

## **ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ НА ПУНКТАХ IGS ДЛЯ МОНИТОРИНГА МОРСКИХ НЕФТЯНЫХ ПЛАТФОРМ НА ШЕЛЬФЕ О. САХАЛИН**

*Алексей Владимирович Давыдов*

«Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.», 693000, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Хабаровская, 56, магистрант, инженер по геоматике, тел. +7(916)280-65-74, e-mail: alexey.davydov@sakhalinenergy.ru

*Елена Геннадьевна Гиенко*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, e-mail: elenagienko@yandex.ru

Статья содержит описание методики геодезического мониторинга морских стационарных сооружений, на примере нефтегазовой платформы ПА-Б, расположенной на северо-восточном шельфе о.Сахалин в Охотском море. Проведение мониторинга опасных производственных объектов является критически важным для безопасной эксплуатации объекта, охраны труда и защиты окружающей среды. В статье выполнена оценка возможности проведения ГНСС мониторинга стационарной морской платформы относительно станций IGS без использования исходной береговой сети опорных пунктов, с сохранением точности координат на сантиметровом уровне. Приведены результаты экспериментов по обработке ГНСС-измерений относительно сети станций IGS с помощью сервиса AUSPOS. Показано, что рассматриваемый метод обеспечивает сантиметровый уровень точности и сделан вывод о возможности его использования для мониторинга морских стационарных платформ.

**Ключевые слова:** мониторинг, ГНСС, морская платформа, IGS.

## **EXPERIENCE OF USING GNSS MEASUREMENT RESULTS AT IGS STATIONS FOR MONITORING OFFSHORE OIL PLATFORMS ON THE SAKHALIN ISLAND**

*Alexey V. Davydov*

«Sakhalin Energy Investment Company Ltd.», 56, Khabarovskaya St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia, Graduate, Geomatics Engineer, phone: (916)280-65-74, e-mail: alexey.davydov@sakhalinenergy.ru

*Elena G. Gienko*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: elenagienko@yandex.ru

The article contains a description of the methodology for geodetic monitoring of offshore structures, on the example of the PA-B oil and gas platform located on the northeast shelf of Sakhalin Island in the Sea of Okhotsk. Monitoring of dangerous industrial assets is crucial for the safe operation of the facility, labor protection and environmental. The assessment of the possibility of GNSS monitoring of the stationary marine platform with respect to IGS stations without the use of the coastal network of reference points, while maintaining the accuracy of the coordinates at the centimeter level is performed in the article. The results of experiments on processing GNSS meas-

urements with respect to the network of IGS stations using the AUSPOS service are presented. It is shown that this method provides a centimeter level of accuracy and concluded that it can be used for monitoring of marine stationary platforms.

**Key words:** monitoring, GNSS, offshore platform, IGS.

Стационарные морские платформы представляют собой неподвижные сооружения, зачастую удаленные на километры от береговой линии, где невозможно использовать линейно-угловые методы измерения с целью определения осадок, крена и горизонтальных перемещений [1] (рис. 1).

Важность определения перемещений морского сооружения обуславливается многими причинами. Чаще всего подобные сооружения относятся к опасным производственным объектам, мониторинг которых необходимо выполнять с целью обеспечения их безопасной эксплуатации. Работы, связанные с эксплуатацией недр, осадки конструкции сооружения за счет сжатия грунтов, высокая сейсмическая активность региона (9–10 баллов) и сложная ледовая обстановка в зоне расположения платформ являются основными причинами возможного изменения положения конструкции в пространстве [2]. Также данные об осадках сооружения могут быть интерпретированы для проведения геофизических и геологических исследований.



Рис. 1. Фотография нефтегазодобывающей платформы ПА-Б

В статье [3] излагается концепция непрерывного автоматизированного мониторинга морских сооружений на основе 3D-модели объекта и выполнения натуральных наблюдений с оценкой технического состояния сооружения. Здесь анализируются различные методы мониторинга, в том числе отмечается как перспективный и эффективный мониторинг по данным ГНСС-измерений.

В настоящее время ГНСС-мониторинг гидротехнических объектов, мостов и других инженерных сооружений широко применяется в нашей стране; в качестве примера можно привести результаты, изложенные в публикациях [4–7].

