат объектов местности (которые реализуются в рамках шага 7 и шага 10) имеют вид [6]

$$\boldsymbol{G}_{\text{ЭВО}} : \left(\boldsymbol{m}_{\text{ЭВО}} \in \left\{\boldsymbol{m}^{\partial}_{\text{ЭВО}}\right\}\right) \cong \boldsymbol{U} \quad \text{и} \quad \boldsymbol{G}_{M} : \left(\boldsymbol{m}_{M} \in \left\{\boldsymbol{m}^{\partial}_{M}\right\}\right) \cong \boldsymbol{U}, \tag{1}$$

где – U достоверное событие.

Детальному раскрытию остальных шагов алгоритма будут посвящены отдельные публикации, а в этой статье будет рассмотрен шаг 5.

Модель уточнения координат мобильного объекта способом интерполяции

Пусть получены навигационные параметры ЛАМ в моменты времени t_{i-1} и t_{i+1}, а кадровый снимок, на котором был отображён ЛАМ, был получен в момент времени t_i, причём $t_{i+1} \le t_i \le t_{i-1}$. Необходимо найти вектор $R(t_i)=\{x(t_i), y(t_i), z(t_i)\}$ положения ЛАМ в момент времени t_i.

Рассмотрим нахождение составляющих вектора $R(t_i)$ на примере абсциссы. Приняв, что в интервале $[t_{i-1}; t_{i+1}]$, а значит, и в момент t_i фотографирования движение ЛАМ было прямолинейным и равномерным, для вычисления абсциссы ЛАМ (в момент t_i) допустимо использовать линейную интерполяцию

$$x(t_i) = x(t_{i-1}) + \Delta x(t_{i+1}, t_{i-1}) \left(\frac{\tau(t_i, t_{i-1})}{\tau(t_{i+1}, t_{i-1})} \right), \tag{2}$$

где $x(t_i)$ – абсцисса положения ЛАМ в момент t_i фотографирования; $\Delta x(t_{i+1}, t_{i-1}) = x(t_{i+1}) - x(t_{i-1})$ – приращение абсциссы за промежуток времени $\tau(t_{i+1}, t_{i-1})$ между моментами t_{i+1} и t_{i-1}; $\tau(t_i, t_{i-1})$ – промежуток времени между моментами t_i и $t_{i-}1$.

