

УДК 528.422 (094.7)

Исследование влияния рефракции на результаты нивелирования цифровыми нивелирами

© ¹ Уставич Г. А., ² Соболева Е. Л., ³ Рябов Н. М., ⁴ Сальников В. Г., 2011¹⁻⁴ ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», г. Новосибирск¹ sobkatrin@mail.ru ³ ryabovanadezhda@mail.ru ⁴ salnikov_valera@mail.ru

Приведены результаты исследования влияния вертикальной рефракции на нивелирование с помощью цифровых нивелиров. Показано, что при высокоточном нивелировании цифровым нивелиром наблюдается гораздо меньшее влияние вертикальной рефракции на отсчеты по рейкам, чем при работе с нивелиром с оптическим микрометром даже при высоте визирного луча над подстилающей поверхностью 50 см.

Вертикальная рефракция, цифровой нивелир.

Vertical refraction, digital level.

Одним из основных источников ошибок при выполнении высокоточного нивелирования является влияние вертикальной рефракции, исследованию которого посвящен целый ряд работ [2 – 4].

На основании выполненных исследований сформировались следующие основные подходы к учету влияния вертикальной рефракции:

влияние рефракции на отсчеты по рейкам и на измеряемое превышение на нивелирной станции носит систематический характер, и для его ослабления в результаты измеренного превышения необходимо вводить поправки;

влияние рефракции на отсчеты по рейкам и на измеряемое превышение на нивелирной станции иногда носит систематический характер, но нет необходимости в результаты измеренного на нивелирной станции превышения вводить поправки, так как это влияние можно значительно ослабить программой измерения превышения на станции и временем его производства;

влияние рефракции на отсчеты по рейкам носит систематический характер, но это влияние почти одинаково на измеряемое превышение на нивелирной станции и носит, в основном, случайный характер, так как оно значительно ослабляется программой измерения превышения на станции и временем его производства.

На практике наибольшее применение получил последний подход, используемый при выполнении нивелирования и в нашей стране. Для его реализации Центральным ордена «Знак Почета» научно-исследовательским институтом геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского (ЦНИИГАиК) разработан нормативный документ [1], оговаривающий требования для выполнения нивелирования: время проведения измерений, высота визирного луча над подстилающей поверхностью (пяткой рейки) и программа взятия отсчетов по рейкам.

Необходимо отметить, что исследования влияния рефракции проводились ЦНИИГАиК применительно к государственному нивелированию I–IV классов и, соответственно, для него разработаны требования нормативного документа [1]. Основными являются требования к трассам и рельефу, по которому прокладываются линии нивелирования, к внешним условиям выполнения измерений и высоте визирного луча над подстилающей поверхностью.

Так, линии нивелирования I и II классов должны прокладываться преимущественно вдоль шоссейных или железных дорог, а в труднодоступных районах – по берегам рек, тропам и зимникам. Во всех случаях линии нивелирования I и II клас-



сов должны прокладываться по трассам с наиболее благоприятными для данного района грунтовыми условиями и с наименее сложным рельефом.

К внешним условиям выполнения нивелирования относится, в первую очередь, влияние вертикальной рефракции на его результаты. Для ослабления влияния вертикальной рефракции нивелирование I и II классов выполняется в ранние и послеполуденные периоды, причем наблюдения должны начинаться через полчаса после восхода солнца и заканчиваться примерно за 30 мин до его захода. При этом четко не регламентируются требования к выполнению нивелирования в пасмурную или дождливую погоду. Указывается только, что не разрешается выполнять нивелирование при колебаниях изображений, затрудняющих точное наведение на штрих рейки, «плавающих» изображениях, сильном и порывистом ветре, скачкообразных изменениях температуры.

Принимая во внимание влияние вертикальной рефракции на результаты нивелирования, особенно высокоточного, указанным нормативным документом регламентируется высота визирного луча над подстилающей поверхностью. Так, при нивелировании I класса высота визирного луча над подстилающей поверхностью должна быть не менее 0,8 м, а при длине визирного луча до 25 м она может быть уменьшена до 0,5 м. В горных районах при длине визирного луча до 15 м разрешается выполнять измерения на станции при высоте визирного луча не менее 0,3 м. При нивелировании II класса высота должна быть не менее 0,5 м, а при длине визирного луча до 30 м она может быть уменьшена до 0,3 м. И, наконец, при нивелировании III и IV классов указанная высота должна быть не менее, соответственно, 0,3 и 0,2 м. При этом необходимо отметить, что регламентируемая высота визирного луча над подстилающей поверхностью не связана с погодными условиями, при которых производится нивелирование. Она установлена из расчета того, что нивелирование выполняется, в основном, в солнечную погоду, когда влияние рефракции проявляется в большей степени.