Наиболее эффективным способом определения перемещений в пространстве морских платформ на сегодняшний день является определение координат и высот деформационных марок, жестко связанных с конструкцией сооружения, с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Согласно действующей методике [8] проведение геодезического мониторинга подразумевает создание и контроль исходной сети из трех опорных пунктов, установленных вне зоны возможных перемещений объекта наблюдения. Ближайшим местом для размещения пунктов исходной сети является линия побережья поблизости от объекта наблюдения, которая может располагаться в нескольких десятках километров. Требуемая точность определения координат деформационных марок относительно опорных пунктов составляет величину 3–5 см. В результате одновременных измерений двухчастотными спутниковыми приемниками на пунктах исходной сети и на деформационных марках определяются пространственные вектора между опорным репером и каждой из марок, и далее определяются координаты марок в каждом годовом цикле измерений. Дополнительно в каждом цикле проводятся контрольные линейно-угловые измерения приращений координат и высот марок. Основная обработка данных ГНСС измерений ведется в программном обеспечении Trimble Business Center (далее ТВС), [9]. Средняя квадратическая погрешность координат составляет в среднем 3 см, что достаточно для анализа изменения положения сооружения в пространстве.

Вычисление разницы между плановыми координатами деформационных марок различных циклов измерений позволяет определить горизонтальное перемещение конструкции, разница между высотными отметками разных циклов дает информацию об осадке, а комбинированный анализ высотных и плановых координат позволяет оценить величину и направление возможного крена сооружения.

Распространение станций Международной ГНСС службы (International GNSS Service – далее IGS) по всему миру, свободный доступ к файлам ГНСС-измерений на этих станциях [10] и координатам в ITRF [11] предоставляют возможность определения координат деформационных марок относительно ближайших станций IGS без использования исходной сети пунктов, установленных на береговой линии. Основной задачей настоящего исследования является оценка возможности проведения ГНСС мониторинга стационарной морской платформы относительно станций IGS без использования исходной береговой сети опорных пунктов, с сохранением точности на сантиметро-

вом уровне. Основными величинами для анализа и контроля являются длины базовых линий, а также величины приращений координат между точками, как наиболее достоверные данные для мониторинга, по исследованиям [12–14].

Один из способов получения координат пунктов по данным ГНСС-измерений – использование бесплатного онлайн-сервиса по обработке GPS данных AUSPOS (Австралийская организация по наукам о Земле [15]). Здесь координаты определяемого пункта вычисляются на эпоху наблюдения, в системе отсчета ITRF путем уравнивания сети, включающей несколько ближайших пунктов IGS. Одной из задач проводимых экспериментов было сравнение результатов, полученных при обработке в коммерческом ПО TBC, с данными AUSPOS.

В плане экспериментов предусматривались:

- обработка трех циклов ГНСС-измерений в ПО TBC и с помощью сервиса AUSPOS, сравнение полученных результатов;
- расчет векторов базовых линий и расстояний от ближайшей станции IGS до каждой деформационной марки и сравнение полученных результатов со значениями, вычисленными по существующей методике;
- анализ изменений координат и длин векторов между циклами измерений.

В качестве объекта исследования была выбрана морская нефтегазодобывающая платформа «Пильтун-Астохская-Б» (ПА-Б), являющаяся одним из производственных объектов нефтегазовой компании «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.» (<http://www.sakhalinenergy.ru/ru/>), ведущей освоение Пильтун-Астохского и Лунского месторождений на северо-восточном шельфе острова Сахалин в рамках проекта «Сахалин-2». Основанием платформы ПА-Б служит железобетонное основание гравитационного типа с четырьмя опорами высотой 53 метра и массой 90 тыс. тонн. Верхняя часть платформы является полностью интегрированной палубой, несущая часть которой представляет собой стальной каркас, состоящий из нескольких уровней габаритными размерами 100 метров в длину, 70 метров в ширину и около 40 метров в высоту (указаны размеры верхнего строения без учета нависающих конструкций и буровой вышки) весом в 28 тыс. тонн.

