

А. К. Коваленко¹, С. А. Тесленок², Л. Г. Калашникова³, О. Ф. Богдашкина⁴,
П. С. Дмитриев⁵, А. А. Скурихин⁶, И. А. Фомин⁷

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ

АННОТАЦИЯ

В представленной работе приводится опыт совместного применения методов позиционирования высокой точности и стандартных программ постобработки для обеспечения геодезического сопровождения аэрофотогеодезических работ в процессе осуществления инженерных изысканий в нефтегазовом секторе для определения координат и высот контрольных точек на примере протяженного линейного сооружения, расположенного в сложных физико-географических условиях в районе Байкало-Амурской магистрали. Для решения задачи уточнения стандартной модели геоида на основе значений нормальных высот исходных пунктов с использованием геоинформационных технологий в ГИС с открытым объектным кодом QGIS была создана локальная пространственная геоинформационная модель поправок — модель поверхности разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов, полученная в системах координат объекта работ для всего участка. Анализ результатов работ показал, что современные ГИС с их математическим аппаратом и развитые геоинформационные технологии позволяют создавать локальные модели геоидов, полностью отвечающие особенностям территории производства работ. Они необходимы, поскольку в используемых программах постобработки заложена стандартная модель геоида, не учитывающая локальные факторы изменения геоида для конкретных территорий. Применение предлагаемого в статье метода позволяет значительно упростить процессы логистики при выполнении геодезических работ, одновременно не снижая их точности. На всех этапах произведенных работ были задействованы возможности и применен инструментарий современных

¹ ГУП «Леноблинвентаризация», Невский пр-т, д. 113/4, Санкт-Петербург, Россия, 191024,
e-mail: alex_kov@mail.ru

² Югорский государственный университет, Высшая экологическая школа, ул. Чехова, д. 16, Ханты-Мансийск, Россия, 628012, *e-mail: teslserg@mail.ru*

³ Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,
e-mail: lar_ka73@mail.ru

⁴ Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Институт геоинформационных технологий и географии, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,
e-mail: olga.fara@mail.ru

⁵ Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, факультет математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 86, Петропавловск, Казахстан, 150000,
e-mail: dmitriev_pavel@mail.ru

⁶ Югорский государственный университет, Высшая экологическая школа, лаборатория изучения пространственно-временной изменчивости углеродного баланса лесных и болотных экосистем средней тайги Западной Сибири, ул. Чехова, д. 16, Ханты-Мансийск, Россия, 628012, *e-mail: a.skurikhin98@mail.ru*

⁷ Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, факультет математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 86, Петропавловск, Казахстан, 150000, *e-mail: iafomin@mail.ru*

геоинформационных систем и технологий, позволяющие эффективно сопоставлять данные инженерных изысканий и оценивать точность выполнения топографо-геодезических работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: позиционирование высокой точности, аэрофотосъемочные работы, беспилотные летательные аппараты, инженерные изыскания, QGIS

Aleksandr K. Kovalenko¹, Sergey A. Teslenok², Larisa G. Kalashnikova³, Olga F. Bogdashkina⁴, Pavel S. Dmitriev⁵, Aleksandr A. Skurikhin⁶, Ivan A. Fomin⁷

APPLICATION OF THE PRECISE POINT POSITIONING METHOD FOR GEODETIC SUPPORT OF AERIAL PHOTOGRAPHY DURING ENGINEERING SURVEYS

ABSTRACT

This work presents experience in the combined use of high-precision positioning methods and standard post-processing programs. This is necessary to provide geodetic support for aerial photo-geodetic work during engineering surveys in the oil and gas sector — to determine the coordinates and heights of control points using the example of an extended linear structure located in difficult physical and geographical conditions in the area of the Baikal-Amur Mainline. To solve the problem of refining the standard geoid model, based on the values of the normal heights of the starting points, using geoinformation technologies in GIS with open object code QGIS, a local spatial geoinformation correction model was created. This is a model of the surface of the difference between the normal and ellipsoidal heights of the starting points, obtained in the coordinate systems of the work object for the entire site. Analysis of the results of the work showed that modern GIS with their mathematical apparatus and geographic information technologies make it possible to create local geoid models that fully correspond to the characteristics of the work area. They are necessary because the post-processing programs used contain a standard geoid model that does not take into account local factors of geoid change for specific territories. The use of the proposed method can significantly simplify logistics processes when performing geodetic work, without reducing their accuracy at the same time. At all stages of the work, the capabilities and tools of modern geographic information systems and technologies were used, allowing for the effective comparison of engineering survey data and assessment of the accuracy of topographic and geodetic work.

KEYWORDS: precise point positioning, aerial photography, unmanned aerial vehicles, engineering surveys, QGIS

¹ SUE “Lenoblinventarization”, 113/4, Nevsky ave., St. Petersburg, 191024, Russia,
e-mail: alex_kov@mail.ru

² Yugra State University, Higher School of Ecology, 16, Chekhova str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russia,
e-mail: teslserg@mail.ru

³ National Research Mordovian State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail: lar_ka73@mail.ru*

⁴ National Research Mordovian State University, Institute of Geoinformation Technologies and Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail: olga.fara@mail.ru*

⁵ Kozybayev University, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, 86, Pushkina str., Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan, *e-mail: dmitriev_pavel@mail.ru*

⁶ Yugra State University, Higher School of Ecology, Laboratory for studying the spatial and temporal variability of the carbon balance of forest and swamp ecosystems of the middle taiga of Western Siberia, 16, Chekhova str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russia, *e-mail: a.skurikhin98@mail.ru*

⁷ Kozybayev University, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, 86, Pushkina str., Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan, *e-mail: dmitriev_pavel@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в геодезической отрасли происходят существенные качественные изменения, в первую очередь связанные с использованием роботизированных систем. Прежде всего, это дистанционное зондирование [Шовенгердт, 2013], глобальные навигационные спутниковые системы¹ (ГНСС) [Яндров, 2004; Антонович, 2006; Дударев, 2010; Манухов и др., 2011; Соловьев, 2014; Варфоломеев и др., 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015] и беспилотные летательные аппараты (БПЛА, беспилотники) или дроны [Веремеенко и др., 2009; Алексеенко и др., 2014, 2015; Стешин, 2016, 2017; Овчинникова, Медведков, 2019; Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022], а также соответствующие техника, приборный парк, программное обеспечение и технологии [Дементьев, 2008; Тесленок, Романов, 2014; Ямбаев, 2012, 2020]. Беспилотные аппараты в настоящее время получают все более широкое распространение в геодезии, топографии, картографии, географии [Курошев, 1999; Дементьев, 2008; Алексеенко и др., 2014, 2015; Стешин, 2016; Пашков и др., 2021], являясь активно используемыми для создания и обновления планово-картографических материалов, а также применяемыми для получения цифровых моделей рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ) [Стешин, 2017; Овчинникова, Медведков, 2019; Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022].

Технология съемки земной поверхности с применением БПЛА является на сегодняшний день наиболее распространенной и имеет ряд преимуществ перед наземными методами съемки. В ряде случаев она способна их заменить, главным образом при создании и обновлении крупномасштабных картографических материалов, особенно для территорий больших размеров, находящихся в труднодоступных районах со сложными ландшафтными условиями (прежде всего — со сложным рельефом и условиями проходимости местности). Использование дронов с установленной на них цифровой фотографической аппаратурой высокого и сверхвысокого пространственного разрешения дает возможность осуществлять аэрофотографическую съемку территории в необходимом месте, в определенное время и на точной высоте. Аэрофотоснимки, получаемые как результат выполнения подобной съемки, отличаются высоким качеством и наличием необходимого перекрытия. Центры фотографирования, имеющие привязку, полученную с использованием геодезического оборудования ГНСС, позволяют произвести обработку материалов с использованием специализированного программного обеспечения за минимально возможное время и с максимально доступной точностью.

