

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО И НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Станислав Олегович Шевчук

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, тел. (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Николай Сергеевич Косарев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, г. Новосибирск, Плехановского, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Елена Сергеевна Черемисина

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ, начальник отдела, тел. (911)255-65-58, e-mail: lenushk@mail.ru

Андрей Хельдурович Мелеск

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, ведущий инженер, тел. (383)22-45-86, e-mail: melesk-a-x@rambler.ru

В статье описано современное состояние и тенденции развития вопросов координатно-временного обеспечения геолого-геофизических работ. Выполнен обзор задач, текущих проблем, а также перспективных разработок в данной области. В частности, к проблемам координатно-временного обеспечения геолого-геофизических работ отнесены устаревшая нормативно-техническая база, проблемы пересчета систем координат и необходимость адаптации спутниковой аппаратуры к специфическим условиям проведения геолого-геофизических исследований. К возможным путям совершенствования данной отрасли отнесены: внедрение новейших ГНСС-технологий (методов PPP/RTPPP, новых ГНСС Galileo и BeiDou, специальных сервисов и пр.), внедрение инерциальных навигационных систем, систем компьютерного зрения, а также технологий дистанционного зондирования Земли, включая использование лидарной съемки и беспилотного транспорта. Приведены примеры первых шагов применения указанных решений как непосредственно в геолого-геофизической отрасли, так и в смежных отраслях. Сделан вывод о необходимости создания единой нормативно-технической и методической базы для обеспечения эффективного развития геологической отрасли.

Ключевые слова: геодезическое обеспечение, ГНСС, навигация, геолого-геофизические работы, инновации.

CURRENT PROBLEMS AND FUTURE TRENDS OF GEODETIC AND NAVIGATIONAL SUPPORT OF GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Stanislav O. Shevchuk

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, prospect Obukhovskoy Oborony St., Saint Petersburg, 192012, Russian Federation, Ph. D., Leading Scientific Worker, phone: (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Nikolay S. Kosarev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., 630108, Novosibirsk, Russian Federation, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Engineering and Mine Surveying, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Elena S. Cheremisina

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, prospect Obukhovskoy Oborony, Saint Petersburg St., 192012, Russian Federation, Leading Engineer, phone: (911)255-65-58, e-mail: escheremisina@gmail.com

Andrey Kh. Melesk

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials (SNIIGGiMS), 67 Krasniy Prospekt, Novosibirsk, 630091, Russia, Leading Engineer, phone: (383)222-45-86, e-mail: melesk-a-x@rambler.ru

The article overviews the current state and problems of geodetic, navigational and timing maintenance of geological and geophysical survey. Innovation trends and perspectives of the technologies' modernization are considered. The main problems of geodetic, navigational and timing maintenance considered in the article are: old normative and technical documents on this kind of works in Russia, coordinate systems transformations problems, necessity of GNSS-devices adaptation for the specific conditions of geology/geophysics. The main ways of modernization of geodetic, navigational and timing maintenance considered in the paper are: adding newest GNSS technologies (PPP/RTPPP method; new GNSS as Galileo and BeiDou; special services etc.); adding INS/GNSS devices; machine vision systems; remote sensing technologies including UAVs and lidar measurements. The examples of the first steps of using this technologies and methods are given. The main conclusion about the importance of the creation of the common technical documentation base was made.

Key words: geodetic maintenance, GNSS, navigation, geological and geophysical survey, innovation.

Задачи координатно-временного обеспечения геолого-геофизических работ

Геодезическое обеспечение и временная синхронизация съемочных геофизических систем имеют значительное влияние на качество получаемых материалов. Недостаточная точность позиционирования приводит не только к погрешностям нанесения результирующей информации на картографическую основу, но и к ошибкам в обработке и интерпретации геолого-геофизических данных [1–5].

Использование сложных многометодных съемочных систем с разнесенными измерительными узлами, а также необходимость учета взаимного влияния элементов данной системы и носителя съемочной аппаратуры (особенно в аэрогеофизике) задают повышенные требования к определению пространственного положения элементов съемочной системы и синхронизации измерений в единой системе времени [2, 3].