Производство ГНСС мониторинга основания платформы не представляется возможным, так как верхние строения полностью закрывают радиогоризонт. По этой причине на верхнем уровне морской платформы установлены 4 деформационные марки таким образом, чтобы влияние отражения радионавигационных сигналов от близко расположенных конструкций и оборудования объекта на результаты ГНСС-измерений было сведено к минимуму, в то же время места установки пунктов выбраны максимально близко к углам площадки верхнего уровня. Схема верхнего уровня платформы и расположения деформационных марок показана на рис. 2.

В соответствии с поставленными задачами, была выполнена обработка трех ежегодных циклов ГНСС-измерений на деформационных марках нефтяной платформы и береговом опорном репере Рп.9120 (расстояние до него

в среднем 1 700 м), с помощью ПО ТВС и онлайн-службы AUSPOS (относительно двенадцати ближайших пунктов IGS). Далее было произведено сравнение полученных длин векторов между опорным репером исходной сети и деформационными марками, результаты представлены в табл. 1. Приведенные в таблице средние квадратические погрешности взяты из оценки AUSPOS.

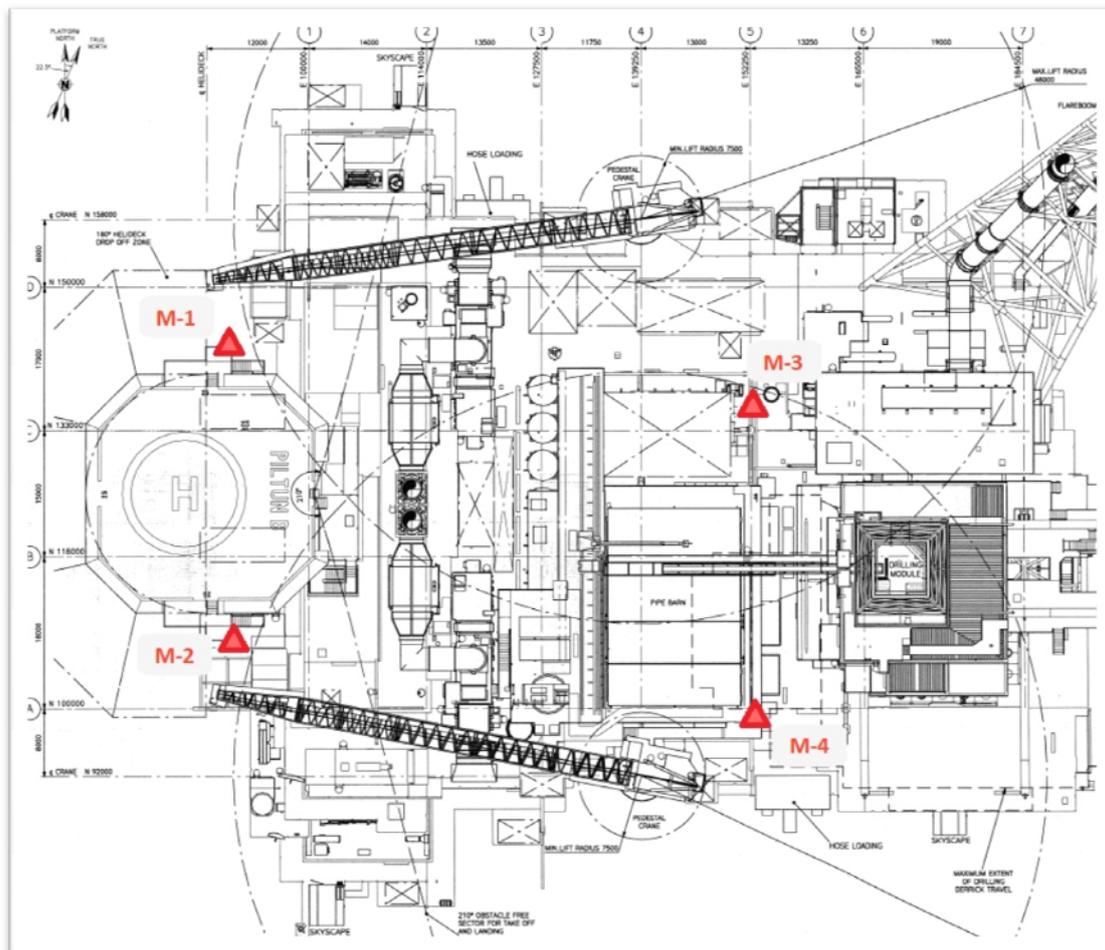


Рис. 2. Схема верхнего уровня платформы ПА-Б и расположения деформационных марок

По результатам отчетов по обработке ГНСС-измерений и данным табл. 1 можно сделать следующие выводы:

