УДК 622:629.783:528.2

Г.А. Воронов

СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСТОБРАБОТКИ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС И GPS

Аннотация. Исследования по определению показателей точности разрешения неоднозначности векторов проводились по результатам полевых работ, проведенных на объекте «Магистраль» (Оренбургская область). На сети наблюдений, содержащей двадцать векторов, четырьмя комплектами ГНСС-приемников были проведены спутниковые измерения в статическом режиме. Камеральная обработка наблюдений осуществлялась в программах GrafNetи SpectrumSurvey. Постобработка проводилась с использованием точных эфемерид спутников ГЛОНАСС/GPS и вычисляемых параметров ионосферы. Для уменьшения влияния атмосферной рефракции и многопутности маска возвышения спутников была принята равной 15°. В результате проведенной камеральной обработки данных спутниковых наблюдений были получены следующие результаты: используемое для постобработки спутниковых наблюдений программное обеспечение не позволяет проводить обработку векторов по данным только ГЛОНАСС наблюдений; полученная средняя квадратическая погрешность определения векторов в режимах GPS и ГЛОНАСС+GPS соответствует требованиям нормативных документов; средние квадратические погрешности определения векторов в режиме ГЛОНАСС+GPS для программы Spectrum Survey в 1,13 раза больше средних квадратических погрешностей определения векторов в режиме GPS. Установлено, что для решения задач маркшейдерских наблюдений, исходя из существующих нормативных требований к точности определения горизонтальных сдвижений, может использоваться аппаратура пользователей в многосистемном режиме ГЛОНАСС/GPS. При возможном загрублении сигнала GPS для обработки спутниковых наблюдений следует ориентироваться на программное обеспечение, позволяющее проводить обработку сеансов наблюдений с использованием спутников группировок ГЛОНАСС, Бейдоу, например CREDOGNSS.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, GPS, спутниковые наблюдения, статический режим, точные эфемериды, постобработка, средняя квадратическая погрешность.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-111-117

Служба главного маркшейдера ООО «Газпром геотехнологии» оснащена спутниковым оборудованием ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США). Известны случаи загрубления сигнала GPS во время военных конфликтов в Югославии, Ираке, Афганистане, Осетии, Ливии, а также в воздушном пространстве Украины и над акваторией Черного моря [1]. При этом погрешность определения координат достигала 2 км, азимута — 6°.

Так в 2014 г. Росавиация зафиксировала случаи сбоя или отказа бортовых навигационных систем GPS гражданских самолетов российских авиакомпаний, при полете над территорией воздушного пространства Украины и над акваторией Черного моря. В январе 2016 г. из-за неверных действий служащего ВВС США при замене старого спутника новым произошла рассинхронизация времени, составившая $13{,}7*10^{-6}$ с [2]. В результа-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 9. С. 111–117.
© Г.А. Воронов. 2018.

Сравнительная характеристика ГЛОНАСС и GPS

Характеристика	ГЛОНАСС	GPS
Количество спутников	24	24
Количество орбитальных плоскостей	3	6
Тип орбиты	Круговая (S=0±0.01)	Круговая
Высота орбиты, км	19130	20180
Наклонение орбиты, град	64,8°	55°
Период обращения	11 ч 15 мин 44 с	11 ч 58 мин 00 с
Навигационные частоты, МГц: L1 L2	 1602,56 — 1615,5 1246,44 — 1256,5	 1575,42 1227,6
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
СКП местоопределения*, м	2,0	1,6**

*- по данным ресурса https://stat.glonass-iac.ru/#errorClarifyOriginAbsModeC1

**- ГЛОНАСС и GPS

Рис. 1. Сравнительная характеристика ГЛОНАСС и GPS
Fig. 1. Comparative characteristics of GLONASS and GPS

те чего на следующие 12 ч в Северной Америке наземные электронные сети и системы связи вышли из строя.

С учетом развития военных операций во главе США в Сирии и потенциальной интенсификации процесса санкций против нашей страны возможно загрубление сигнала системы GPS. Так российские ВВС применяют для навигации только ГЛОНАСС и не используют другие навигационные системы [3]. В связи с этими фактами, нашей стране пришлось ускорить сроки ввода на полный уровень работы ГЛОНАСС и провозгласить курс на импортозамещение, в том числе использования отечественных технологий, аппаратного и программного обеспечений. Что в соответствии с высказываниями президента России позволит обеспечить надежность реализации многих проектов.