Таким образом, координатно-временное (в том числе, геодезическое и навигационное) обеспечение геолого-геофизических работ (КВО ГГР) является важным технологическим звеном в их производстве.

К задачам КВО ГГР относятся:

- Навигационно-геодезическое обеспечение – определение местоположения пунктов измерений (в том числе, точек кинематических траекторий) и параметров движения [1, 5]:
 - геодезическая привязка измеряемых точек в заданной СК (в т.ч., привязка к государственной геодезической сети);
 - проводка и навигация носителя геофизической аппаратуры.
- Обеспечение системы единого времени для измерительных комплексов [3]:
 - обеспечение необходимой точности и непрерывности измерений времени;
 - синхронизация измерений разнесенных узлов измерительных систем.
- Внедрение новейших технологий пространственно-временного позиционирования для повышения экономической эффективности ГГР, контроль соответствия программно-аппаратной базы и выдерживания технологических процессов при выполнении съемочных работ.

Текущее состояние и существующие проблемы КВО ГГР

В настоящее время координатно-временное обеспечение геолого-геофизических работ выполняется с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В исключительных случаях применяются методы классической геодезии [2, 5].

В последние 20 лет ГНСС-технологии сделали заметный шаг к повышению точности и надежности измерений, дополнились новыми методами и вспомогательными технологиями, такими как инерциальные навигационные системы (ИНС) [6, 7].

Повысились и требования к точности КВО ГГР в связи с увеличением детальности выполнения геолого-геофизических работ. Появились новые задачи, требующие гибкого и нестандартного подхода к технологии определения навигационных и геодезических параметров геофизической съемки, которые невозможно ограничить применением только ГНСС [2, 8, 9].

Однако приходится констатировать, что в настоящее время существуют проблемы с нормативно-технической базой по вопросам навигационно-геодезического обеспечения. Действующая «Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геолого-геофизических работ» (Новосибирск, 1997) [5] в настоящее время устарела и не содержит актуальных требований к точности и способам выполнения геодезического и навигационного обеспечения съемки.

Кроме того, практически невозможно найти информацию о применении комплексированных систем ГНСС/ИНС в производстве геолого-геофизических работ, в то время как соответствующая аппаратура активно внедряется на рынок и становится все более доступной.

Остались нерешенными и другие вопросы геодезического обеспечения геолого-геофизических работ с применением ГНСС-технологий. В частности, связь

систем координат (особенно при привязке к ГГС) с учетом локальных деформаций геодезических сетей (так как все измерения в ГНСС происходят изначально в глобальных СК, таких как WGS-84 и ПЗ-90.11). С учетом ввода новой государственной системы координат ГСК-2011 [10–12] и проблем с доступностью ключей местных СК, данный вопрос остается весьма актуальным.

Кроме того, по-прежнему существует проблема определения нормальных и ортометрических высот посредством ГНСС-технологий с необходимой точностью [1–4, 13–17]. В настоящее время для решения данной задачи в основном применяются модели глобальных геоидов, однако в научной литературе не утихают споры об окончательной точности их применения.

Не решены и другие серьезные технологические проблемы по применению спутниковых систем, в частности вопросы выдерживания необходимых условий приема спутниковых сигналов [1, 18, 19]. Так, при наличии препятствий вблизи ГНСС-приемника возникают проблемы затухания спутниковых сигналов и их переотражения (многолучевости). В связи с этим также остается актуальным вопрос о правильной установке ГНСС антенн не только на местности, но и на носителе геофизической аппаратуры (например, на вертолете, с учетом помех от лопастей [20]).

Не последней остается проблема необходимости адаптации аппаратуры и программного обеспечения (ПО) под нужды непосредственно геолого-геофизических работ [21, 22].