Главными результатами обработки полученных в результате съемки с БПЛА аэрофотоснимков являются следующие материалы: ортофотоплан и ЦМР [Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022]. Их точность напрямую определяется высотой, с которой осуществляется фотографирование, особенностями погодных условий и показателями разрешения используемой съемочной аппаратуры. В современных условиях точность получаемых ортофотопланов и ЦМР удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ним нормативными документами в области геодезии, топографии и кадастра, однако требует процедур оценки их точности и достоверности. Подобные процедуры выполняются с использованием названных выше опорных и контрольных точек планово-высотной подготовки аэрофотоснимков. При этом руководствуются как соображениями оптимального расположения этих точек на участке работ (например, на разных по высоте элементах рельефа), так и выбором наиболее оптимального метода определения координат и высот этих точек. Немаловажен также и расчет параметров перехода из стандартной системы геодезических параметров Земли WGS 84 в систему геоцентрических координат в систему координат и высот локального объекта работ.

¹ ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.

В основном пространственные координаты и высоты контрольных точек определяют спутниковыми методами с использованием ГНСС-оборудования в режиме реального времени (*direct geo-referencing* — прямое геопозиционирование, в т. ч. на базе интегрированной инерциальной и спутниковой систем GPS/IMU) [Манухов и др., 2011; Ries et al., 2002], съемкой в режиме кинематики реального времени, кинематическим позиционированием в режиме реального времени (Real Time Kinematic, RTK-съемка) [Варфоломеев и др., 2014, 2015; Тесленок, Романов, 2014; Варфоломеев, Чудайкина, 2015] или в режиме статики [Манухов и др., 2011; Соловьев, 2014; Тесленок, Романов, 2014] с последующей обработкой и уравниванием в программах постобработки [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Соловьев, 2014]. Режим RTK требует наличия на участках работ GSM-связи и соответствующей логистики, необходимых для обеспечения согласованности измерений на исходных пунктах и на контрольных точках, что в районах со сложными физико-географическими условиями не всегда возможно и достижимо.

В случае использования относительного метода спутниковых определений поправки вносятся в параметры орбит и бортовых часов спутников ГНСС, а не в результаты измерений фаз несущих радиосигналов. Таким образом, применение относительных методов коррекции нуждается в дополнительном привлечении работающих в непосредственной близости базовых станций.

Выходом в указанных условиях может стать использование метода позиционирования высокой точности, или PPP (Precise Point Positioning) и стандартных программ постобработки [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Соловьев, 2014]. При применении метода PPP, в отличие от метода кинематики реального времени [Варфоломеев и др., 2014, 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015], не нужен доступ к данным наблюдений базовых станций, располагающихся в непосредственной близости от пользователя. Необходимые данные поправок, без использования которых невозможно применение метода высокоточного позиционирования, реализуются службой точного позиционирования [Веремеенко и др., 2009; Ямбаев, 2012; Федотов, 2023].

В целом, комплекс аэрофотосъемочных работ с использованием современных технологий и оборудования беспилотных систем включает три основных этапа:

- подготовка наземного обоснования (с закреплением на местности и координированием опорных точек — опознавательных знаков и контрольных точек);
- подготовка и производство летно-съемочных работ с использованием дронов;
- фотограмметрическая обработка полученных по результатам съемки аэрофотоснимков с использованием соответствующего специализированного программного обеспечения.

Общее число используемых опознаков и контрольных точек на снимаемой территории определяется размером области работы, ее физико-географическими особенностями и требуемой точностью.

При планировании, организации и реализации комплекса инженерно-геодезических изысканий [Бойко, 2003; Дементьев, 2008; Соловьев, 2014; Кочетова, 2017; Авакян, 2021; Федотов, 2023] традиционно особое внимание уделяется точности получаемых материалов. Ортофотопланы, которые могут быть получены по результатам аэрофотосъемки с БПЛА [Алексеев и др., 2014; Стешин, 2017; Пашков и др., 2021; Кустов и др., 2022], зачастую имеют точность, сопоставимую с наземной съемкой, и далее могут быть использованы для создания крупномасштабных топографических планов до м-ба 1: 500^{1,2}

¹ ГКИНП 02-118. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1: 5 000, 1: 2 000, 1: 1 000, 1: 500. М.: ГУГК, 1970. 15 с.

² ГКИНП 02-033-82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1: 5 000, 1: 2 000, 1: 1 000 и 1: 500. М.: Недра, 1982. 152 с.

включительно [Чинаев и др., 2020]. При этом на конечную точность получаемых картографических материалов способен влиять комплекс факторов, прежде всего таких, как:

- разрешающая способность съемочной системы дистанционного зондирования: пространственное, спектральное, радиометрическое, временное разрешение;
- качество выполнения аэрофотосъемочных работ;
- число опорных точек, в нашем случае представленных планово-высотными опознавательными знаками (опознаками);
- специфика территории, на которой осуществляется съемка (ее физико-географические условия и, в первую очередь, такие ландшафтные компоненты, как рельеф и растительность, а точнее — степень закрытости местности растительностью и показатели пересеченности и сложности рельефа);
- качество фотограмметрической обработки результатов съемки.

Точность отображения плановых контуров и высот на топографических планах определяется и лимитируется достаточно высокими требованиями разнообразных нормативных документов, прежде всего таких, как соответствующие стандарты¹ и инструкции² [Кочетова, 2017; Мусихин, Зубкова, 2018; Авакян, 2021; Федотов, 2023]. Соответственно, в современных условиях значительный практический интерес представляют создание разнообразных картографических изображений и оценка точности высот ЦМР и ЦММ, создаваемых на основе и по материалам аэрофотосъемки, осуществляемой с применением БПЛА (дронкартография [Штешин, 2016; Tudor, 2015]) и с использованием современных компьютерных методов фотограмметрической обработки полученных снимков.

В связи с вышесказанным целью исследования явился анализ результатов практического опыта определения координат и высот контрольных точек в процессе аэрофотогеодезических работ при осуществлении инженерных изысканий на основе использования метода позиционирования высокой точности, интегрированного со стандартными программами постобработки, в районах со сложными физико-географическими условиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже отмечалось ранее, пространственные координаты и высоты контрольных точек в основном определяют спутниковыми методами с использованием ГНСС-оборудования в режиме реального времени, требующем наличия на участках работ GSM-связи и соответствующей логистики для обеспечения согласованности измерений на исходных пунктах и на контрольных точках. Выполнение этого требования в условиях районов со сложной физико-географической ситуацией не всегда возможно и достижимо.

В связи с этим, в данном исследовании представлены результаты практического опыта определения координат и высот контрольных точек на основе использования метода позиционирования высокой точности, интегрированного со стандартными программами постобработки. Он был получен в процессе осуществления инженерных изысканий в нефтегазовом секторе на примере протяженного линейного сооружения, расположенного в сложных физико-географических условиях в районе Байкало-Амурской магистрали. Был использован метод высокоточного (с сантиметровой точностью) определения координат и высот точек местности с использованием технологий и соответствующего оборудования ГНСС посредством получения поправок к эфемеридам орбит и бортовым часам всех видимых спутников от сетевого источника поправок [Антонович, 2006; Манухов и др.,

¹ ГОСТ Р 59562-2021. Съемка аэрофототопографическая. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2021. 90 с.

² СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. М., 1998. 92 с.

2011]. Суть данного метода заключается в высокоточном местоопределении в абсолютном режиме, что отличает его от относительного метода спутниковых определений [Антонович, 2006; Манухов и др., 2011; Ямбаев, 2012; Соловьев, 2014].

В соответствии с первым этапом аэрофотосъемочных работ на основе современных технологий и оборудования беспилотных систем была выполнена подготовка наземного обоснования. Оповестительные знаки и контрольные точки были закреплены на местности и координированы (рис. 1) с использованием оборудования ГНСС методом спутниковых наблюдений [Антонович, 2006; Манухов, 2011; Соловьев, 2014; Авакян, 2021].



Рис. 1. Процесс координирования оповестительного знака

Fig. 1. The process of coordinating the identification mark

В процессе использования метода PPP в условиях труднодоступной местности и при отсутствии соответствующей логистики конкретного района Байкало-Амурской магистрали были определены его важнейшие преимущества, заключающиеся в следующих аспектах, обеспечивающих:

- возможности использования только одного ГНСС-приемника;
- более значительную согласованность позиционирования;
- существенное уменьшение финансовых и временных затрат;
- упрощение оперативной логистики при организации и выполнении полевых работ.

Вместе с тем нельзя не отметить и некоторые выявленные недостатки позиционирования высокой точности (по сравнению с традиционными методами ГНСС), главными из которых является необходимость:

- несколько большей вычислительной мощности компьютерной техники, используемой для обработки получаемых данных;
- обеспечения постоянства внешнего потока коррекции эфемерид;
- некоторой временной задержки для достижения достаточной точности измерений.

Еще одним существенным обнаруженным на практике недостатком метода PPP является тот факт, что высокоточные координаты и высоты контрольных точек представ-

лены во всемирной геодезической системе координат WGS 84, что в дальнейшем, как было указано ранее, требует нахождения точных локальных параметров преобразования и перехода от системы координат и высот WGS 84 к местным системам координат и преобразования эллипсоидальных высот WGS 84 в систему нормальных высот, в которых должны быть представлены результаты геодезических работ. Подобные вопросы преобразования координат рассмотрены в ряде работ¹ [Базлов и др., 1996; Залуцкий, 2000; Бойко, 2003; Яндров, 2004; Дударев, 2010; Курошев, Харунжий, 2012; Мусихин, Зубкова, 2018; Онрицова, 2018; Vermeille, 2002; Polo-Blanco, González-Vega, 2009; Reit, 2009], в частности — представлен алгоритм и технологическая схема преобразования координат с использованием фирменных программ постобработки GPS-измерений [Залуцкий, 2000].

Для оценки возможности использования метода PPP в процессе привязки опознаков в районах со сложными физико-географическими условиями в нашем исследовании использованы результаты ГНСС-наблюдений на непрерывно действующей геодезической сети в составе десяти пунктов (рис. 2). При обработке файлов этой сети методом позиционирования высокой (сантиметрового уровня) точности с использованием возможностей службы коррекции сервиса Trimble GNSS Correction Services^{2,3} на такие же даты были получены значения приращений координат векторных базовых линий и их средних квадратических отклонений. Помимо этого, значения приращений координат базовых линий были рассчитаны по двойным фазовым разностям в процессе обработки с использованием программного обеспечения Topcon Tools^{4,5}. И в том, и в другом случае были использованы те же самые файлы восьмичасовых наблюдений.

С целью проведения сравнения с методом относительных наблюдений, на основе рассчитанных координат пунктов (X , Y , Z) и их средних квадратических отклонений (mX , mY , mZ), полученных методом PPP в международной общеземной системе отсчета International Terrestrial Reference Frame ITRF2014 (WGS 84), были определены приращения координат базовых линий (dX , dY , dZ) и их средних квадратических отклонений (mdX , mdY , mdZ).

Определение было выполнено сравнением разности координат для каждой базовой линии, согласно схеме, полученной при обработке этих же наблюдений в программном обеспечении Topcon Tools для случая относительных наблюдений. Разделение горизонтальных и вертикальных компонент в топоцентрической системе координат (E , N , U) также было выполнено с использованием программного обеспечения Topcon Tools. При анализе разностей приращений координат, выполненном в Microsoft Excel, для непрерывно действующей ГНСС-сети, схема которой была приведена ранее на рис. 2 (в составе десяти пунктов и 45 векторов — базовых линий ГНСС-сети), для каждой из линий были сравнены показатели, полученные методами позиционирования высокой точности и статистическим (рис. 3). Полный объем выборки составил 135 разностей приращений координат.

¹ Geodetic datum conversions. Toitū Te Whenua. Land Information New Zealand. Электронный ресурс: <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-system/coordinate-conversion/geodetic-datum-conversions/equations-used-datum> (дата обращения 04.01.2024)

² GNSS corrections. Trimble Catalyst Help Portal. Электронный ресурс: <https://help.trimblegeospatial.com/Catalyst/Corrections.htm> (дата обращения 04.01.2024)

³ Trimble Positioning Services. Электронный ресурс: <https://positioningservices.trimble.com/en> (дата обращения 04.01.2024)

⁴ Topcon Tools 8.2. Электронный ресурс: <https://topcon-tools.software.informer.com/> (дата обращения 04.01.2024)

⁵ Topcon Tools User Manual. Электронный ресурс: <https://manualmachine.com/topcon/tools/8626126-user-manual/> (дата обращения 04.01.2024)

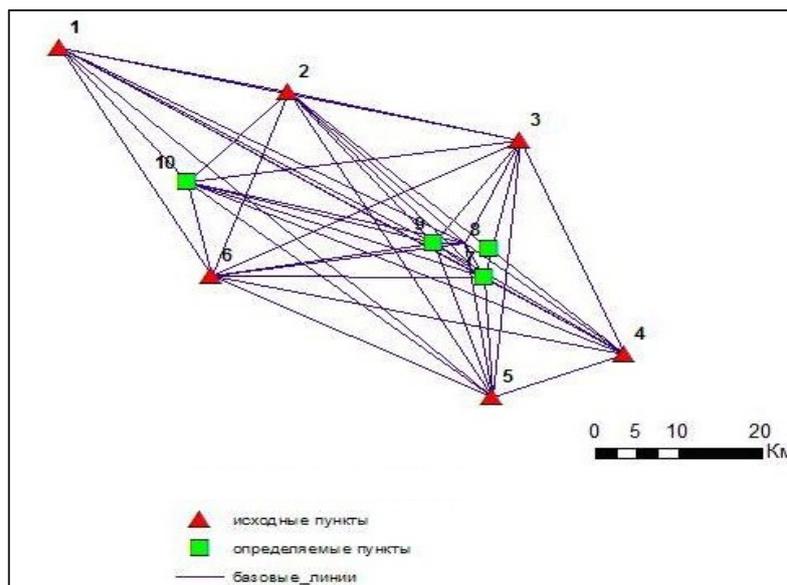


Рис. 2. Схема использованной ГНСС-сети
Fig. 2. Diagram of the GNSS network used

С целью обеспечения большей наглядности на рис. 4 и 5 в виде диаграмм визуализированы результаты выполненных работ по оценке показателей величин разностей приращений векторов, полученных методом PPP и методом статических измерений ГНСС-сети, в т. ч. и по абсолютным значениям. Средние полученные значения разности приращений координат составили менее 20 мм, что говорит о значительной близости и равнозначности полученных результатов.