Высокоточное государственное нивелирование I и II классов

ют не только в полевых условиях, но и в городах и на промышленных площадках. Часто общие условия его производства существенно различаются. При этом требования к методике выполнения нивелирования и порядку взятия отсчетов по рейке на станции одни и те же для обоих случаев. Отличие в рекомендациях состоит в допустимых длинах ходов и в частоте закрепления нивелирных линий реперами. Например, высокоточное нивелирование в городах производится в условиях влияния вибрации на нивелир от движущегося транспорта, а визирный луч может проходить над разной подстилающей поверхностью даже на одной нивелирной станции: твердый грунт, травяной покров, асфальт, бетонное покрытие. На промышленных площадках визирный луч также проходит над разной подстилающей поверхностью, включая различные трубопроводы и элементы строительных конструкций. Кроме того, с учетом значительной насыщенности промышленной площадки различными сооружениями и оборудованием выполнять нивелирование приходится лучами длиной 8–15 м. В таких случаях визирный луч часто проходит через сравнительно небольшие отверстия и проемы в строительных конструкциях и оборудовании размером даже 50 × 50 мм, т. е. над подстилающими поверхностями и под ними.

Указанные условия выполнения измерений соблюдаются и при производстве нивелирования цифровыми нивелирами. Кроме того, с учетом принципа работы этих нивелиров влияние вертикальной рефракции на получаемые результаты следует ожидать несколько иным, чем при выполнении измерений оптическими нивелирами.

Авторы настоящей статьи приводят данные своих исследований по влиянию вертикальной рефракции на результаты нивелирования, выполняемого цифровыми нивелирами.

Необходимо в связи с этим отметить, что технологическая схема производства нивелирования цифровыми нивелирами, к сожалению, не приводится в нормативном документе [1].

Прежде чем рассматривать влияния рефракции на результаты нивелирования

уточнить, что понимается под высотой визирного луча над подстилающей поверхностью. В настоящее время в нормативном документе [1] понятие «высота визирного луча над подстилающей поверхностью» в определенной степени носит неопределенный характер, особенно при выполнении нивелирования на всхолмленной местности и предгорных районах. Под ним понимается высота l визирного луча над пяткой рейки, т. е. отсчет b по рейке (рис. 1, а).

Вместе с тем на отрезке AB между нивелиром и рейкой высота визирного луча над подстилающей поверхностью довольно часто бывает равной l' , т. е. меньше l . Следовательно, требование нормативного документа [1] в отношении высоты визирного луча на основании отсчета b формально выполняется, а фактически нет. То же наблюдается на территориях промышленных площадок при определении осадков и деформаций сооружений и оборудования, когда на пути визирного луча встречаются различные препятствия. Кроме того, нивелирование иногда выполняется при высокой траве и сравнительно высоком снежном покрове (см. рис. 1, а, пунктир), что также вносит неопределенность в понятие «высота визирного луча».

Рассмотрим теперь в общем виде схему прохождения визирного луча от нивелира до рейки для оптических и цифровых нивелиров.

Для взятия отсчета b (рис. 1, б) по рейке оптическим нивелиром требуется, в геометрическом смысле, «одиночный» визирный луч Ob . При прохождении слоев воздуха этот визирный луч претерпевает рефракционные изменения своего направления, что приводит к появлению ошибок при взятии отсчета по рейке. Очевидно, что наибольшее влияние на такое изменение положения визирного луча в пространстве оказывает некоторый объем воздуха (на рисунке условно ограниченный пунктирными линиями), расположенный непосредственно на пути его прохождения.

