

Е. С. Коняев^{1,2}✉

Улучшенный метод астрономической привязки при помощи немагнитного теодолита

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
email: konyaevs@ipgg.sbras.ru

Аннотация. При абсолютных измерениях компонент вектора магнитной индукции при помощи немагнитного теодолита с феррозондовым датчиком на пунктах векового хода предъявляются высокие требования к точности установки теодолита над реперной точкой, особенно если расстояние до наземного ориентира составляет 100-200 метров. Но если при каждом сеансе наблюдений выполнять точное измерение направления на наземный ориентир, то требования к точности позиционирования теодолита снижаются. Точный азимут ориентира можно получить при помощи астрономических методов (например, привязка по Солнцу). Однако, визуальный метод определения азимута имеет большую среднеквадратическую погрешность (20 угловых секунд). В данной статье представлен улучшенный метод астрономической привязки при помощи цифровой видеокамеры, позволяющий добиться уменьшения ошибки в 4 раза по сравнению с визуальным методом.

Ключевые слова: астрономическая привязка, теодолит, абсолютные измерения, пункты векового хода, наземный ориентир

E. S. Konyaev^{1,2}✉

An improved method of astronomical referencing using a non-magnetic theodolite

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
email: konyaevs@ipgg.sbras.ru

Abstract. In absolute measurements of magnetic induction vector components using a non-magnetic theodolite with a flux-gate sensor at secular variation points, high requirements are imposed on the accuracy of theodolite installation above the reference point, especially if the distance to the ground reference is 100-200 meters. But if the direction to the ground object is accurately measured during each observation session, the requirements for the accuracy of theodolite positioning are reduced. The exact azimuth of a ground object can be obtained using astronomical methods (solar referencing). However, the visual method of azimuth determination has a large mean square error (20 arcseconds). This article presents an improved method of astronomical referencing using a digital video camera, which allows for an error reduction of up to 4 times compared to the visual method.

Keywords: astronomical reference, theodolite, absolute measurements, secular course points, reference ground object

Введение

При абсолютных наблюдениях элементов геомагнитного поля (склонение D , наклонение I) при помощи немагнитного теодолита с феррозондовым датчиком, необходимо знать истинный географический азимут наземного ориентира (миры) для корректной привязки измеренных компонент поля в пространстве. Как правило, наземный ориентир располагают на удалении от первых сотен до 2000 метров от пункта измерения. При большем удалении видимость ориентира сильно зависит от погодных условий, при меньшем возникают повышенные требования к точности позиционирования теодолита на пункте измерения. Например, для измерения склонения с погрешностью $\delta D = 0.1'$ при расстоянии до ориентира в 100 метров, необходимая точность установки теодолита на пункте наблюдения составляет 3 мм [1]. Данное требование легко достижимо при наблюдениях на вариационных столбах (например, в магнитных обсерваториях). Для точного позиционирования теодолита на столбе достаточно отметить на нем контур установочной площадки [2].

Однако, при выборе мест для расположения пунктов векового хода (ПВХ) геомагнитного поля, возникают некоторые ограничения. Зачастую из-за промышленных помех, развитой сети автомобильных и железных дорог, в местности с густой растительностью (например, в Западной Сибири) приходится располагать ПВХ непосредственно в лесу. В таких случаях для наблюдения наземного ориентира рекомендуется прорубать просеку [2]. Однако, незаконность вырубки, а также большие затраты труда и времени на поддержания состояния просеки вынуждают устраивать наземный ориентир на расстояниях, не превышающих 100 метров. К тому же, весьма затратно обустраивать на всех ПВХ столбы для наблюдения, поэтому зачастую абсолютные наблюдения при помощи теодолита проводятся на немагнитной треноге, располагаемой над реперной точкой. В этом случае установить теодолит точно над точкой становится гораздо сложнее, часто возникает погрешность более 1 см. Поэтому появляется необходимость при каждом сеансе измерений с высокой точностью измерять азимут наземного ориентира.