Ближайшие перспективы развития КВО ГГР и инновационные разработки в данной области

Перспективы развития технологий КВО ГГР связаны как с развитием технологий, так и с внедрением новых инновационных решений, находящихся на стыке научно-производственных дисциплин.

В настоящее время наиболее отчетливо прослеживаются тенденции совершенствования КВО ГГР по следующим направлениям.

- Внедрение новейших методов и технологий ГНСС:
 - Precise Point Positioning (PPP) и Real-Time PPP (RTPPP), позволяющие выполнять измерения без размещения собственных наземных базовых станций [22–25];
 - Применение новых разворачиваемых навигационных систем BeiDou (Китай) и Galileo (Евросоюз), уже активно функционирующих и внедряющихся на рынок геодезических технологий, рис. 1 [26];
 - Внедрение ГНСС с высокоточными компактными атомными стандартами частоты [27, 28];
 - Использование сигналов систем дифференциальной коррекции, например, отечественной Системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) [29];
 - Адаптация отечественной ГНСС-аппаратуры и ПО, анонсированной, например, в [30, 31];
 - Применение наиболее экономически-эффективных технологий и сервисов ГНСС-позиционирования [32];

– Создание специализированных систем на основе существующих технологических решений, а также разработка специализированного ПО непосредственно для целей геофизической съемки, например [33]

- Внедрение инерциальных навигационных систем (ИНС), позволяющих определять углы пространственной ориентации измерительных систем, и комплексирование их с ГНСС-приемниками, что позволит значительно повысить доступность и непрерывность кинематических измерений [6, 7, 34], рис. 2.

- Применение систем компьютерного зрения:

- Обеспечение безопасности съемки (в первую очередь, для выносных вертолетных конструкций) посредством стереоскопической видеосъемки, рисунок 3 (а) [9, 35];

- Определение съемочных параметров фотограмметрическими методами [36, 37], рис. 3 (б).

- Автоматизация съемочного процесса (в частности, созданием специального ПО, позволяющего пилоту выполнять съемку без присутствия оператора на борту носителя аппаратуры) [38].

- Интеграция систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ):

- Аэрокосмическая съемка [39];

- Лидарная съемка (использование лазерных сканирующих систем авиационного и наземного базирования) [40];

- Беспилотные летательные аппараты [41]:

- а) для рекогносцировки и получения дополнительной съемочной информации (например, при наземных измерениях);

- б) в качестве носителя геофизической аппаратуры, рис. 4.