Влияние возможного, вследствие ужесточения режима санкций, загрубления GPS и полный «переход» на ГЛОНАСС для решения маркшейдерских задач представляется отрицательным, но полностью не изученным. Таким образом, сравнение и анализ результатов постобработки маркшейдерских наблюдений с использованием навигационных систем ГЛОНАСС и GPS представляется актуальной темой исследований.

Целью исследований являлся сравнительный анализ результатов постобработки спутниковых наблюдений с использованием навигационных систем ГЛОНАСС и GPS и оценка возможных последствий в случае невозможности использования сигнала GPS.

Для достижения цели исследований следует решить следующие задачи:

- получить разрешения неоднозначности векторов на выбранной сети спутниковых наблюдений;
- сравнить полученные значения решения при различных сочетаниях ГНСС;
- оценить возможности камеральной обработки спутниковых наблюдений при отсутствии сигнала GPS;
- определить основные мероприятия при проведении постобработки без данных GPS.

С точки зрения диалектики [4], динамика системы однозначно определяется ее структурой и начальными состоянием, что на примере спутниковых систем можно описать их основными характеристиками [5], представленными на рис. 1.

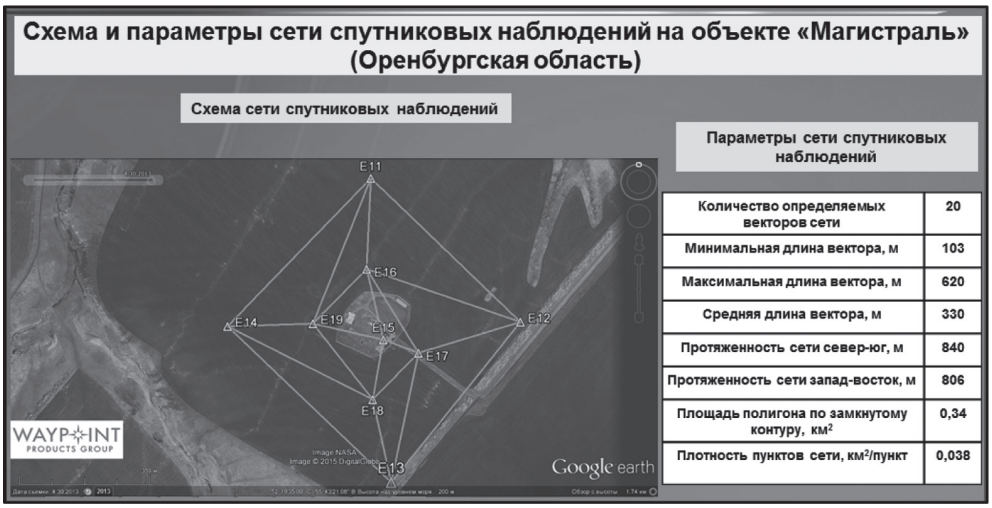

Рис. 2. Схема и параметры сети спутниковых наблюдений
Fig. 2. Scheme and parameters of satellite observation network

Как видно из представленного, основные характеристики ГНСС близки, отличие заключается в том, что спутники ГЛОНАСС в своем орбитальном движении не имеют резонанса (синхронности) с вращением Земли, что обеспечивает им бóльшую стабильность [6—8]. Таким образом, группировка КА ГЛОНАСС не требует дополнительных корректировок в течение всего срока активного существования. Кроме того заметными отличиями являются количество орбитальных орбит и их наклон, а также способы разделения сигналов, GPS — кодовое, ГЛОНАСС, за исключением спутников ГЛОНАСС-К1, — частотное [9], что предопределяет более высокую помехозащищенность этой системы. Спутниковые наблюдения были проведены на объекте «Магистраль» (Оренбургская область). Схема и параметры сети спутниковых наблюдений приведены рис. 2.