- обработка ГНСС-измерений с помощью сервиса AUSPOS на марке М-3 за 2016 и 2018 гг. дала плавающее решение базовых линий. Причина заключается в крайне неблагоприятных условиях ГНСС-измерений на данной марке. Рекомендовано исключить ее из программы наблюдений и произвести установку дополнительной марки на объекте с учетом создания условий качественного приема спутниковых сигналов;

- расстояния между опорным пунктом и деформационными марками, вычисленные с помощью сервиса AUSPOS для марок со стабильными и фикси-

рованными решениями за три последних цикла наблюдений, отличаются от длин векторов, определенных с помощью ПО ТВС, не более чем на 21 мм, среднее значение составляет 5 мм;

– разница значений величин, полученных в ПО ТВС и с помощью сервиса AUSPOS, входит в доверительный интервал, задаваемый средней квадратической погрешностью, следовательно, оценка точности здесь является адекватной.

Таблица 1

Сравнение длин векторов  $\Delta$  между опорным репером 9120 и деформационными марками, вычисленные по результатам обработки в ПО ТВС и с помощью сервиса AUSPOS

| Дата                      | Названия линий | $\Delta H$ , м | СКП, мм | 2D, м     | СКП, мм | $\Delta 2D$ , мм | $\Delta 3D$ , мм | Примечание  |
|---------------------------|----------------|----------------|---------|-----------|---------|------------------|------------------|---|
| Первый цикл<br>07.10.2016 | М-1 – Рп9120   | 61.173         | 12      | 16929.944 | 8       | -4               | -5               |   |
|                           | М-2 – Рп9120   | 61.155         | 11      | 16942.974 | 8       | -5               | -6               |   |
|                           | М-3 – Рп9120   | 72.961         | 23533   | 16981.780 | 12671   | -491             | -426             | Отсутствует фиксированное решение в отчете AUSPOS |
|                           | М-4 – Рп9120   | 63.614         | 25      | 16997.393 | 13      | 0                | 0                |   |
| Второй цикл<br>11.10.2017 | М-1 – Рп9120   | 61.159         | 24      | 16929.964 | 11      | 22               | 21               |   |
|                           | М-2 – Рп9120   | 61.128         | 11      | 16942.997 | 8       | 19               | 18               |   |
|                           | М-3 – Рп9120   | -              |         | -         | -       | -                | -                | Файл не обработан сервисом AUSPOS                 |
|                           | М-4 – Рп9120   | 63.544         | 34      | 16997.403 | 15      | 19               | 18               |   |
| Третий цикл<br>01.10.2018 | М-1 – Рп9120   | 61.192         | 11      | 16929.963 | 6       | 2                | 2                |   |
|                           | М-2 – Рп9120   | 61.175         | 11      | 16942.993 | 6       | -1               | -2               |   |
|                           | М-3 – Рп9120   | 55.862         | 60      | 16982.290 | 24      | 9                | 8                |   |
|                           | М-4 – Рп9120   | 63.603         | 27      | 16997.398 | 11      | 1                | 0                |   |

Кроме сравнения длин векторов, были определены приращения геоцентрических координат по результатам отчетов AUSPOS между каждой деформационной маркой и 1) опорным репером и 2) ближайшей станции IGS YSSK (г. Южно-Сахалинск, Россия). Вычислены значения длин векторов и определе-

ны изменения величин между циклами измерений, которые представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, разницы приращений геоцентрических координат деформационных марок относительно опорного репера и YSSK, вычисленные по результатам отчетов сервиса AUSPOS, для трех циклов наблюдений не превышают 29 мм.