Для определения азимутов наземных ориентиров используют следующие методы: астрономическая привязка, ГНСС и гиротеодолитные измерения. Гиротеодолитные измерения позволяют получить азимут с точностью 15 - 30 угловых секунд, а аппаратура имеет высокую стоимость. При использовании ГНСС можно добиться точности определения азимута в $2''$, однако, продолжительность одного сеанса измерения составляет несколько часов [3]. Астрономическая привязка может осуществляться как визуальными методами [2], так и при помощи цифровых камер. Обычно визуальные методы имеют погрешность определения азимута в первые десятки угловых секунд. Для достижения точности в первые угловые секунды (определение по Полярной звезде) необходимы продолжительные и трудозатратные наблюдения, которые могут провести только высококвалифицированные наблюдатели [3]. Использование электронных тахеометров с цифровой фотокамерой позволяют заметно упростить астрономический метод

привязки и исключить влияние человеческого фактора, при этом достигнув высокой точности (порядка 1-2'') [4].

Для абсолютных измерений полного вектора магнитной индукции применяются немагнитные теодолиты, не имеющие встроенных фотокамер. Поэтому возникает необходимость поиска метода астрономической привязки повышенной точности при помощи немагнитного теодолита.

Методы и материалы

В рамках данной статьи была произведена астрономическая привязка методом измерения горизонтального направления на Солнце. Данный метод имеет ряд преимуществ, а именно: возможность работы в дневное время, отсутствие необходимости введения поправок за атмосферную рефракцию (например, как в методе определения азимута по наблюдениям Солнца на равных высотах), относительная простота взятия отсчетов и обработки полученных данных.

Рассмотрим две схемы измерения горизонтальных направлений на Солнце.

1) Оператор наводящим винтом горизонтального круга приближает вертикальную нить сетки зрительной трубы к изображению диска Солнца со стороны видимого движения (правый край). В момент касания диска Солнца вертикальной нити зрительной трубы наблюдатель подает помощнику команду «Есть!». Помощник фиксирует время команды и отсчет по горизонтальному кругу в журнале наблюдений. Сохраняя неподвижность алидадной части теодолита, аналогичным образом фиксируется время касания противоположного края диска. Время прохождения вычисляется как среднее из двух отсчетов [2].

2) Второй метод подразумевает визирование только по одному краю Солнца. Для этого дополнительно необходимо знать высоту Солнца z в момент наблюдения. Затем ввести поправку за видимый радиус Солнца:

$$L_{\odot} = L - R_{\odot} \cos(z), \quad (1)$$

где $L_{\odot}$ - отсчет, приведенный к центру Солнца, L – отчет по левому краю, $R_{\odot}$ - видимый радиус Солнца, z – высота Солнца над горизонтом.

Второй метод был использован в данной работе, поскольку позволяет проводить наблюдения в разрывах облаков, а также экономит время.

Точность подобных наблюдений напрямую зависит от опытности наблюдателя и его помощника. Для избавления от ошибок, вызванных человеческим фактором, было принято решение фиксировать моменты касания вертикальной нити с краем диска Солнца и горизонтальный отсчет при помощи цифровой камеры. В работе использовался теодолит 3Т2КП (рисунок 1). Технические характеристики теодолита и камеры представлены в таблице 1. Связка зрительной трубы теодолита и камеры позволили получить угловое разрешение около 4''/пиксель.

Для позиционирования камеры перед окуляром зрительной трубы и окуляром микроскопа было изготовлено специальное устройство, позволяющее снимать отсчеты через окуляр микроскопа. На рис. 2 показан вид солнечного диска в зрительную трубу и вид в микроскоп теодолита, полученные при помощи камеры.

Все наблюдения Солнца проводились при помощи апертурного солнечного фильтра.



Рис. 1. Теодолит 3Т2КП

Таблица 1

Технические характеристики теодолита 3Т2КП и использованной видеокамеры.

Характеристики теодолита	
Среднеквадратическая погрешность измерения горизонтального угла	2"
Увеличение зрительной трубы	30х
Поле зрения зрительной трубы	1°35'
Наружный диаметр оправы объектива	48мм
Характеристики видеокамеры	
Разрешение матрицы	1920*1080
Угол обзора	78°
Угловое разрешение	2.2'
Частота кадров видео	25