В качестве аппаратного обеспечения для проведения спутниковых наблюдений было использовано четыре многосистемных комплекта Novatel DL-V3 (Канада), работавших в статическом режиме.

Камеральная обработка осуществлялась в прилагаемых к аппаратному обеспечению программных комплексах Graf Net и Spectrum Survey (Канада).

Количество наблюдаемых космических аппаратов (КА), выявленное на эпоху наблюдений по результатам камеральной обработки в программном обеспечении Spectrum Survey приведено на рис. 3. Как видно из рис. 3 минимальное количество КА для режима ГЛОНАСС+

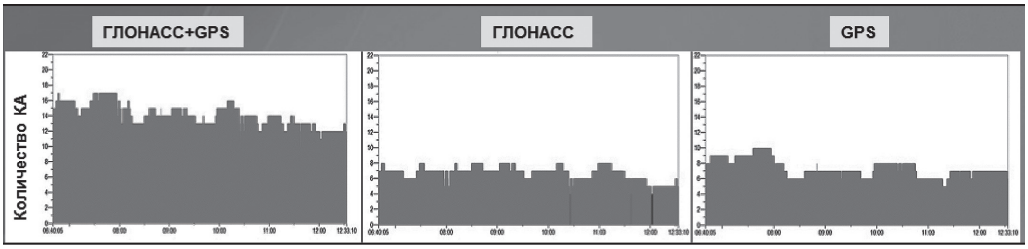

Рис. 3. Количество космических аппаратов на эпоху наблюдений по данным ПО Spectrum Survey
Fig. 3. The number of spacecraft observations era according Spectrum Survey

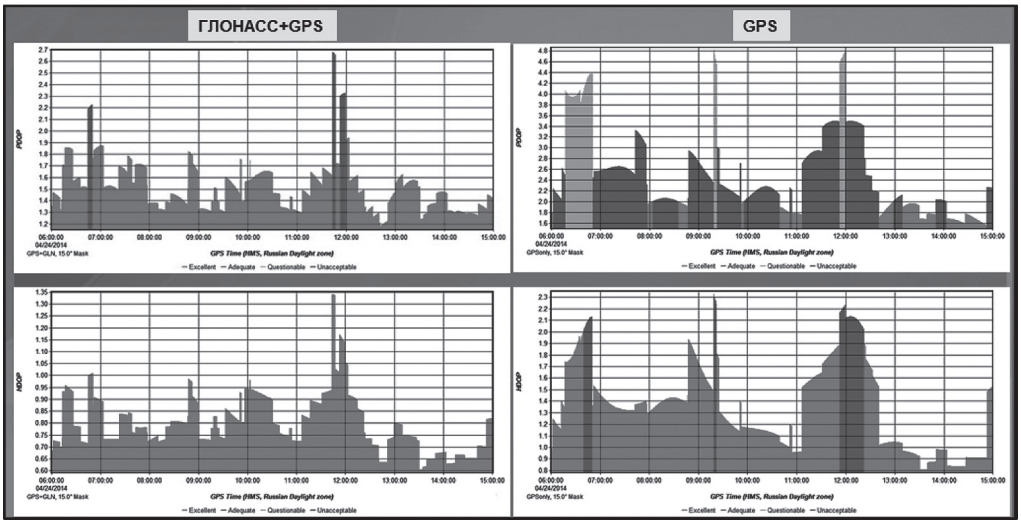

Рис. 4. Значения PDOP и HDOP по данным Graf Net
Fig. 4. The values of PDOP and HDOP according GrafNet

+GPS составило 11, для ГЛОНАСС — 4, для GPS — 5, что соответствует минимальным требованиям для производства наблюдений в статическом режиме [10].

Значения позиционного PDOP и горизонтального HDOP факторов точности в режимах ГЛОНАСС+GPS и GPS по данным Graf Net указаны на рис. 4. Можно отметить, что и по этому критерию, PDOP и HDOP находятся в допуске, особенно в режиме ГЛОНАСС+GPS, что может быть объяснено увеличением числа наблюдаемых спутников.

Невязки спутников на эпоху наблюдений в режимах ГЛОНАСС+GPS по данным Spectrum Survey изображены на рис. 5.