Таблица 2

Разница значений приращений геоцентрических координат деформационных марок относительно Рп.9120 и YSSK в системе ITRF2014 между различными циклами измерений

| Название марки/репера  | Разница приращений относительно рп9120 |                 |                 |                 | Разница приращений относительно YSSK |                 |                 |                 |
|--|--|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | $\Delta X$ , мм                        | $\Delta Y$ , мм | $\Delta Z$ , мм | $\Delta D$ , мм | $\Delta X$ , мм                      | $\Delta Y$ , мм | $\Delta Z$ , мм | $\Delta D$ , мм |
| Разница значений между 3-м и 1-м циклом наблюдений (2018–2016 гг.) |  |                 |                 |                 |                                      |                 |                 |                 |
| М-1  | -9                                     | -11             | -11             | 19              | -24                                  | -11             | 5               | -4              |
| М-2  | -3                                     | -10             | -10             | 21              | -18                                  | -10             | 11              | 2               |
| М-4  | 6                                      | -10             | -10             | 6               | -9                                   | -10             | -24             | -15             |
| 9120   |  |                 |                 |                 | -15                                  | 0               | -17             | -19             |
| Разница значений между 3-м и 2-м циклом наблюдений (2018–2017 гг.) |  |                 |                 |                 |                                      |                 |                 |                 |
| М-1  | -11                                    | 13              | 13              | 0               | -4                                   | -13             | -2              | 3               |
| М-2  | -15                                    | 21              | 21              | -2              | -8                                   | -5              | 12              | 6               |
| М-4  | -22                                    | 26              | 26              | -4              | -15                                  | 0               | 18              | 3               |
| 9120   |  |                 |                 |                 | 7                                    | -26             | -29             | -1              |

На рис. 3 показано изменение высот деформационных марок относительно первого цикла измерений в 2016 г. Видно, что в 2017 г. высоты всех марок уменьшились, а в 2018 г. вернулись к первоначальным значениям в пределах СКП 1–2 см. Это можно объяснить либо действительным изменением платформы по высоте, либо систематической погрешностью измерений высот в 2017 г.

Если предположить, что в течение двух лет сооружение платформы и исходной сети опорных реперов не было подвержено перемещениям, то результаты, полученные с помощью AUSPOS, подтверждают допустимость использования данного сервиса и получения фиксированного значения координат деформационных марок без контроля исходной сети опорных реперов (при закреплении марок на платформе с хорошими условиями наблюдения сигналов спутников ГНСС, дающими стабильное и фиксированное решение).

Выводы по результатам эксперимента следующие:

- применение сервиса AUSPOS для определения перемещений стационарной морской платформы возможно с высокой степенью надежности результатов;
- обеспечение фиксированных решений возможно при расположении деформационных марок на платформе вне зон источников возникновения мно-

гопутности и вдали от оборудования, перекрывающего распространение спутниковых сигналов;

– обработка данных в AUSPOS повторила обработку в ТВС в пределах запрашиваемой для данного вида работы точности, что, в свою очередь, подтверждает надежность обоих способов обработки.