Применительно к цифровым нивелирам традиционного понятия одиночного визирного луча не существует, так как при взятии отсчета b (рис. 1, в) по штрих-кодовой рейке принимают участие ряд смежных штрихов штрих-кода, которые

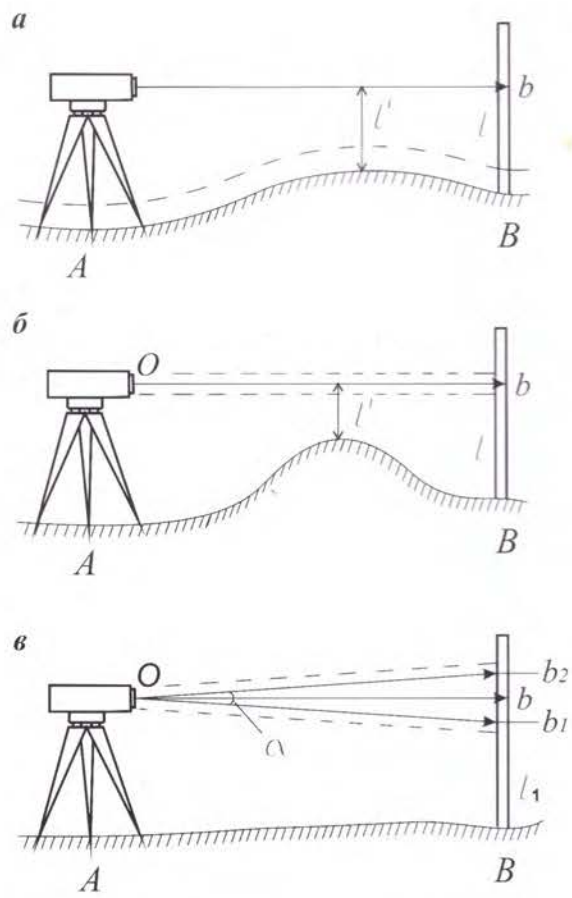


Рис. 1. Схема взятия отсчетов по рейке

находятся в угловом секторе α . Для взятия отсчета по штрих-кодовой рейке необходимо, чтобы в этом отсчетном угловом секторе α поля зрения зрительной трубы находился участок рейки (см. рис. 1, в; заключен между лучами Ob_1 и Ob_2) длиной не менее $b_2 - b_1 = 300$ мм. Очевидно, что на лучи, заключенные в указанном угловом секторе, а также на лучи Ob_1 и Ob_2 будет оказывать влияние некоторый объем воздуха (на рисунке условно ограниченный пунктирными линиями), который расположен непосредственно на пути их прохождения. При этом степень влияния рефракции на нижние и верхние визирные лучи будет разная: следует ожидать, что это влияние на верхние лучи будет меньшим.

Таким образом, если при выполнении нивелирования I класса высота визирного луча будет равна 0,8 м, то отрезок l_1 , заключенный между подстилающей поверхностью и нижним лучом Ob_1 , будет не меньше 0,65 м. Это обстоятельство свидетельствует о том, что фактически требование нормативного документа [1] не будет выполняться. Для выполнения

иях, но
площад-
изводс-
ри этом
я ниве-
етов по
я обоих
состоит
частоте
перами.
рование
ях влия-
ущегося
т прохо-
верхнос-
станции:
асфальт,
ленных
проходит
ностью,
ы и эле-
й. Кроме
ценности
ыми со-
полнять
ами дли-
ный луч
о неболь-
тельных
азмером
ающими

ния изме-
зводстве
елирами.
а работы
кальной
ультаты
ым, чем
ческими

приводят
влиянию
ультаты
фровыми

тметить,
изводства
елирами,
орматив-

влияния
ирования
обходимо

требования необходимо высоту визирного луча поднять минимум на 0,15 м, т. е. она должна быть равной не менее $b = 0,95$ м. Поднятие визирного луча приведет к усложнению работ на нивелирных станциях и к уменьшению возможного максимального измеряемого превышения на каждой из них (при данной длине реек).

В связи с тем, что взятие отсчета цифровым нивелиром по штрих-кодовой рейке производится на основании другого технического решения, чем взятие отсчета оптическим нивелиром по штриховой рейке, следует ожидать несколько иного характера влияния вертикальной рефракции на измеряемое превышение.