Из анализа рис. 5 можно сделать вывод о том, что невязки спутников ГЛОНАСС и GPS отличаются незначительно и расположены в пределах первых дециметров, что соответствует результатам, полученным авторами [11, 12].

Постобработка спутниковых наблюдений в программах Graf Net и Spectrum Survey проводилась с использованием точных эфемерид спутников ГЛОНАСС/GPS и вычисляемых параметров ионосферы. Для уменьшения влияния атмосферной рефракции и многопутности маска возвышения спутников была принята равной 15°. Максимальная среднеквадратическая погрешность определения векторов ограничивалась паспортной точностью используемого оборудования и вычислялась как 0,005 м + $1 \cdot 10^{-6} D$, где D — длина наблюдаемого вектора, м.

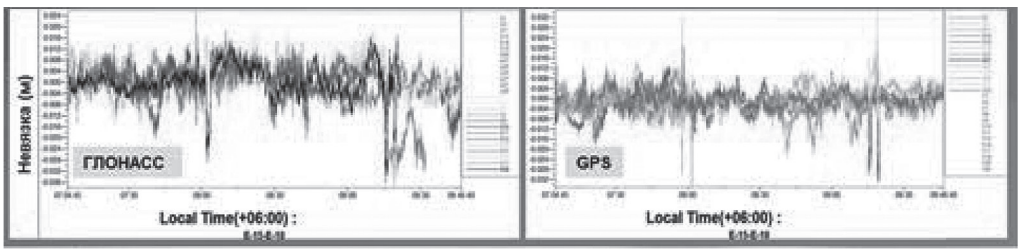

Рис. 5. Невязки спутников по данным Spectrum Survey
Fig. 5. Residuals satellites according Spectrum Survey

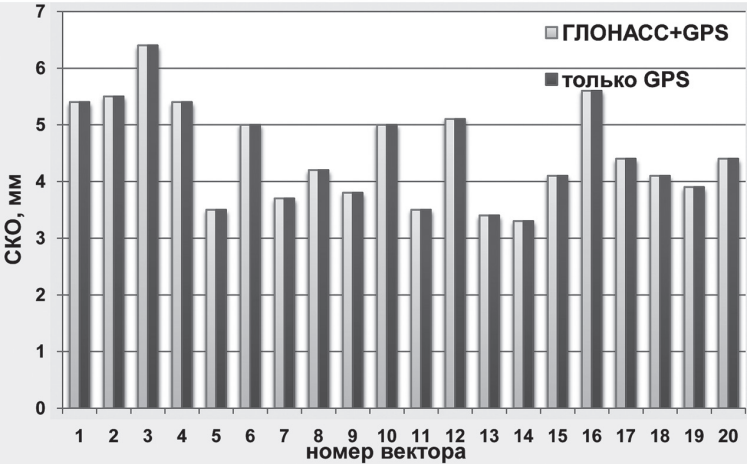

Рис. 6. Результаты постобработки спутниковых наблюдений по данным Graf Net
Fig. 6. Results post-processing satellite observations according GrafNet

Результаты постобработки спутниковых наблюдений в программном обеспечении Graf Net представлены на рис. 6.

По результатам камеральной обработки спутниковых наблюдений в ПО Graf Net отмечена невозможность получения решения только по спутникам ГЛОНАСС.

Решения в режимах только GPS и ГЛОНАСС+GPS совпадают, что может быть объяснено тем, что данное программное обеспечение отбрасывает результаты в режиме ГЛОНАСС+GPS при наличии разрешения неоднозначности векторов в режиме GPS. Результаты постобработки спутниковых наблюдений в программном обеспечении Spectrum Survey представлены на рис. 7.

Анализируя полученные результаты можно отметить невозможность получения решения только по спутникам ГЛОНАСС, также как и в программном обеспечении Graf Net.