3 2023.indd 98 02.10.2023 12:32:22

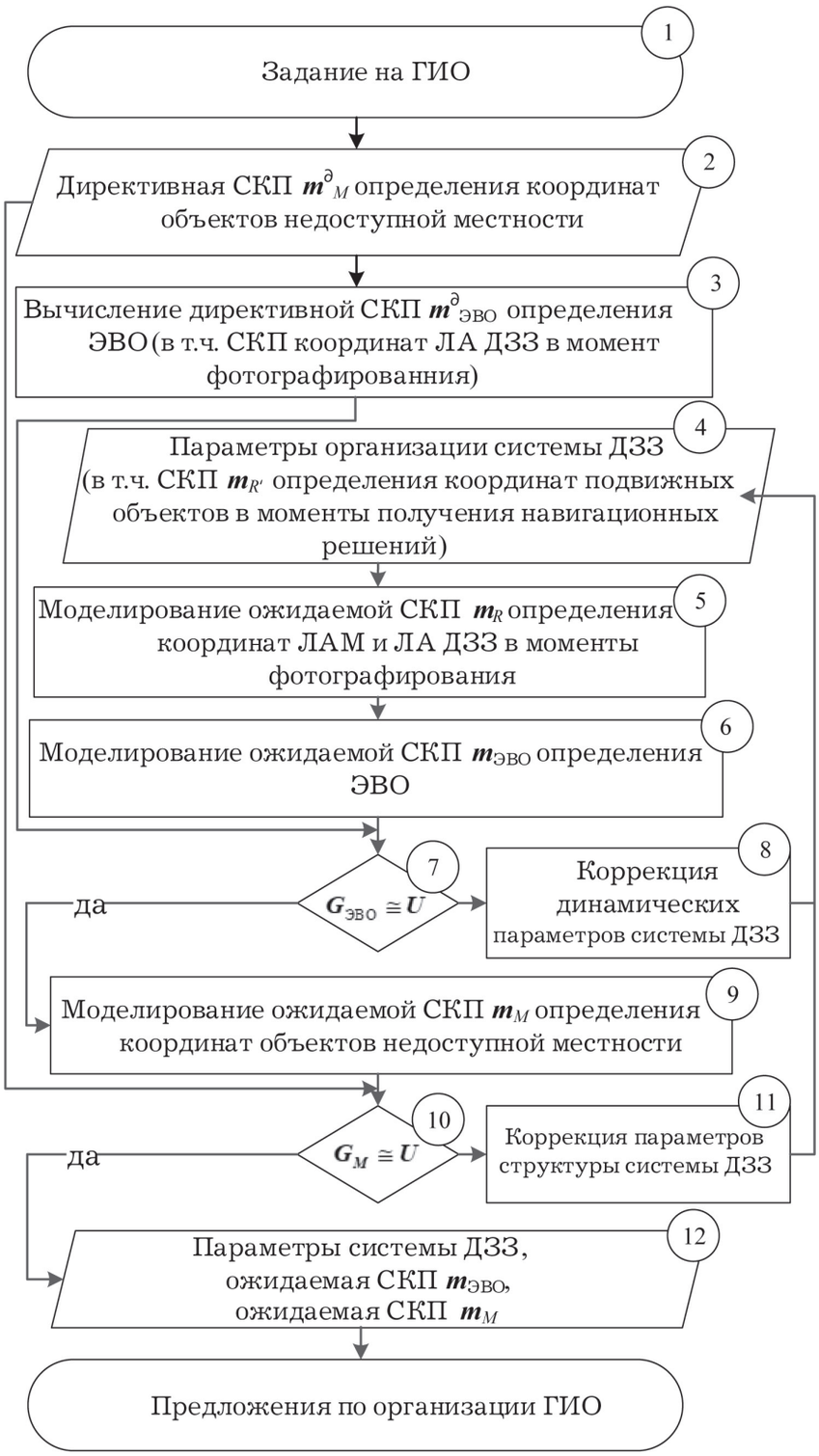

Рис. 1. Алгоритм определения параметров системы дистанционного зондирования Земли

3 2023.indd 99 02.10.2023 12:32:22

Для упрощения дальнейших рассуждений выражение (2) следует преобразовать

$$x(t_i)=\left(1-\frac{\tau(t_i\,,\,t_{i-1})}{\tau(t_{i+1}\,,\,t_{i-1})}\right)x(t_{i-1})+\frac{\tau(t_i\,,\,t_{i-1})}{\tau(t_{i+1}\,,\,t_{i-1})}x(t_{i+1}),\qquad(3)$$

$$x(t_i)=(1-k(t_i))x(t_{i-1})+k(t_i)x(t_{i+1}),\qquad(4)$$

где $k(t_i)$ – коэффициент пропорциональности между промежутками времени $\tau(t_i, t_{i-1})$ и $\tau(t_{i+1}, t_{i-1})$.

Пусть промежуток времени $\tau(t_{i+1}, t_{i-1})$ достаточно мал, чтобы среднеквадратические погрешности (СКП) m_x получения абсциссы в моменты t_{i+1}, t_{i-1} можно было принять равными. Так же пусть аргументы выражения (4) независимы, тогда, используя СКП функции независимых аргументов [4], получим выражение для СКП абсциссы в момент времени t_i

$$m_{x_i}=\sqrt{(1-k(t_i))^2m_x^2+(k(t_i))^2m_x^2+\Delta x^2m_k^2}\,,$$

$$m_{x_i}=\sqrt{\left[(1-k(t_i))^2+(k(t_i))^2\right]m_x^2+\Delta x^2m_k^2}\,,\qquad(5)$$

где m_k – СКП определения коэффициента пропорциональности $k(t_i)$; Δx – приращение абсциссы за промежуток времени $\tau(t_{i+1}, t_{i-1})$.

Выражения для нахождения ординаты $y(t_i)$ и аппликаты $z(t_i)$ вектора $R(t_i)$ положения мобильного объекта, полученного методом интерполяции, а также СКП получения координат будут аналогичны зависимостям (4) и (5).

Анализ выражения (5) позволяет сделать вывод, что увеличение приращения Δx, Δy или Δz приводит к увеличению влияния СКП m_k, отражающей влияние точности фиксации моментов времени t_{i-1}, t_i и t_{i+1} на результирующую СКП определения координаты в заданный момент времени t_i. Кроме того, влияние погрешностей определения координат в моменты времени t_{i+1} и t_{i-1} можно ослабить, если момент t_i будет находиться в центре интервала $[t_{i-1}; t_{i+1}]$.

Для методического уменьшения составляющей $(\Delta x\cdot m_k)^2$ на результирующую точность определения координаты ЛАМ (ЛАДЗЗ) в заданный момент времени t_i координаты $x(t_i)$, $y(t_i)$ и $z(t_i)$ следует рассчитывать от ближайшей из $x(t_{i-1})$ и $x(t_{i+1})$, из $y(t_{i-1})$ и $y(t_{i+1})$, из $z(t_{i-1})$ и $z(t_{i+1})$.