Для определения степени этого влияния авторами статьи были выполнены исследования для следующих характеристик подстилающей поверхности: травяной покров высотой 5–10 см и твердое покрытие в виде смеси песка и щебня. Исследования выполнялись в июне–сентябре 2008–2010 гг. при следующих метеорологических условиях: в солнечную погоду, при переменной облачности, в пасмурную погоду иногда при небольших кратковременных дождях. Температура воздуха изменялась от +6 до +28 °С; резкие порывы ветра отсутствовали. Измерения выполнялись нивелирами DiNi 12.

Перед началом исследований ножки штатива устанавливались на бетонное основание или надежно углублялись в подстилающую поверхность. В результате этого влияния перемещения наблюдателя на положение системы «цифровой нивелир – штрих-кодová рейка» практически не было. При выполнении исследований вдоль шоссе́йной дороги штатив с нивелиром устанавливался на ее обочине. Во время выполнения измерений применялся геодезический зонт. Для ослабления влияния наклона штрих-кодové рейки устанавливались на костылях в отвесное положение и удерживались в таком состоянии специальными подпорками. Также для исключения попадания засветок от лучей солнца в объектив нивелира (особенно во время его восхода или захода) рейки устанавливались по направлению север – юг. Профиль подстилающей поверхности был равнинный, а также имеющий уклон (подъем в сторону рейки).

Исследования проводились по двум программам.

При реализации *первой программы* определялось влияние рефракции на изменение отсчета по штрих-кодовой рейке в течение всего дня при расстоянии до нее 15; 30 и 50 м и высоте визирного луча над подстилающей поверхностью для каждого из этих расстояний 50 и 70 см. Ежедневно (перед началом измерений и по их окончании) определялось значение угла i .

Исследования при солнечной погоде и переменной облачности. Измерения при солнечной погоде и переменной облачности выполнялись в июне и июле и начинались спустя 10–15 мин после восхода солнца и заканчивались за 10–15 мин до его захода. Температура в утренние часы была равна $+10 \div 16$ °С, а в вечерние $+20 \div 27$ °С. Осадки в данный период были кратковременными и незначительными. Общий период выполнения измерений – 18 дней (десять дней – травяной покров; восемь дней – твердое покрытие). Высота визирного луча над подстилающей поверхностью устанавливалась подбором формы рельефа и изменением горизонта нивелира. Отсчет по рейке состоял из трех последовательных отсчетов с последующим их осреднением. Интервал между получением осредненных отсчетов был равен 6–7 мин. Первый осредненный отсчет принимался как исходный.

Результаты исследований следующие.

1. *Расстояние 15 м.* На равнинном участке (превышения между нивелиром и рейкой были в пределах 0,2–0,3 м) для обоих типов подстилающей поверхности при высоте визирного луча 50 см после восхода Солнца в течение 1,0–1,5 ч наблюдается увеличение отсчетов по рейке на 0,04–0,15 мм. Затем увеличение отсчетов прекращается и в течение дня наблюдаются изменение отсчетов практически симметрично относительно среднего положения. Перед заходом солнца наблюдается уменьшение отсчетов практически на такую же величину. При высоте визирного луча 70 см для обоих типов подстилающей поверхности увеличения отсчетов по рейке не превышало 0,12 мм. Затем также в течение дня наблюдаются изменение отсчетов

по двум

граммы
и на из-
ой рейке
и до нее
луча над
каждого
кедневно
оконча-
и.

й погоде
мерения
нной об-
и июле
осле вос-
0–15 мин
утренние
вечерние
иод были
ельными.
ерений –
й покров;
). Высота
й поверх-
эм формы
нивелира.
последо-
ющим их
лучением
6–7 мин.
инимался

следую-

авнинном
ивелиром
0,3 м) для
верности
см после
5 ч наблю-
) рейке на
е отсчетов
наблюда-
актически
дного по-
наблюда-
гически на
визирного
тилающей
в по рейке
еже в тече-
е отсчетов
юсительно

среднего положения. Перед заходом солнца также наблюдается уменьшение отсчетов практически на такую же величину.

На наклонном участке (превышения между нивелиром и рейкой были в пределах 1,2–1,4 м) изменения отсчетов по рейке были практически такими же.

2. Расстояние 30 м.