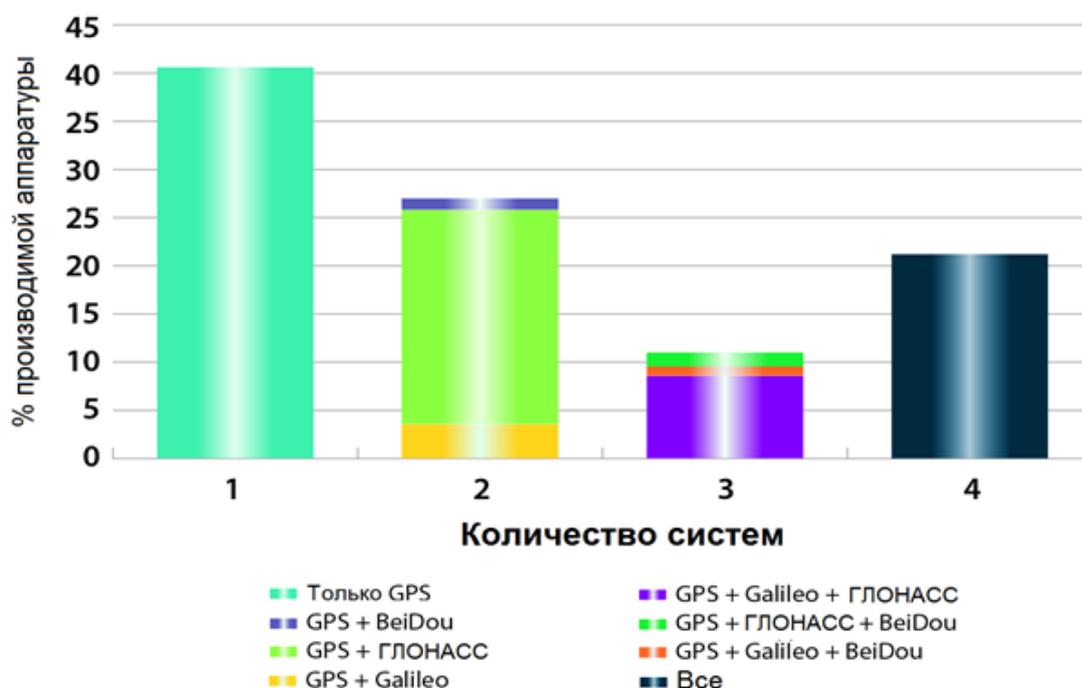


Рис. 1. ГНСС, поддерживаемые гражданской аппаратурой потребителя (в процентах от общего числа производимых единиц) на 2015 г. [26]

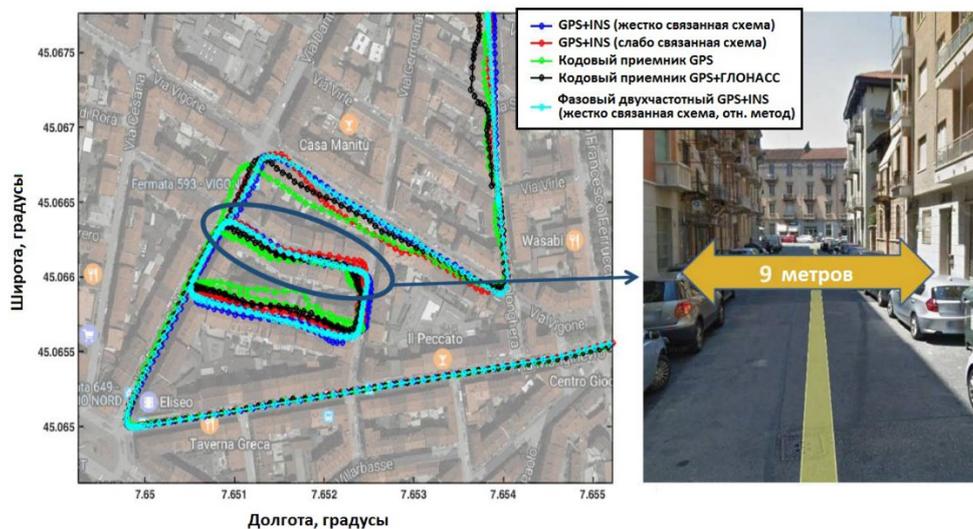


Рис. 2. Улучшение характеристик ГНСС-измерений в сложных условиях приема спутниковых сигналов за счет использования ИНС [34]

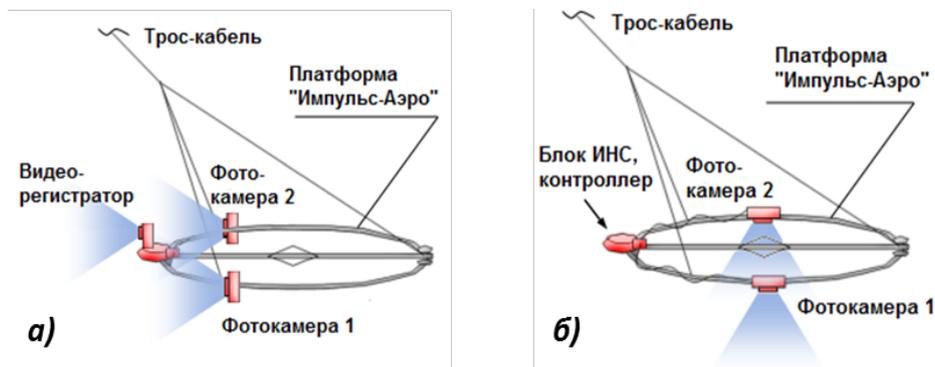
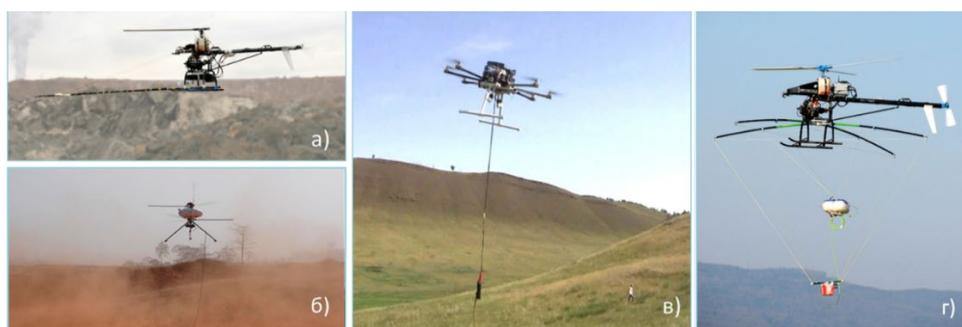