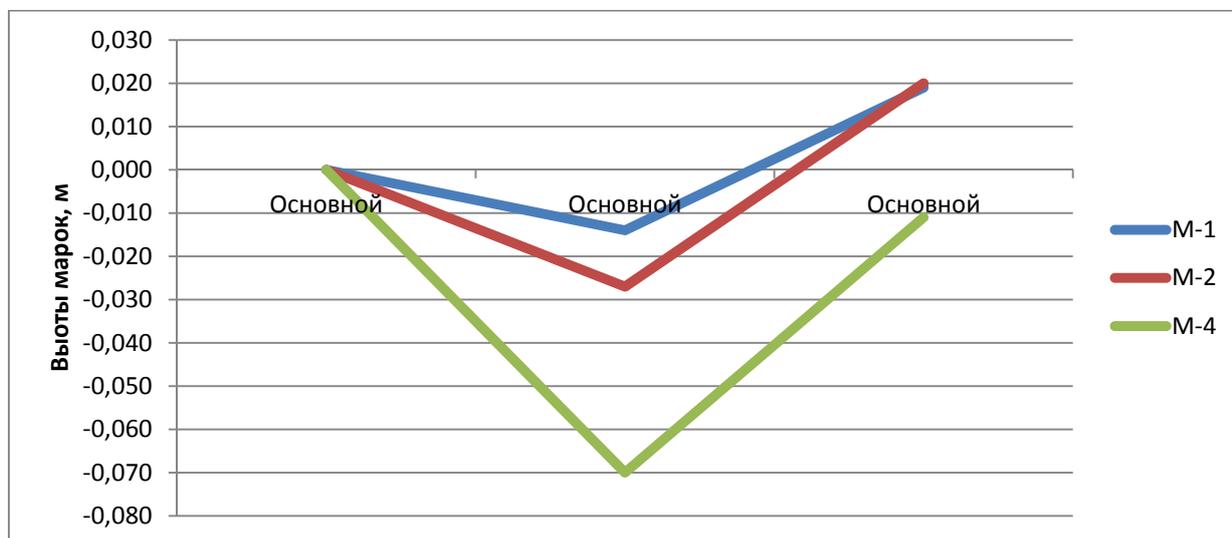


Рис. 3. Изменение высот деформационных марок в трех циклах измерений

Данные выводы подтверждают основную цель эксперимента – проведение геодезического мониторинга морской стационарной платформы ПА-Б возможно без использования исходной сети береговых опорных реперов, с опорой только на сеть станций IGS, что существенно снижает трудозатраты при проведении данного вида мониторинга.

Перспективным направлением ГНСС-технологий является точный метод точечного позиционирования (Precise Point Positioning, PPP), не требующий наличия базовых станций [16, 17]. В дальнейшем предполагается протестировать этот метод для мониторинга морских платформ. Кроме того, предлагается заменить разовые цикловые ГНСС-измерения на деформационных марках непрерывными с автоматизированной обработкой методом PPP.

*Авторы выражают благодарность специалистам отдела геоматики «Сахалин Энерджи» за предоставленные данные для анализа.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмеджанов Т. К., Ыскак А. С. Освоение шельфовых месторождений : учеб. пособие. – Алматы : КазНТУ, 2008. – 259 с.
2. Бреббик К., Уокер С. Динамика морских сооружений. – Л. : Судостроение, 1983.
3. Горбунов О. Н., Машкова-Хоркина С. А. Автоматизированный мониторинг технического состояния морских буровых платформ // Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 2. – С. 25–28.

4. Кафтан В. И., Сидоров В. А., Устинов А. В. Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // Вулканология и сейсмология. – 2017. – № 3. – С. 50–58.
5. Мазуров Б. Т., Зарзура Ф. Х., Ахмед С. Х. Алгоритм определения прогнозной модели динамики вантовых мостов по данным ГНСС-мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 174–178.
6. Устинов А. В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 6. – С. 39–43.
7. Dokukin P. A., Ustinov A. V. Positioning and application // Науки о земле. – 2015. – № 3. – С. 53–62.
8. Процедура по контролю местоположения морских объектов «Сахалин Энерджи». – 2010. – 29 с.
9. Trimble Business Center [Электронный ресурс]. – Загл. с экрана. – Режим доступа: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-business-center>.
10. International GNSS Service [Электронный ресурс]. – Загл. с экрана. – Режим доступа: <http://www.igs.org/>.
11. International Terrestrial Reference Frame ITRF [Электронный ресурс]. – Загл. с экрана. – Режим доступа: <http://itrf.ign.fr/>.
12. Антонович К. М., Струков А. А. Сравнение результатов линейных измерений, выполненных спутниковыми и традиционными методами геодезии // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. – С. 38–42.
13. Антонович К. М., Косарев Н. С. Использование геометрической дальности для контроля ГНСС-измерений // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 2. – С. 246–251.
14. Антонович К. М., Косарев Н. С. Метод контроля кодовых и фазовых псевдодальностей в пространстве координат // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2-1. – С. 11–15.
15. AUSPOS – Online GPS Processing Service [Электронный ресурс]. – Загл. с экрана. – Режим доступа: <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>.
16. Антонович К. М., Липатников Л. А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (Precise Point Positioning) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № S4. – С. 44–47.
17. GNSS analysis and positioning software [Электронный ресурс]. – Загл. с экрана. – Режим доступа: <http://gaps.gge.unb.ca/>.

© А. В. Давыдов, Е. Г. Гиенко, 2019