При данном расстоянии для травяного покрова на равнинном участке увеличение (в дальнейшем и уменьшение) отсчетов по рейке в периоды восхода и захода солнца было в пределах 0,18–0,26 мм, а для твердого покрытия 0,24–0,32 мм. Для наклонного участка в утренние и вечерние часы наблюдалось изменение отсчетов примерно на 20–30 % больше, чем на равнинном участке. В течение дня также наблюдалось практически симметричное изменение отсчетов по рейке относительно среднего положения. Увеличение высоты визирования до 70 см практически не приводит к изменению характера и величины изменения отсчетов.

3. Расстояние 50 м.

При данном расстоянии для травяного покрова и для твердого покрытия на равнинном участке увеличение (уменьшение) отсчетов по рейке в периоды восхода и захода солнца было в пределах 0,46–0,68 мм, а на наклонном участке 0,52–0,76 мм. Также в течение дня наблюдалось практически симметричное изменение отсчетов по рейке относительно среднего положения. Увеличение высоты визирования до 70 см также практически не приводит к перемене характера и величины изменения отсчетов. Осредненные графики изменения отсчетов для интервалов в один час при солнечной погоде в переменной облачности для всех дней

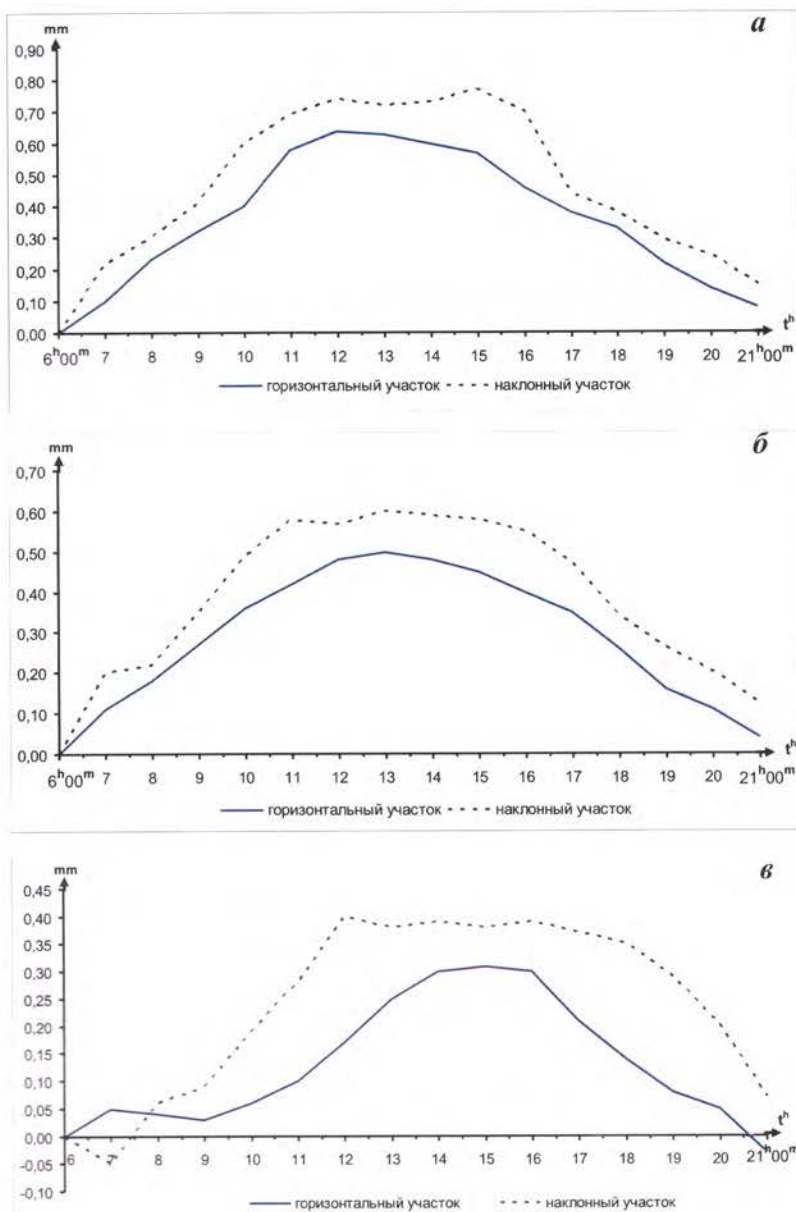


Рис. 2. Графики влияния вертикальной рефракции на результаты цифрового нивелирования

наблюдений приведены, соответственно, на рис. 2, а и б.