Рис. 3. Пример фотограмметрических систем, основанных на применении компьютерного зрения, для аэроэлектромагнитной съемки с платформой типа «Импульс-Аэро» [9, 35–37]



а) вертолет на бензиновом двигателе, оснащенный магнитометром, Scout B1, MGT, Германия; б) вертолет с оппозитными винтами, оснащенный магнитометром, ECA Group, Франция; в) вертолет оригинальной конструкции на батареях, оснащенный магнитометром, ИНГГ СО РАН, Россия; г) вертолет на бензиновом двигателе Aeroscout B1 с электромагнитной измерительной системой, MGT, Германия.

Рисунок 4 – Беспилотные ЛА в качестве носителей геофизической аппаратуры [41–46]

Выводы

Развитие технологий и появление разнообразных инновационных решений приводит к необходимости их системного внедрения и создания единой нормативно-технической и научно-методической базы. В настоящее время данный вопрос остается открытым, в то время как требования к КВО ГГР растут, а технологии продолжают развиваться и предоставлять новые возможности, внедрение которых способно значительно повысить качество и экономическую эффективность геолого-геофизических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прихода А.Г., Лапко А.П., Мальцев Г.И., Бунцев И.А. GPS-технология геодезического обеспечения геологоразведочных работ : метод. рекомендации. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2008. – 274 с.
2. Тригубович Г. М., Шевчук С.О., Белая А.А., Чернышев А.В., Барсуков С.В., Косарев Н.С. Навигационно-геодезическое обеспечение аэрогеофизических исследований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2013. – № 2. – С.61–69.
3. Глаголев, В. А. Спутниковое навигационно-геодезическое обеспечение геофизических измерений в движении.– СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 2003.– 104 с.
4. Kamenetsky F.M., Stettler E.H., Trigubovich G.M. Transient Geo-Electromagnetics. – Ludwig-Maximilian-University of Munich. Dept. of the Earth and Environmental Sciences. Section Geophysics. – Munich, 2010. – 296 p.
5. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1997. – 106 с.
6. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011.– № 1 (72). – С. 3–17.
7. Шелаев Д.В. Сравнение датчиков МЭМС и ВОГ // Геопрофи. – 2012. – №6. – С. 49-54.
8. Шевчук С.О., Косарев Н.С. Алгоритм определения пространственных углов аэрогеофизической платформы // Вестник СГГА – 2013. – Вып. (24). – С. 37–47.
9. Кузин В. И., Шевчук С.О., Никитин В.Н. Фотограмметрический способ и устройство для определения истинной высоты выносной вертолётной платформы аэрогеофизического комплекса «Импульс-Аэро» // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2013. – № 4/С. – С. 86–92.
10. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.11.2016 №1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы» [Электронный ресурс] : <http://docs.cntd.ru/document/420383741>
11. Попрыгин В. А., Третьяков В.И. ГСК-2011. Проблема перехода // Геопрофи. – 2018. – №1. – С. 8-12.
12. Обиденко В. И. Методология геодезического обеспечения цифровой экономики Российской Федерации // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 12. – С. 42–55. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-954-12-42-55
13. Дмитренко А.П. Современные трансформации определения геоида: монография. – Кривой Рог: Минерал, 2012. – 218 с.
14. Вдовин А. И., Мурзинцев П. П., Титов С. С. Выбор модели квазигеоида при создании опорной геодезической сети // Геодезия и картография. – 2009. – № 11. – С. 16-19.
15. Обиденко В. И., Опритова О. А., Решетов А. П. Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 14–25.