Следующим этапом оценки точности метода стало вычисление координат четырех определяемых контрольных пунктов (см. рис. 2, табл. 1), анализ полученных данных и сравнение их с каталожными значениями (табл. 2).

приращения координат метод PPP			приращения координат статический метод			DX(м)	DY(м)	DH(м)
9823.414	-29418.619	-15.812	9823.401	-29418.598	-15.833	0.013	-0.021	0.021
-4970.396	5887.381	-7.4	-4970.39	5887.379	-7.404	-0.006	0.002	0.004
-3192.102	-27051.795	9.987	-3192.101	-27051.766	9.994	-0.001	-0.029	-0.007
13721.297	11033.309	16.79	13721.282	11033.298	16.76	0.015	0.011	0.03
29150.007	-43934.803	-12.2	29149.976	-43934.781	-12.226	0.031	-0.022	0.026
-21573.709	6022.608	30.602	-21573.691	6022.609	30.606	-0.018	-0.001	-0.004
-206.01	3769.347	1.166	-206.014	3769.347	1.164	0.004	0	0.002
21801.67	-16612.598	14.486	21801.648	-16612.588	14.481	0.022	-0.01	0.005
-16360.765	22252.886	-8.226	-16360.75	22252.87	-8.224	-0.015	0.016	-0.002
-14793.81	35306	8.411	-14793.793	35305.981	8.431	-0.017	0.019	-0.02
-13015.516	2366.824	25.799	-13015.503	2366.828	25.825	-0.013	-0.004	-0.026
3897.883	40451.928	32.602	3897.882	40451.893	32.587	0.001	0.035	0.015
19326.593	-14516.184	3.611	19326.57	-14516.171	3.605	0.023	-0.013	0.006
-31397.123	35441.227	46.414	-31397.093	35441.212	46.435	-0.03	0.015	-0.021
-10029.424	33187.966	16.978	-10029.416	33187.947	16.999	-0.008	0.019	-0.021
11978.256	12806.021	30.297	11978.246	12806.01	30.315	0.01	0.011	-0.018
-26184.179	51671.504	7.586	-26184.157	51671.482	7.607	-0.022	0.022	-0.021
1778.294	-32939.176	17.388	1778.289	-32939.145	17.396	0.005	-0.031	-0.008
18691.693	5145.928	24.19	18691.673	5145.92	24.165	0.02	0.008	0.025
34120.403	-49822.184	-4.8	34120.369	-49822.162	-4.825	0.034	-0.022	0.025
-16603.313	135.227	38.003	-16603.3	135.229	38.009	-0.013	-0.002	-0.006
4764.386	-2118.034	8.566	4764.376	-2118.031	8.569	0.01	-0.003	-0.003

Рис. 3. Фрагмент таблицы анализа разностей приращений координат
Fig. 3. A fragment of the coordinate increment difference analysis table

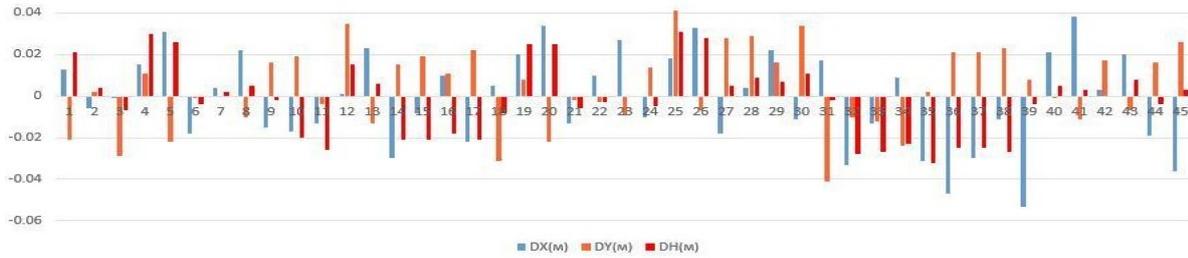


Рис. 4. Величины разностей приращений координат, полученных методами позиционирования высокой точности и статических измерений
Fig. 4. The values of the differences in the increments of coordinates obtained by Precise Point Positioning and static measurement methods

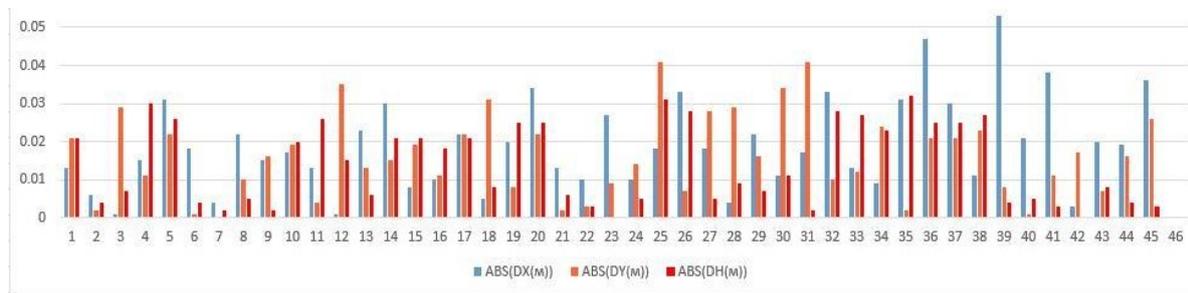


Рис. 5. Оценка абсолютных величин разности приращений координат, полученных методами позиционирования высокой точности и статических измерений
Fig. 5. Estimation of the absolute values of differences in coordinate increments obtained by Precise Point Positioning and static measurement methods

Табл. 1. Координаты определяемых контрольных пунктов
Table 1. Coordinates of the control points to be determined

№	Координаты								
	Метод PPP			Метод статических наблюдений			Каталог		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
9	9616.166	7316.086	34.265	9616.127	7316.091	34.252	9616.140	7316.101	34.228
10	9439.680	7897.468	19.301	9439.677	7897.495	19.291	9439.739	7897.492	19.287
7	4645.770	3203.468	26.142	4645.728	3203.263	26.727	4645.696	3203.464A	26.695
8	9410.156	1085.434	35.360	9410.111	1085.439	35.345	9410.104	1085.458	35.292

Табл. 2. Разность координат определяемых контрольных пунктов
Table 2. The difference in the coordinates of the control points to be determined

№	Разность полученных значений								
	PPP и метод статических наблюдений			PPP и каталог			Метод статических наблюдений и каталог		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
9	0.039	-0.005	0.013	0.026	-0.015	0.037	-0.013	-0.01	0.024
10	0.003	-0.027	0.010	-0.059	-0.024	0.014	-0.062	0.003	0.004
7	0.042	0.005	0.015	0.074	0.004	0.047	0.032	-0.001	0.032
8	0.045	-0.005	0.015	0.052	-0.024	0.058	0.007	-0.019	0.053

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из полученных результатов вычисления координат четырех контрольных пунктов, их анализа и сравнения, представленных в табл. 1 и 2, видно, что разница координат и высот каталожных значений контрольных пунктов и координат и высот этих пунктов, полученных методом PPP и методом статических наблюдений одного порядка величины. Это свидетельствует о равнозначности этих методов ГНСС-наблюдений. Статический метод требует синхронизированных по времени наблюдений на пунктах, что в сложных физико-географических условиях не всегда может быть выполнено в полном объеме. Применение же метода позиционирования высокой точности не требует синхронных наблюдений на пунктах.