Необходимо отметить, что иногда наблюдения на равнинном и наклонном участках в близ полуденное, полуденное и после полуденное время при значительных колебаниях изображения рейки (обычно после дождя) не выполнялись. В эти периоды также затруднено взятие отсчета с первого нажатия кнопки и поэтому приходилось эту операцию выполнять несколько раз.

Исследования при пасмурной погоде. Измерения при пасмурной погоде выполнялись в июле–сентябре. Их начинали сразу после восхода солнца и заканчивали практически с его заходом. Общий пери-



од выполнения измерений 12 дней (семь дней – травяной покров; пять дней – твердое покрытие). Температура в утренние часы была равна $+8 \div 16$ °С, а в вечерние $+8 \div 24$ °С. Осадки были иногда в виде мелкого дождя и периодическими.

Результаты исследований следующие.

1. *Расстояние 15 м.* На равнинном и наклонном участках, а также для двух высот визирования изменения отсчетов в утренние и вечерние периоды были незначительными и находились в пределах 0,05–0,08 мм. В течение дня изменение отсчетов по рейке относительно среднего положения было небольшим и симметричным.

2. *Расстояние 30 м.* Увеличение расстояния до рейки для равнинного и наклонного участков приводит к увеличению изменения отсчетов по рейке для обеих высот визирования в среднем на 0,08–0,22 мм. Изменение отсчетов в течение дня было также небольшим и симметричным.

3. *Расстояние 50 м.* Для данного расстояния для указанных выше условиях выполнения измерений отсчеты увеличиваются на 0,22–0,35 мм и их изменение небольшое и симметричное. Осредненный график изменения отсчетов для интервалов в один час для всех дней наблюдений приведен на рис. 2, в.

Во второй программе исследований определялась величина изменения превышения на станции также при расстояниях до реек 15; 30 и 50 м и высоте визирного луча над подстилающей поверхностью 50 и 70 см. Реализация второй программы выполнялась параллельно с первой для тех же условий производства измерений: внешних условиях, длине и высоте визирного луча, травяном покрове и твердом покрытии. При этом использовались две рейки, что позволяло в значительной степени дополнить исследования первой программы – определить изменение отсчетов на станции по двум рейкам.

Исследования выполнялись следующим образом. Спустя 15–20 мин после восхода солнца 15 раз измерялось превышение, среднее из которых для данного дня принималось за исходное. Затем в течение всего дня с интервалом 8–10 мин превышение измерялось три раза и из них находи-

лось среднее. Исследования заканчивались перед заходом солнца или сразу после его захода. Величина влияния вертикальной рефракции оценивалась по разности превышений, измеренных в течение всего дня, и исходным превышениям.

Исследования при солнечной погоде и переменной облачности.

1. *Расстояние 15 м.* На равнинном и наклонном участках, а также при двух высотах визирования изменение превышений в утренние и вечерние периоды наблюдений являлось незначительным и находилось в пределах 0,03–0,07 мм. В течение всего дня изменение величины превышения относительно исходного составляло 0,03–0,08 мм и носило случайный характер. В близ полуденное, полуденное и после полуденное время колебание изображения штрихов рейки незначительно и оно не влияло на измерение превышения.

2. *Расстояние 30 м.* Увеличение длины плеч для равнинного и наклонного участков не приводит к изменению характера колебаний значений превышений для обеих высот визирования и вида подстилающей поверхности. В течение всего дня изменение величины превышения относительно исходного составляет 0,07–0,10 мм (с учетом ошибок собственно измерения превышения) и также носит случайный характер. В близ полуденное, полуденное и после полуденное время после дождя иногда наблюдается заметное колебание изображения штрихов рейки, но оно не влияет на измерение превышения.