16. Непоклонов В. Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2009. – № 3 (34). – С. 28 – 35.
17. Непоклонов В. Б., Абакушкина М. В. Современное состояние цифровых моделей геоида в континентальных районах // Геодезия, картография, кадастр, ГИС – проблемы и перспективы развития : материалы междунар. науч.-практ. конф., Новополюцк, 9–10 июня 2016 г. : в 2 ч. / М-во образования РБ, Полоцкий гос. ун-т ; редкол.: Г. А. Шароглазова [и др.]. – Новополюцк : ПГУ, 2016. – Ч. 1. – С. 3-11.
18. Weil L. R. Conquering multipath: GPS Accuracy Battle // GPS World. – 1997. – № 4. – P. 59–66.
19. Шевчук С.О., Косарев Н. С., Малютина К. И., Киселев К. В., Жидов В. М. Влияние многопутности на результаты геодезического обеспечения электромагнитного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 293–298.
20. Косарев Н.С., Шевчук С.О. Проблема срывов фазовых наблюдений в методе точного точечного позиционирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 16–18 апреля 2014 г.). – 2014. – Т. 1. – С. 128–134.
21. Шевчук С. О., Косарев Н. С., Антонович К. М. Сравнение коммерческих программ постобработки измерений ГНСС в режиме кинематики для геодезического обеспечения аэро-геофизических работ // Вестник СГУГиТ. – 2016. – №3. – С. 79–102.
22. Bisnath S., Gao Y. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future // GPS World. – 2009. – No. 4. – P. 43-50.
23. Chesagne O. One centimeter accuracy with PPP // Inside GNSS – 2012. – No 2. – P. 49-54.
24. Yu X., Gao J. Kinematic Precise Point Positioning Using Multi-Constellation Global Navigation Satellite System (GNSS) Observations // ISPRS Int. J. Geo-Inf. – 2017. – № 6. – 6.
25. Шевчук С.О., Мелеск А.Х., Косарев Н.С. Исследования точности метода PPP для навигационно-геодезического обеспечения геофизических работ // Геопрофи. – 2016. – №3. – С. 10-15.
26. GSA’s 2015 Report Drives Deep into Global GNSS Market / GPS World [Electronic resource] Режим доступа: <http://gpsworld.com/gsas-2015-report-dives-deep-into-global-gnss-market/> – Англ.
27. Ucar A., Adane Ya., Bardak B., Paparo C., Berry R., Kale I. A Chip Scale Atomic Clock Driven Receiver for Multi-Constellation GNSS // The Journal of Navigation. – 2013. – Vol. 66, P. 449–464.
28. Bruggemann T. S., Greer D. G., Walker R. Chip Scale Atomic Clocks: Benefits to Airborne GNSS Navigation Performance [Electronic resource] – Mode of access : <https://www.semanticscholar.org/paper/Chip-Scale-Atomic-Clocks%3A-Benefits-to-Airborne-GNSS-Bruggemann-Greer/92a3156238ac35c7f0a06732b7b9b8761a171afa>
29. Куприянов А.О., Майоров А.А. Современное состояние и перспективы развития применения ГЛОНАСС/ГНСС в Российской Федерации / CLGE: Documents [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.clge.eu/documents/events/154/kupriyanov.pdf>
30. ГЛОНАСС умеет быть высокоточным [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vestnik-glonass.ru/stati/glonass_umeet_byt_vysokotochnym/
31. Лисовой И. Модуль СН 7700 как основа для создания отечественных решений в области высокоточной навигации // Вестник ГЛОНАСС. – 2018. – №7.
32. Lipatnikov L. A., Shevchuk S. O. Cost effective precise positioning with GNSS. FIG Report, 2019 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.fig.net/resources/publications/fig-pub/pub74/Figpub74.pdf>