В половине случаев результаты решения в режимах GPS и ГЛОНАСС+GPS совпадают, в 40% случаях точнее решение в режиме GPS, в оставшихся 10%

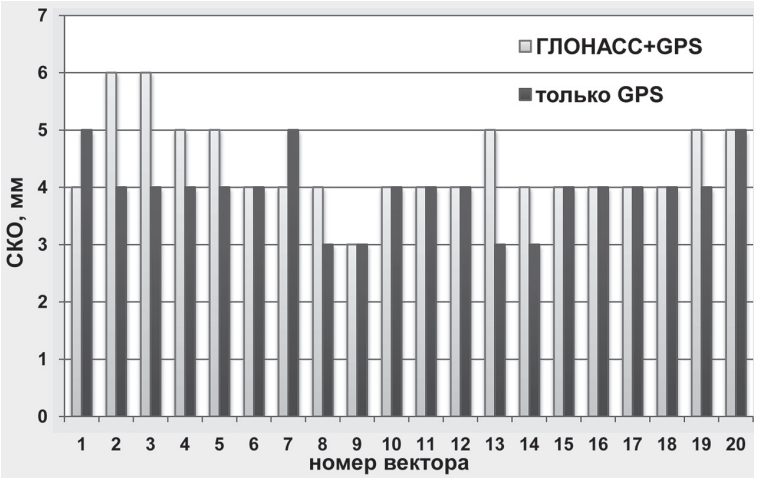

Рис. 7. Результаты постобработки спутниковых наблюдений по данным Spectrum Survey
Fig. 7. Results post-processing satellite observations according Spectrum Survey

случаях результаты решения в режиме ГЛОНАСС+GPS точнее.

По результатам проведения камеральной обработки спутниковых наблюдений на объекте «Магистраль» можно сформулировать следующие выводы:

• используемое для постобработки спутниковых наблюдений программное обеспечение не позволяет проводить обработку векторов по данным только ГЛОНАСС наблюдений;

• средние квадратические погрешности определения векторов в режиме ГЛОНАСС+GPS для программы Spectrum Survey в 1,13 раза больше средних квадратических погрешностей определения векторов в режиме GPS;

• при возможном загрубении режима GPS для обработки спутниковых наблюдений следует ориентироваться на программное обеспечение, позволяющее проводить диверсифицированную обработку сеансов наблюдений с использованием спутников группировок ГЛОНАСС, Бейдоу, Galileo, например специализированное программное обеспечение CREDO GNSS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://tass.ru/ekonomika/1155443

2. Charles Curry. SVN 23 — what happened. URL: http://www.gps.gov/cgsic/meetings/2016/curry.pdf

3. http://vestnik-glonass.ru/news/intro/rossiyskie-voennye-predpochitayut-glonass

4. Évariste sanchez-palencia. Promenade dialectiquedans les sciences, éd. Hermann, 2012, 271 p.

5. *Генике А. А.*, *Побединский Г. Г.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. — М.: Картгеоцентр, 2004. — 355 с.

6. *Sośnica K. J.* Determination of Precise Satellite Orbits and Geodetic Parameters using Satellite Laser Ranging. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2014,253 p.

7. *ГЛОНАСС*: принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. — 3-е изд., перераб. — М.: Радиотехника, 2005. — 688 с.

8. *Серапинас Б. Б.* Глобальные системы позиционирования. — М.: ИКФ «Каталог», 2002. — 106 с.

9. *Wanninger L.* Carrier-phaseinter-frequency biases of GLONASS receivers. Journal of Geodesy, 2012, 86(2), 139—148 p.

10. *Инструкция* по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. — М.: ЦНИИГАиК, 2002. — 124 с.

11. *Veytsel A. V.* Using multi-system receivers for accuracy positioning. Presented at the Sixth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG), Tokyo, Japan, September 4—9, 2011.

12. *Takac F., Cole A., Carrera M., Alves P., Wübbena G., Sleewaegen J.-M., Simsky A., De Wilde W.* A proposed industry solution to realize universal GLONASS observation interoperability for precise positioning. Presented at ION GNSS 2012, Nashville, TN, September 17—21, 2012. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Воронов Геннадий Александрович — кандидат технических наук,
главный маркшейдер-начальник службы ООО «Газпром геотехнологии»,
e-mail: g.voronov@gazpromgeotech.ru,
ПАО «Газпром» ООО «Газпром геотехнологии».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 9, pp. 111–117.