3. *Расстояние 50 м.* Дальнейшее увеличение длины плеч до максимальной для равнинного и наклонного участков также не приводит к изменению характера колебаний значений превышений для обеих высот визирования и вида подстилающей поверхности. В течение всего дня изменение величины превышения относительно исходного составляет 0,08–0,18 мм (с учетом ошибок собственно измерения превышения) и также носит случайный характер. Однако в близ полуденное, полуденное и после полуденное время при значительных колебаниях изображения рейки (обычно после дождя) изменение величины превышения относительно ис-

чивались после его икальной ости пре-зего дня,

ий погоде

внинном при двух е превы- периоды гельным -0,07 мм. величины дного со- случайный луденное иние изоб- чительно превыше-

ние длины ого участ- актера ко- для обеих гилающей ия измене- носитель- -0,10 мм измерения лучайный луденное ле дожда е колеба- си, но оно ения.

йшее уве- льной для ков также актера ко- для обеих тилающей ня измене- носитель- }-0,18 мм измерения :лучайный енное, по- время при бражения изменение тельно ис- составляет

0,18–0,25 мм, но также носит случайный характер. Вместе с тем, в некоторых случаях значительные колебания изображения рейки в этот период времени препятствуют уверенному измерению превышения.

Исследования при пасмурной погоде.

1. *Расстояние 15 и 30 м.* На равнинном и наклонном участках, а также при двух высотах визирования изменение превышений в утренние и вечерние периоды наблюдений является незначительным, носит случайный характер и находится в пределах 0,05–0,08 мм. Кратковременные осадки не влияют на величину измеряемого превышения.

2. *Расстояние 50 м.* Увеличение длины плеч до максимальной для равнинного и наклонного участков не приводит к изменению характера колебаний значений превышений для обеих высот визирования и вида подстилающей поверхности. В течение всего дня изменение величины превышения относительно исходного составляет 0,08–0,14 мм (с учетом ошибок собственно измерения превышения) и также носит случайный характер. Кратковременные осадки также не влияют на величину измеряемого превышения.

Сделаем выводы.

1. Влияние вертикальной рефракции на изменение отсчетов по штрих-кодовой рейке цифровым нивелиром меньше чем при отсчитывании оптическим нивелиром по штриховой рейке даже при высоте визирного луча над подстилающей поверхностью 50 см.

2. В связи с этим считаем необходимым при выполнении нивелирования I и II классов максимальной длиной луча уменьшать высоту визирного луча над пяткой рейки, соответственно, до 0,5 и 0,4 м. Это будет способствовать увеличению продвига выполнения нивелирования без потери точности измерений.

3. Также увеличению продвига нивелирования будет способствовать увеличение допуска на разность плеч на нивелирной станции и величины накопления этих неравенств по секции. Это предложение обосновывается следующими двумя факторами. Влияние рефракции на результаты измерения превышения на станции при длине плеч 50 м носит случайный харак-

тер и тем более это влияние является случайным при длине плеч 3–5 м. Также это влияние является случайным при разности плеч на станции. Другим фактором является то, что зрительные трубы цифровых нивелиров имеют увеличение до $30\times$. В этом случае глубина резкости изображения будет больше, чем при увеличении $40\times$, требуемого нормативным документом [1] для оптических нивелиров с плоскопараллельной пластинкой. Следовательно, выполнять дополнительное перефокусирование зрительной трубы на станции при визировании на заднюю рейку, а затем и на переднюю (и наоборот) при увеличении разности плеч не придется. Тем самым на результаты измерения превышения на станции не будет оказывать влияние ход фокусирующей линзы. В связи с этим предлагаем при выполнении нивелирования I класса увеличить допуск на разность плеч на нивелирной станции до 2,0 м и накопление этих неравенств по секции до 3,0 м, а при выполнении нивелирования II класса этот допуск довести, соответственно, до 4,0 и 5,0 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 226 с.
2. Соболева Е. Л. Разработка и совершенствование методики высокоточного нивелирования I и II классов с применением цифровых нивелиров. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2008. – 186 с.
3. Павлов Н. А. Рефракция в высокоточном и точном нивелировании // Тр. ЦНИИГАиК. – Вып. 23. – М.: ГУТСК НКВД СССР, 1937. – С. 92.
4. Труды ЦНИИГАиК. – Вып. 111. – М.: ГУТК МВД СССР, 1956. – 339 с.

Summary

The paper presents the results as concerns investigation of vertical refraction effect on digital leveling. According to the research the effect of vertical refraction on the rod reading is less in case of high-precision digital leveling as compared with that of optical micrometer, even with the collimating ray height over the surface being 50 cm. ■