33. Шевчук С.О. Программа для навигационного обеспечения аэрогеофизических работ RouteNav // Вестник СГУГиТ. – 2017. – №4. (22). – С. 113-125.
34. Falco G., Pini M., Marucco G. Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios // Sensors. – 2017. – No. 17. – 255.
35. Пат. 2508525 Российская Федерация МПК⁵¹ G01C 11/04 G01V 3/16 Фотограмметрический способ определения превышений подвижного объекта над земной поверхностью и устройство для аэрогеофизической разведки, реализующее его / С. О. Шевчук, В. Н. Никитин, С. В. Барсуков; заявители и патентообладатели: Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Общество с ограниченной ответственностью Геофизическое предприятие «Сибгеотех». – 2012139733; заявл. 17.09.2012; опубл. 27.02.2014 – Бюл. № 6. – 11 с.
36. Trigubovich G. M., Shevchuk S. O., Kosarev N. S., Nikitin V. N. Complex Technology of Navigation and Geodetic Support of Airborne Electromagnetic Surveys // Gyroscopy and Navigation. – 2017. – Vol. 8, No. 3. – P. 226–234.
37. Пат. 2592042 Российская Федерация МПК⁵¹ G01C 11/04 G01V 3/16 Способ оптимизации траектории подвижного объекта при проведении аэрогеофизической разведки и устройство для его осуществления / Г.М. Тригубович, С.О. Шевчук, В.Н. Никитин; заявители и патентообладатели: Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Закрытое акционерное общество «Аэрогеофизическая разведка» - 2015111497/28; заявл. 30.03.2015; опубл. 20.07.2016 – Бюл. 20.
38. Тригубович Г.М., Шевчук С.О., Сверкунов А.С., Барсуков С.В. Концепция построения автоматизированного навигационно-измерительного аэрогеофизического комплекса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91636> DOI: 10.3997/2214-4609.201800454
39. Gupta R. P. Remote Sensing Geology. – New-York: Springer. – 2003. – 655 p.
40. Flamant P. Light detection and ranging (Lidar) and applications in external geophysics / ResearchGate.com [Electronic resource] . – Mode of access : https://www.researchgate.net/publication/287561808_Light_detection_and_ranging_Lidar_and_applications_in_external_geophysics
41. Тригубович Г.М., Никитин В.Н., Шевчук С.О., Арбузов С.А., Барсуков С.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91662>
42. Geophysics Mini UAV / ECA Group [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.ecagroup.com/en/solutions/geophysics-mini-uav>
43. Tezkan B., Stoll J.B., Bergers R., Großbach H. Unmanned aircraft system proves itself as a geophysical measuring platform for aeromagnetic surveys // First Break. – 2011. – Vol. 29(4). P. 103–105.
44. Stoll J.B. Unmanned Aircraft Systems for Rapid near Surface Geophysical Measurements // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Rostock, Germany. – 2013. – Vol. XL-1/W2. – P. 391–394.
45. Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В., Вайсман П.А., Вальд А.К., Дядьков П.Г., Колесов А.С., Шеремет А.С. Применение беспилотных летательных аппаратов при геолого-геофизическом картировании // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России», 31 марта-2 апреля, 2015 г. – 2015. – С. 529-533.
46. Jean M. Legault Airborne Electromagnetic Systems – State of the Art and Future Directions [Text] Recorder.- 2015.- Vol. 40 No. 06.- P. 38-49.

© С. О. Шевчук, Н. С. Косарев, Е. С. Черемисина, А. Х. Мелеск, 2020