Практическая реализация приведенной методики была осуществлена при выполнении инженерных изысканий в районе Байкало-Амурской магистрали. Протяженность линейного объекта изысканий, расположенного в сложных физико-географических условиях, составляла порядка 400 км.

Начальным этапом работ явилось построение каркасной ГНСС-сети методом статических измерений. Координаты исходных пунктов представлены в трех местных системах координат. За исходные взяты пункты государственной геодезической сети не ниже 2 класса точности и имеющие высоту, полученную геометрическим нивелированием не ниже 4 класса точности. На этих пунктах выполнены длительные ГНСС-наблюдения и вычислены координаты и высоты методом PPP в системе отсчета ITRF2014 (WGS 84).

Далее было выполнено уравнивание каркасной сети в программном обеспечении Topcon Tools и вычислены коэффициенты семи параметров преобразования Гельмерта [Маркузе, Welsch, 1995; Маркузе, Антипов, 2004; Курошев, Харунжий, 2012; Reit, 2009] для каждой из трех местных систем координат. На следующем этапе выполнено уравнивание каркасной сети в местных системах координат с использованием модели геоида Earth Gravitational Model EGM2008 [Cefola, Broucke, 1975; Pavlis et al., 2012; Barnes et al., 2015; Pail et al., 2018] (рис. 6).

Таким образом, была получена база данных геодезических пунктов, которая использовалась при геодезическом обеспечении аэрофотосъемочных работ и оценке точности полученных ЦММ и ЦМР. Далее была проведена оценка точности полученных ЦМР и ЦММ [Мусихин, Зубкова, 2018]. Оценка выполнялась по следующей методике. Съёмка контрольных точек выполнялась методом RTK [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015] с передачей поправок передвигшемуся приемнику по радиоканалу. По конфигурации приемника базовая станция выполнялась как свободная станция, т. е. координаты и высоты определялись с навигационной точностью. Одновременно с выполнением съёмки базовый приемник выполнял сбор результатов измерений в статическом режиме. Далее в камеральных условиях, по полученным результатам статических измерений, методом PPP вычислялись координаты свободной станции в системе WGS 84.

На следующем этапе была разработана программа, позволяющая вычислять по координатам свободной базисной станции и координатам ближайших пунктов (в системе WGS-84, X, Y, Z, mX, mY, mZ, B, L, H) компоненты приращения координат DX, DY, DZ и создавались SNAP-файлы. Данные файлы содержат данные по станциям и базовым линиям и их точностные характеристики (рис. 7).

Файлы импортировались в качестве вставки спутникового построения в проект Topcon Tools каркасной сети, выполнялось уравнивание с получением точных координат и высоты. Вычислялись и вносились соответствующие поправки в координаты и высоты точек, полученных при съёмке в режиме кинематики реального времени [Манухов и др., 2011; Варфоломеев и др., 2014, 2015; Варфоломеев, Чудайкина, 2015].

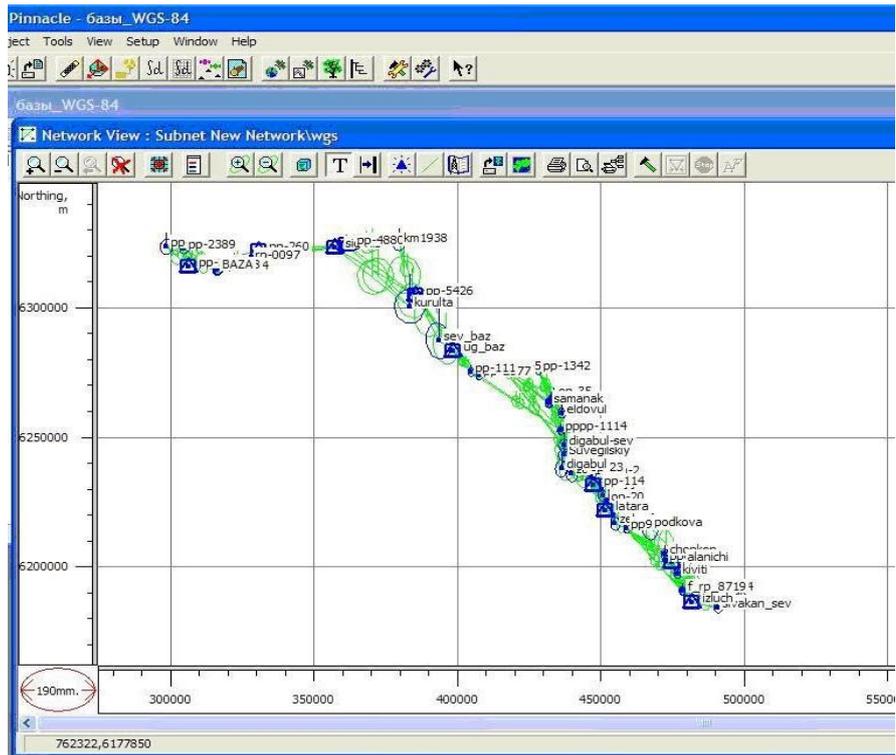


Рис. 6. Схема каркасной сети
Fig. 6. The scheme of the wireframe network

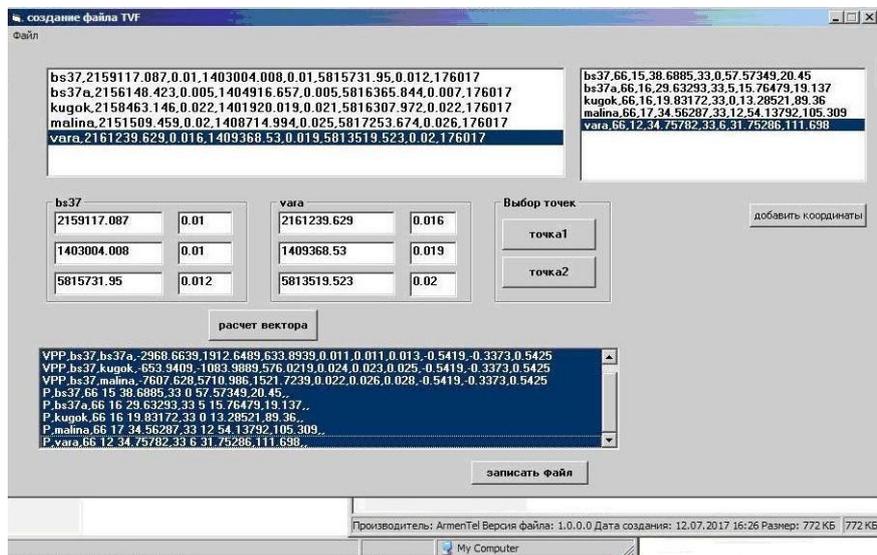


Рис. 7. Интерфейс разработанной программы
Fig. 7. The interface of the developed program

Важной характеристикой получаемых в процессе выполнения съемочных работ точек являются значения их высот в принятой системе высот (Балтийской 1977 г.). Данная нормальная система высот основана на использовании отвесной линии, проходящей через снимаемую точку. Высоты в рассматриваемом методе позиционирования высокой точности определяются относительно нормали к исходному эллипсоиду. Для вычисления необходимых поправок используют модель геоида. В работе для решения задачи уточнения

стандартной модели геоида, на основе значений нормальных высот исходных пунктов, с использованием ГИС-технологий была создана локальная пространственная геоинформационная модель поправок. Она представляет собой модель поверхности разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов (рис. 8), полученную с использованием возможностей алгебры растров.