Comparison and analysis of GLONASS and GPS data post-processing results

Voronov G.A., Candidate of Technical Sciences, Chief Surveyor-head of Service,
LLC «Gazprom geotechnology», e-mail: g.voronov@gazpromgeotech.ru,
Gazprom's Subsidiary LLC «Gazprom geotechnology», 123290, Moscow, Russia.

Abstract. The Chief Surveyor Service at Gazprom geotekhnologii is equipped with satellite systems GLONASS (Russia) and GPS (USA). It is on record that USA desensitizes GPS signals at the time of military conflicts. The impact of GPS desensitization due to toughening of sanctions and the related transition to GLONASS in surveying seems right now unfavorable though is insufficiently studied. It is of the current concern to compare and analyze the results of post-processing of survey data obtained using the global navigation GLONASS and positioning GPS systems. The studies into accuracy of disambiguation of vectors used field observation data at Magistral site, Orenburg Region. The survey network of 24 vectors included 4 sets of GNSS receivers to carry out static measurements. The office processing of the measurements used GraftNet and SpectrumSurvey program. The post-processing was implemented using GLONASS/GPS satellite ephemerides and calculated parameters of ionosphere. With a view to reducing influence of atmospheric refraction and multipath effect, the elevation mask angle was assumed as 15°.The office processing of satellite observation date showed that: the software support applied in the satellite data post-processing failed to treat vectors by the GLONASS data only; the mean square error of vectors determined in the modes of GPS and GLONASS+GPS complied with the standard requirements; the mean square errors of vectors determined in the GLONASS+GPS mode using SpectrumSurvey program exceeded the mean square errors of vectors determined in the GPS mode by a factor of 1.13. It is found that surveying, based on the current standards of horizontal displacement accuracy, can use instrumentation of the multi-system GLONASS/GPS mode. In case of GPS signal desensitization, processing of satellite data should use software support suitable for GLONASS and BeiDou, for example, CREDOGNSS.

Key words: GLONASS, GPS, satellite measurements, static model, exact ephemerides, post-processing, mean square error.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-111-117

REFERENCES

1. http://tass.ru/ekonomika/1155443

2. Charles Curry. SVN 23 — what happened. URL: http://www.gps.gov/cgsic/meetings/2016/curry.pdf

3. http://vestnik-glonass.ru/news/intro/rossiyskie-voennye-predpochitayut-glonass

4. Évariste sanchez-palencia. Promenade dialectiquedans les sciences, éd. Hermann, 2012, 271p.

5. Genike A.A., Pobedinskiy G.G. *Global'nye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ikh primenenie v geodezii* [Global satellite positioning systems and their use is geodesy], Moscow, Kartgeotsentr, 2004, 355 p.

6. Sośnica K.J. *Determination of precise satellite orbits and geodetic parameters using satellite laser ranging*. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2014, 253 p.

7. *GLONASS: printsipy postroeniya i funktsionirovaniya*. Pod red. A.I. Perova, V.N. Kharisova. 3-e izd. [GLONASS: Configuration and functioning. Perova A.I., Kharisova V.N. (Eds.), 3rd edition], Moscow, Radiotekhnika, 2005, 688 p.

8. Serapinas B.B. *Global'nye sistemy pozitsionirovaniya* [Global positioning systems], Moscow, IKF «Katalog», 2002, 106 p.

9. Wanninger L. Carrier-phaseinter-frequency biases of GLONASS receivers. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(2), 139—148 p.

10. *Instruktsiya po razvitiyu s"emochnogo obosnovaniya i s"emke situatsii i rel'efa s primeneniem global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem GLONASS i GPS* [Instruction for the development of survey ground and survey of the situation and the relief with the use of global navigation satellite systems GLONASS and GPS], Moscow, TSNIIGAiK, 2002, 124 p.

11. Veytsel A.V. Using multi-system receivers for accuracy positioning. *Presented at the Sixth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG)*, Tokyo, Japan, September 4—9, 2011.

12. Takac F., Cole A., Carrera M., Alves P., Wübbena G., Sleewaegen J.-M., Simsky A., De Wilde W. *A proposed industry solution to realize universal GLONASS observation interoperability for precise positioning*. Presented at ION GNSS 2012, Nashville, TN, September 17—21, 2012.