Для нахождения СКП m_k определения коэффициента пропорциональности $k(t_i)$ необходимо продифференцировать выражение (6) по всем аргументам

$$k(t_i)=\frac{\tau(t_i\,,\,t_{i-1})}{\tau(t_{i+1}\,,\,t_{i-1})}=\frac{t_i-t_{i-1}}{t_{i+1}-t_{i-1}}\,.\qquad(6)$$

Частные производные зависимости (6) будут иметь вид

$$\frac{\partial k(t_i)}{\partial t_{i-1}}=\frac{t_i-t_{i-1}}{(t_{i+1}-t_{i-1})^2}\,,\quad\frac{\partial k(t_i)}{\partial t_i}=\frac{1}{t_{i+1}-t_{i-1}}\,,\quad\frac{\partial k(t_i)}{\partial t_{i+1}}=\frac{t_{i-1}-t_i}{(t_{i+1}-t_{i-1})^2}\,.$$

В этом случае СКП m_k определения коэффициента $k(t_i)$ пропорциональности между промежутками времени $\tau(t_i, t_{i-1})$ и $\tau(t_{i+1}, t_{i-1})$ будет иметь вид

$$m_k=\sqrt{\frac{1}{(t_{i+1}-t_{i-1})^2}m_{t_i}^2+\frac{(t_i-t_{i-1})^2}{(t_{i+1}-t_{i-1})^4}m_{t_{i-1}}^2+\frac{(t_{i-1}-t_i)^2}{(t_{i+1}-t_{i-1})^4}m_{t_{i+1}}^2}\,,\qquad(7)$$

где m_t – СКП определения моментов t_{i-1}, t_i, t_{i+1}.

Поскольку определение моментов t_{i+1}, t_{i-1} происходит одним и тем же устройством, через малый промежуток времени $\tau(t_{i+1}, t_{i-1})$, СКП определения моментов t_{i+1}, t_{i-1} можно принять равными m_t

$$m_k=\sqrt{\frac{1}{(t_{i+1}-t_{i-1})^2}m_{t_i}^2+2\frac{(t_i-t_{i-1})^2}{(t_{i+1}-t_{i-1})^4}m_t^2}\,.\qquad(8)$$

Если определение моментов t_{i+1}, t_{i-1} и t_i происходит одним и тем же устройством, также через малые промежутки в практически равных условиях, то СКП их определения допустимо приравнять m_t

$$m_k=\sqrt{3\frac{(t_{i+1}-t_{i-1})^2(t_i-t_{i-1})^2}{(t_{i+1}-t_{i-1})^4}m_t^2}=\sqrt{3}\frac{(t_i-t_{i-1})}{(t_{i+1}-t_{i-1})}m_t=\sqrt{3}k(t_i)m_t\,.\qquad(9)$$

Выражения (5) и (9) позволяют моделировать ожидаемую СКП определения составляющих вектора $R(t_i)=\{x(t_i), y(t_i), z(t_i)\}$ положения ЛАМ или ЛА ДЗЗ, полученного методом интерполяции в момент t_i фотографирования.

Модель уточнения координат мобильного объекта способом синхронизации

При идеальной синхронизации момента фотографирования t_i с моментом t'_i получения навигационного решения координаты ЛАМ и ЛА ДЗЗ в момент фотографирования $x(t_i)$ будут совпадать с координатами $x(t'_i)$, полученными из навигационного решения.

В реальности достичь идеальной синхронизации невозможно. Между моментом фотографирования t_i и моментом t'_i получения навигационного решения будет присутствовать сдвиг на интервал $\tau(t_i, t'_i)= t_i - t'_i$. Если сдвиг $\tau(t_i , t'_i)$ достаточно мал чтобы в его рамках принять движение ЛАМ и ЛА ДЗЗ прямолинейным и равномерным, то для вычисления абсциссы $x(t_i)$ ЛАМ и ЛА ДЗЗ (в момент t_i) будет применяться выражение

$$x(t_i)=x(t'_i)+\Delta x(t_i\,,\,t'_i)=x(t'_i)+v_x(t'_i)\tau(t_i\,,\,t'_i),\qquad(10)$$

3 2023.indd 100 02.10.2023 12:32:26

где t_i – момент фотографирования; t'_i – момент получения навигационного решения; $x(t_i)$ – абсцисса положения ЛАМ в момент t_i фотографирования; $x(t'_i)$ – абсцисса положения ЛАМ в момент t'_i получения навигационного решения; $\Delta x(t_i, t'_i) = x(t_i) - x(t'_i)$ – приращение абсциссы за интервал сдвига $\tau(t_i, t'_i)$ между моментами t_i и t'_i; v_x – скорость изменения абсциссы в момент t'_i получения навигационного решения.