Модель была построена в ГИС с открытым объектным кодом QGIS в системах координат объекта работ для всего участка в районе Байкало-Амурской магистрали, и данный фрагмент демонстрирует ее результаты. Анализ результатов аэрофотосъемочных работ, выполненных в процессе инженерных изысканий, а также картографической модели разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов на участке работ показал, что современные ГИС с их математическим аппаратом и технологиями позволяют создавать локальные модели геоидов, полностью отвечающие особенностям территории, на которой производятся работы. Это очень важный момент, т. к. в стандартных программах постобработки заложена стандартная модель геоида, не учитывающая локальные факторы изменения геоида для конкретных территорий.

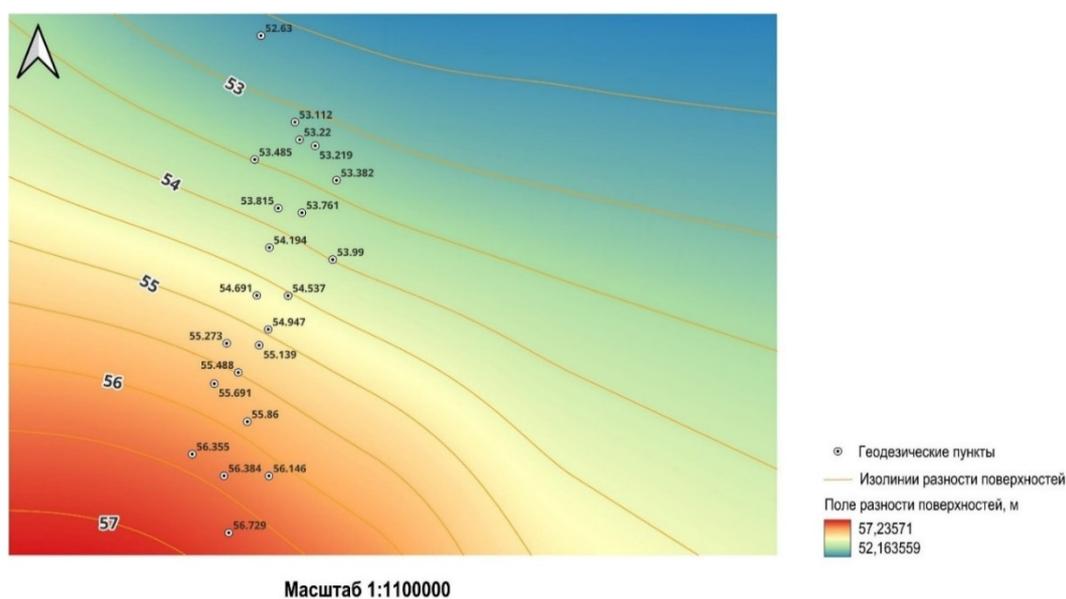


Рис. 8. Фрагмент карты разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов
Fig. 8. A fragment of the map of the difference between the normal and ellipsoidal heights of the starting points

Таким образом, применение инструментария современных ГИС и геоинформационных технологий позволяет эффективно сопоставлять данные инженерных изысканий и оценивать точность выполнения топографо-геодезических работ.

ВЫВОДЫ

В исследовании приведен опыт определения координат и высот контрольных точек с использованием метода позиционирования высокой точности и стандартных программ постобработки. Рассмотрена возможность совместного применения методов PPP и статического при обеспечении геодезического сопровождения аэрофотогеодезических работ при осуществлении инженерных изысканий в нефтегазовом секторе. Разработана и создана база данных геодезических пунктов, практически использованная для геодезического обеспече-

ния аэрофотосъемочных работ и оценки точности полученных ЦММ и ЦМР. Разработана программа, позволяющая по координатам свободной базисной станции и координатам ближайших пунктов вычислять компоненты приращения координат и создавать SNAP-файлы, содержащие данные по станциям и базовым линиям, а также их точностные характеристики.

Использование возможностей алгебры растров позволило получить локальную пространственную геоинформационную модель поправок, являющуюся моделью поверхности разности нормальных и эллипсоидальных высот исходных пунктов. Это позволяет эффективно сравнивать данные съемочных инженерных изысканий в процессе оценки точности выполняемых топографо-геодезических работ. Применение предлагаемого метода позиционирования высокой точности, интегрированного со стандартными программами постобработки, созданных локальных пространственных геоинформационных моделей геоидов, полностью соответствующих особенностям территории производства топографо-геодезических работ, а также моделей поправок позволяют в значительной степени упростить процессы логистики при организации и выполнении работ, одновременно не снижая их точности. Более того, применение ГИС-технологий позволяет на основе метода позиционирования высокой точности создавать модели локального геоида, учитывающего особенности территории, что дает возможность осуществлять эффективный контроль изыскательских работ, существенно повышая их точность и достоверность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to organize a new young researcher Laboratory in Yugra State University (Research number 1022031100003-5-1.5.1) as a part of the implementation of the National Project “Science and Universities”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян В. В.* Теория и практика инженерно-геодезических работ. Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 696 с.
- Алексеев Н. А., Курамагомедов В. М., Медведев А. А.* Тепловая съемка с беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Огарев-online, 2015. № 24. Электронный ресурс: <https://journal.mrsu.ru/arts/teplovaya-semka-s-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov-v-geograficheskikh-issledovaniyakh> (дата обращения 04.01.2024).
- Алексеев Н. А., Медведев А. А., Карпенко И. А.* Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в биогеографических исследованиях на территории заповедника Белогорье. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2014. Т. 20. С. 70–81.
- Антонович К. М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 2. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. 360 с.
- Базлов Ю. А., Герасимов А. П., Ефимов Г. Н., Насретдинов К. К.* Параметры связи систем координат. Геодезия и картография, 1996. № 8. С. 6–7.
- Бойко Е. Г.* Высшая геодезия. Ч. II. Сфероидическая геодезия. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. 144 с.

Варфоломеев А. Ф., Коваленко А. К., Коваленко Е. А., Тесленок С. А., Тесленок К. С. ГИС-технологии в проведении проектных работ с использованием режима кинематики реального времени (РТК). Картография и геодезия в современном мире: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2014. С. 216–222.

Варфоломеев А. Ф., Коваленко А. К., Коваленко Е. А., Тесленок К. С., Тесленок С. А. Геоинформационные технологии в определении зон покрытия территории поправками от постоянно действующих станций ГЛОНАСС/GPS. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2015. Т. 21. С. 522–528. DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-522-528.

Варфоломеев А. Ф., Чудайкина О. Ю. Использование РТК-режима систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС при проведении топографических работ. Огарев-online, 2015. № 4. Электронный ресурс: <http://journal.mrsu.ru/arts/ispolzovanie-rtk-rezhima-sistem-globalnogopozicionirovaniya-gps-i-glonass-pri-provedenii-topograficheskikh-rabot> (дата обращения 04.01.2024).

Веремеенко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В., Козорез Д. А., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г., Сыпало К. И., Черноморский А. И. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. 557 с.

Дементьев В. Е. Современная геодезическая техника и ее применение. М.: Академический проект, 2008. 591 с.

Дударев В. И. Преобразование основных систем координат, применяемых в космической геодезии. Гео-Сибирь, 2010. Т. 1. № 1. С. 135–144.