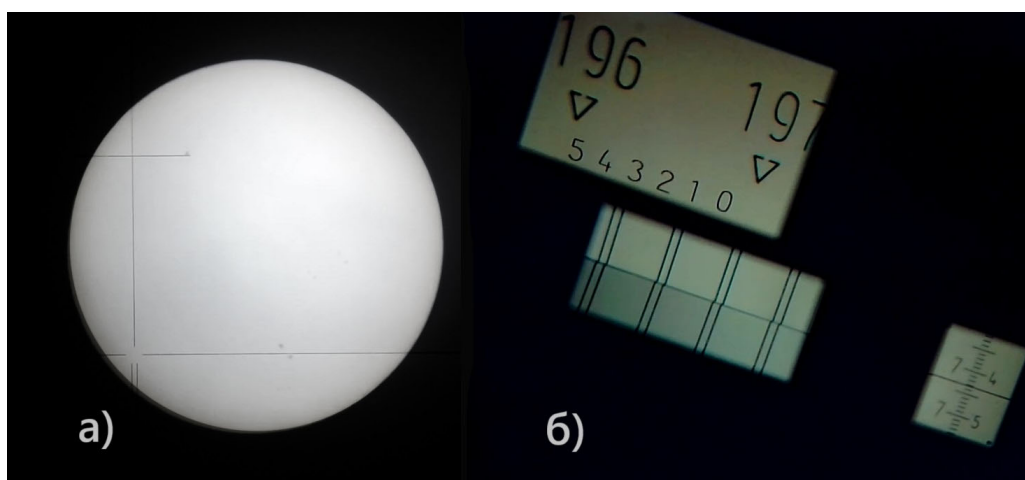


Рис. 2. Вид в зрительную трубу (а) и микроскоп (б) теодолита 3Т2КП.

Результаты

Эксперимент проводился 2.04.2025 и 9.04.2025. Горизонтальные отсчеты на Солнце выполнялись по левому краю с приведением к центру диска. В первый день выполнялись визуальные наблюдения с ассистентом, во второй день наблюдения выполнялись новым методом с фиксацией моментов прохождения изображения диска Солнца цифровой видеокамерой.

Для оценки точности методов были рассчитаны разности отсчетов горизонтального круга теодолита и реального азимута Солнца в момент измерения, полученные с помощью программы Stellarium. Результаты представлены в табл.2.

Таблица 2

Оценка точности методов астрономической привязки

Дата, время	Метод	Число отсчетов	СКО разности, угл. сек.
2.04.2025 14:30	Визуальный	10	21.6"
9.04.2025 17:40	Цифровой	14	5.1"

Заключение

Новый метод астрономической привязки по Солнцу при помощи цифровой камеры позволил снизить среднеквадратическую ошибку в серии измерений примерно в 4 раза. Это стало возможным благодаря более точной фиксации времени касания вертикальной нити зрительной трубы теодолита краем изображения диска Солнца. При использовании визуального метода привязки результат сильно зависит от опыта наблюдателей, а погрешность определения может превышать 20 угловых секунд.

Новый метод привязки имеет ряд преимуществ: удобен в использовании, точность привязки мало зависит от опытности операторов, имеет повышенную точность, нет необходимости использовать дополнительные инструменты (средства ГНСС, гиротеодолиты, электронные тахеометры).

К недостаткам метода можно отнести зависимость от погоды, что является характерной особенностью всех астрономических методов. В случае отсутствия возможности наблюдать астрономические объекты, а теодолит нельзя установить точно над реперным знаком, то необходимо измерить и записать в журнал наблюдения элементы центровки: расстояние от проекции центра теодолита до центра знака и угол между направлением на точку проекции и направлением на наземный ориентир для введения поправки за неточность установки теодолита на точке [2].

В дальнейшем автором статьи планируется проведение экспериментов с привязкой по другим астрономическим объектам: Луна, яркие планеты, звезды. Также для повышения точности взятия горизонтальных отсчетов до уровня погрешности теодолита (2") необходимо подобрать камеру с большим разрешением. Для обоснования применимости данного метода в полевых условиях пла-

нируется проведение эксперимента по многократной привязке наземного ориентира.

Автор выражает благодарность инженеру лаборатории динамических проблем сейсмики Белоусову Андрею за помощь в изготовлении устройства для позиционирования камеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нечаев, С. А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений / под ред. Жан Л. Рассон. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2006. 92 с.
2. Пандул И.С. Астрономические определения по Солнцу для географов, геологов и топографов. Москва: Недра, 1983. 128 с.
3. Кафтан, В. И., Р. И. Красноперов. Геодезические наблюдения на геомагнитных обсерваториях // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 1. С. 123-129.
4. Луповка, В. А., А. А. Брагин. Определение астрономического азимута с помощью электронного тахеометра с цифровой фотокамерой // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 3. С. 51-58.

© Е. С. Коняев, 2025