Если принять допущение, что аргументы выражения (10) независимы, тогда, используя СКП функции независимых аргументов [4], получим выражение для СКП абсциссы в момент времени t_i

$$m_{x_i} = \sqrt{m_{x'}^2 + m_{\Delta x}^2} = \sqrt{m_{x'}^2 + \left(\tau\left(t_i\,,\,t'_i\right)\right)^2 m_{v_x}^2 + \left(v_x\left(t'_i\right)\right)^2 m_\tau^2}\,, \quad (11)$$

где $m_{x'}$ – СКП определения абсциссы $x(t_i)$ в момент t'_i; $m_{\Delta x}$ – СКП определения приращения Δx абсциссы за промежуток времени $\tau(t_i, t'_i)$; m_τ – СКП определения остаточной асинхронности.

Выражения для нахождения ординаты $y(t_i)$ и аппликаты $z(t_i)$ вектора $R(t_i)$ положения мобильного объекта (ЛАМ или ЛА ДЗЗ), которое получено способом синхронизации момента фотографирования с моментом получения навигационного решения, а также СКП получения координат вектора $R(t_i)$ будут аналогичны зависимостям (10) и (11). Т.е. выражения (10) и (11) позволяют моделировать ожидаемую СКП определения составляющих вектора $R(t_i)$ положения ЛАМ или ЛА ДЗЗ в момент фотографирования t_i, при получении вектора $R(t_i)$ способом синхронизации момента фотографирования t_i с моментом t'_i получения навигационного решения.

Заключение

Описанные модели кроме уточнения координат мобильного объекта позволяют получать на заданный момент времени значения ожидаемых погрешностей определения положения элементов системы определения ЭВО снимка по изображениям летательных аппаратов [8]. Входными данными для этих моделей являются СКП определения векторов положения элементов системы определения ЭВО [8] в моменты получения навигационных решений.

Поскольку фотосъёмка при ДЗЗ выполняется в движении, определение координат ЛАМ или ЛА ДЗЗ с применением спутниковых глобальных РНС возможно выполнять [11]: абсолютным методом позиционирования; относительными методами: кинематика (с постобработкой) и дифференциальные методы (с применением функциональных дополнений [3, 10]); а также с применением функциональных дополнений методом PPP [2] посредством получения поправок к эфемеридам орбит и бортовым часам навигационных космических аппаратов от сетевого источника.

Для определения входных данных для разработанных моделей следующим шагом необходимо провести анализ точности получения координат ЛАМ и ЛА ДЗЗ доступными способами в момент получения навигационного решения и выполнить моделирование с их применением.

Литература

1. Большая Советская Энциклопедия : [в 30 т.] / Гл. ред. А.М. Прохоров. 3-е издание. – Москва : Советская энциклопедия, 1969–1978.

2. Системы функциональных дополнений ГНСС // Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения : сайт. – URL: https://glonass-iac.ru/guide/function_dop.php (дата обращения: 20.04.2023).

3. Карпик, П. А. Система дифференциальной коррекции и мониторинга как основа перспективной национальной инфраструктуры навигации и позиционирования с повышенной точностью / П.А. Карпик, В.Г. Сернов, В.С. Вдовин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 4, № 2. – С. 3–9.

4. Методика обоснования характеристик аппаратуры и требований к навигационному обеспечению космической съемки / А.С. Кузнецов, С.А. Масленников, В.А. Телеш, И.В. Чернов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – № 665. – С. 151–156.

5. Михайлов, А. П. Фотограмметрия: Учебник для вузов / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2016. – 294 с.

6. Петухов, Г. Б. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем / Г.Б. Петухов, В.И. Якунин. – Москва : АСТ, 2006. – 504 с.

7. Патент № RU 2704540 C1. Способ определения угловых элементов внешнего ориентирования снимка: № 2019102111 : заявл. 25.01.19 : опубл. 29.10.19 / Чернов И.В.; заявитель, патентообладатель Чернов И.В.

8. Патент № 2789986. Способ определения элементов внешнего ориентирования снимка по изображениям летательных аппаратов : № 2022106972 : заявл. 16.03.2022 : опубл. 14.02.2023 / Чернов И.В. ; заявитель, патентообладатель Чернов И.В.

9. Нечипас, Ю. П. Способ фотограмметрического определения координат точек местности на недоступной территории / Ю.П. Нечипас, Ю.В. Левадный, В.А. Телеш // Навигация и гидрография. – 2018. – № 53. – С. 34–39.

10. Высокоточное местоопределение // Российские космические системы : сайт. – URL : https://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/sdkm/vysokotochnoe-mestoopredelenie/ (дата обращения: 23.04.2023).

11. Тяпкин, В. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография / В.Н. Тяпкин, Е.Н. Гарин. – Красноярск : СФУ, 2012. – 260 с.

12. Философский энциклопедический словарь / Гл. ред.: Л.Ф. Ильичев, П.Н. Федосеев, С.М. Ковалев, В.Г. Панов. – Москва : Советская энциклопедия, 1983. – 840 с.

3 2023.indd 101 02.10.2023 12:32:26