Залуцкий В. Т. О преобразовании координат в спутниковой технологии. Геодезия и картография, 2000. № 7. С. 17–24.

Кочетова Э. Ф., Акрицкая И. И., Тюльникова Л. Р., Гордеев А. Б. Инженерная геодезия. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2017. 158 с.

Курошев Г. Д. Геодезия и география. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 1999. 372 с.

Курошев Г. Д., Харунжий А. А. Методы трансформации геодезических и пространственных прямоугольных координат, их алгоритмы, параметры, точность. Вестник СПбГУ. Науки о Земле, 2012. № 3. С. 79–90.

Кустов М. В., Тесленок С. А., Батин Д. А. Применение материалов аэрофотосъемки для изучения рельефа агроландшафтов (на примере территории городского округа Саранск Республики Мордовия). Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2022. Т. 16. № 1. С. 76–85. DOI: 10.31161/1995-0675-2022-16-1-76-85.

Манухов В. Ф., Разумов О. С., Спиридонов А. И., Тюряхин А. С. Спутниковые методы определения координат пунктов геодезических сетей. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2011. 128 с.

Маркузе Ю. Й., Антипов А. В. Возможности улучшения алгоритма объединения спутниковых и наземных сетей. Геодезия и картография, 2004. № 4. С. 16–21.

Маркузе Ю. Й., Welsch W. M. Два алгоритма объединения наземных и спутниковых сетей. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1995. № 2. С. 45–64.

Мусихин В. В., Зубкова Ю. Д. Оценка точности создания модели местности на основе

аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). *Master's journal*, 2018. № 1. С. 44–49.

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. DOI: 10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.

Оприцова О. А. Исследование возможностей применения беспилотных авиационных систем для моделирования объектов недвижимости. *Вестник СГУГиТ*, 2018. Т. 23. № 3. С. 248–258.

Пашков С. В., Мажитова Г. З., Тесленок С. А. Картографирование агроландшафтов колочной лесостепи на основе геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Земли. *Географический вестник*, 2021. № 1(56). С. 162–172. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-162-172.

Соловьев А. Н. Применение глобальных навигационных спутниковых систем в инженерной геодезии. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. 88 с.

Стешин И. С. Перспективы развития прикладной дронокартографии. *Academy*, 2016. № 2(5). Электронный ресурс: <https://scienceproblems.ru/images/PDF/2016/2/perspektivy-razvitiya-prikladnoj-dronokartografii.pdf> (дата обращения 04.01.2024).

Стешин И. С. Технология создания трехмерной модели местности на основе данных дистанционного зондирования земли с беспилотного летательного аппарата в сервисе *Maps Made Easy*. *Научное обозрение*, 2017. № 1. Электронный ресурс: <https://srjournal.ru/2017/id31/> (дата обращения 04.01.2024).

Тесленок С. А., Романов А. В. Новые технологии в производстве топографо-геодезических работ. *Общество*, 2014. № 2(2). С. 78–81.

Урмаев М. С., Родин С. П. Определение параметров преобразования геодезических прямоугольных пространственных координат при произвольных значениях параметров. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 1998. № 4–5. С. 314.

Федотов Г. А. *Инженерная геодезия*. М.: ИНФРА-М, 2023. 479 с.

Чинаев С. С., Тесленок К. С., Тесленок С. А. Создание топографического плана рекреационного комплекса. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*, 2020. № 2(18). С. 5–15. DOI: 10.25587/SVFU.2020.18.2.007.

Шовенгердт Р. А. *Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений*. М.: Техносфера, 2013. 589 с.

Ямбаев Х. К. *Инженерно-геодезические инструменты и системы*. М.: Издательство МИИГАиК, 2012. 462 с.

Ямбаев Х. К. *Геодезическое инструментоведение*. М.: Академический Проект, 2020. 583 с.

Яндров И. А. К вопросу о преобразовании координат для применения спутниковых технологий в строительстве зданий. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2004. № 5. С. 47–58.

Barnes D., Factor J. K., Holmes S. A., Ingalls S., Presicci M. R., Beale J., Fecher T. *Earth Gravitational Model 2020*. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA 2015. P. G34A–03.

Cefola P., Broucke R. On the formulation of the gravitational potential in terms of equinoctial variables. *AIAA Pap*, 1975. No. 9. P. 1–25.

Pail R., Fecher T., Barnes D., Factor J. F., Holmes S. A., Gruber T., Zingerle P. Short note: the experimental geopotential model XGM2016. *Journal of Geodesy*, 2018. No. 92(4). P. 443–451. DOI: 10.1007/s00190-017-1070-6. S2CID 126360228.

Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012. V. 117(B04406). P. 1–38. DOI: 10.1029/2011JB008916.

Polo-Blanco I., González-Vega L. A symbolic analysis of Vermeille and Borkowski polynomials for transforming 3D Cartesian to geodetic coordinates. *Journal of Geodesy*, 2009. V. 83. P. 1071–1081. DOI: 10.1007/s00190-009-0325-2.

Reit B.-G. On geodetic transformations. Gävle, 2009. 57 p.

Ries C., Kager H., Stadler P. GPS/IMU-unterstützte Georeferenzierung der Daten flugzeuggetragener multispektraler Scanner. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 2002. Bd. 11. S. 59–66.

Tudor T. Drone mapping. *MapsMadeEasy*, 2015. Web resource: https://www.mapsmadeeasy.com/drone_mapping (accessed 04.01.2024).

Vermeille H. H. Direct Transformation from Geocentric to Geodetic Coordinates. *Journal of Geodesy*, 2002. V. 76. P. 451–454. DOI: 10.1007/s00190-002-0273-6.

REFERENCES

Alekseenko N. A., Kuramagomedov V. M., Medvedev A. A. Thermal imaging from unmanned aerial vehicles in geographical research. *Ogarev-online*, 2015. No. 24. Web resource: <https://journal.mrsu.ru/arts/teplovaya-semka-s-bespilotnyx-letatelnyx-apparatov-v-geograficheskix-issledovaniyax> (accessed 04.01.2024) (in Russian).

Alekseenko N. A., Medvedev A. A., Karpenko I. A. The experience of UAV's use for biogeographical research in “Belogorye” natural Nature Reserve. *Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”*, 2014. V. 20. P. 70–81 (in Russian).

Antonovich K. M. Use of satellite radio navigation systems in geodesy. V. 2. Moscow: FSUE “Cartgeocenter”, 2006. 360 p. (in Russian).

Avakyan V. V. Theory and practice of engineering and geodetic work. Vologda: Infra-Engineering, 2021. 696 p. (in Russian).

Barnes D., Factor J. K., Holmes S. A., Ingalls S., Presicci M. R., Beale J., Fecher T. Earth Gravitational Model 2020. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2015. P. G34A–03.

Bazlov Y. A., Gerasimov A. P., Efimov G. N., Nasretdinov K. K. Coordinate system connection parameters. *Geodesy and Cartography*, 1996. No. 8. P. 6–7 (in Russian).

Boyko E. G. Higher geodesy. Part II. Spheroidal geodesy. Moscow: Kartgeotsentr-Geodesizdat, 2003. 144 p. (in Russian).

Cefola P., Broucke R. On the formulation of the gravitational potential in terms of equinoctial variables. *AIAA Pap*, 1975. No. 9. P. 1–25.

Chinaev S. S., Teslenok K. S., Teslenok S. A. Creation of a topographic plan of the recreational complex. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series “Earth Sciences”*, 2020. No. 2(18). P. 5–15 (in Russian). DOI: 10.25587/SVFU.2020.18.2.007.

Dementiev V. E. Modern geodetic technology and its application. Moscow: Academic Project, 2008. 591 p. (in Russian).

Dudarev V. I. Transformation of the main coordinate systems used in space geodesy. *Geo-Siberia*, 2010. V. 1. No. 1. P. 135–144 (in Russian).

- Fedotov G. A.* The engineering geodesy. Moscow: INFRA-M, 2023. 479 p. (in Russian).
- Kochetova E. F., Akritskaya I. I., Tyulnikova L. R., Gordeev A. B.* The engineering geodesy. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2017. 158 p. (in Russian).
- Kuroshv G. D.* Geodesy and geography. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 1999. 372 p. (in Russian).
- Kuroshv G. D., Kharunzhiy A. A.* Methods for transforming geodetic and spatial rectangular coordinates, their algorithms, parameters, accuracy. Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences, 2012. No. 3. P. 79–90 (in Russian).
- Kustov M. V., Teslenok S. A., Batin D. A.* The use of aerial photography materials to study the relief of agricultural landscapes (using the example of the territory of the Saransk urban district of the Republic of Mordovia). Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences, 2022. V. 16. No. 1. P. 76–85 (in Russian). DOI: 10.31161/1995-0675-2022-16-1-76-85.
- Manukhov V. F., Razumov O. S., Spiridonov A. I., Tjurjahin A. S.* Satellite methods for determining the coordinates of points of geodetic networks. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2011. 128 p. (in Russian).
- Marcuse Y. Y., Antipov A. V.* Possibilities for improving the algorithm for combining satellite and terrestrial networks. Geodesy and Cartography, 2004. No. 4. P. 16–21 (in Russian).
- Marcuse Y. Y., Welsch W. M.* Two algorithms for combining terrestrial and satellite networks. Izvestiya vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”, 1995. No. 2. P. 45–64 (in Russian).
- Musikhin V. V., Zubkova Yu. D.* Accuracy evaluation of creating a locality model on the basis of aerial photography with an unmanned aerial vehicles (UAV). Master’s Journal, 2018. No. 1. P. 44–49 (in Russian).
- Opritova O. A.* Study of the possibilities of using unmanned aerial systems for modeling real estate objects. Vestnik of SSUGT, 2018. V. 23. No. 3. P. 248–258 (in Russian).
- Ovchinnikova N. G., Medvedkov D. A.* The use of unmanned aerial vehicles for land management, cadastre and urban planning. Economy and Ecology of Territorial Formations, 2019. V. 3. No. 1. P. 98–108 (in Russian). DOI: 10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.
- Pail R., Fecher T., Barnes D., Facto J. F., Holmes S. A., Gruber T., Zingerle P.* Short note: the experimental geopotential model XGM2016. Journal of Geodesy, 2018. No. 92(4). P. 443–451. DOI: 10.1007/s00190-017-1070-6. S2CID 126360228.
- Pashkov S. V., Mazhitova G. Z., Teslenok S. A.* Mapping of agricultural landscapes of outlier forest steppe based on geoinformation technologies and remote sensing of the Earth. Geographical Bulletin, 2021. No. 1(56). P. 162–172 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-162-172.
- Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2012. V. 117(B04406). P. 1–38. DOI: 10.1029/2011JB008916.
- Polo-Blanco I., González-Vega L.* A symbolic analysis of Vermeille and Borkowski polynomials for transforming 3D Cartesian to geodetic coordinates. Journal of Geodesy, 2009. V. 83. P. 1071–1081. DOI: 10.1007/s00190-009-0325-2.
- Reit B.-G.* On geodetic transformations. Gävle, 2009. 57 p.
- Ries C., Kager H., Stadler P.* GPS/IMU-supported georeferencing of data from airborne multispectral scanners. Publications of the German Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2002. V. 11. P. 59–66 (in German).

- Shovengerdt R. A.* Remote sensing. Models and methods of image processing. Moscow: Technosphaera, 2013. 589 p. (in Russian).
- Soloviev A. N.* Application of global navigation satellite systems in engineering geodesy. St. Petersburg: SPbSFTU, 2014. 88 p. (in Russian).
- Steshin I. S.* Prospects for the development of applied drone mapping. Academy, 2016. No. 2(5). Web resource: <https://scienceproblems.ru/images/PDF/2016/2/perspektivy-razvitiya-prikladnoj-dronokartografii.pdf> (accessed 04.01.2024) (in Russian).
- Steshin I. S.* Technology for creating a three-dimensional terrain model based on remote sensing data from an unmanned aerial vehicle in the Maps Made Easy service. Scientific Review, 2017. No. 1. Web resource: <https://srjournal.ru/2017/id31/> (accessed 04.01.2024) (in Russian).
- Teslenok S. A., Romanov A. V.* New technologies in the production of topographic and geodetic works. Society, 2014. No. 2(2). P. 78–81 (in Russian).
- Tudor T.* Drone mapping. MapsMadeEasy, 2015. Web resource: https://www.mapsmadeeasy.com/drone_mapping (accessed 04.01.2024).
- Urmaev M. S., Rodin S. P.* Determination of parameters for transforming geodetic rectangular spatial coordinates for arbitrary parameter values. Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”, 1998. No. 4–5. 314 p. (in Russian).
- Varfolomeev A. F., Chudaikina O. Yu.* Using the RTK mode of global positioning systems GPS and GLONASS when carrying out topographic work. Ogarev-online, 2015. No. 4. Web resource: <http://journal.mrsu.ru/arts/ispolzovanie-rtk-rezhima-sistem-globalnogo-pozicionirovaniya-gps-i-glonass-priprovedenii-topograficheskikh-rabot> (accessed 04.01.2024) (in Russian).
- Varfolomeev A. F., Kovalenko A. K., Kovalenko E. A., Teslenok S. A., Teslenok K. S.* GIS technologies in carrying out design work using real-time kinematics (RTK) mode. Cartography and geodesy in the modern world: Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2014. P. 216–222 (in Russian).
- Varfolomeev A. F., Kovalenko A. K., Kovalenko E. A., Teslenok K. S., Teslenok S. A.* GIS technology in the determination of cover zones of the territory amendments from permanent GLONASS/GPS stations. Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”, 2015. V. 21. P. 522–528 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-522-528.
- Veremeenko K. K., Zheltov S. Yu., Kim N. V., Kozorez D. A., Krasilshchikov M. N., Sebryakov G. G., Sypalo K. I., Chernomorsky A. I.* Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles. Moscow: Fizmatlit, 2009. 557 p. (in Russian).
- Vermeille H. H.* Direct Transformation from Geocentric to Geodetic Coordinates. Journal of Geodesy, 2002. V. 76. P. 451–454. DOI: 10.1007/s00190-002-0273-6.
- Yambaev H. K.* Engineering and geodetic instruments and systems. Moscow: Publishing House of MIIGAiK, 2012. 462 p. (in Russian).
- Yambaev H. K.* Geodetic instrumentation. Moscow: Academic Project, 2020. 583 p. (in Russian).
- Yandrov I. A.* On the issue of coordinate transformation for the use of satellite technologies in the construction of buildings. Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”, 2004. No. 5. P. 47–58 (in Russian).
- Zalutsky V. T.* On the transformation of coordinates in satellite technology. Geodesy and Cartography, 2000. No. 7. P. 17–24 (in Russian).