МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК
1965 Геодезия, картография и аэрофотосъемка Выпуск 2

А. Л. ОСТРОВСКИЙ, Л. С. ХИЖАК, И. Н. КМЕТКО

О ВЛИЯНИИ РЕФРАКЦИИ В ВЫСОКОТОЧНОМ НИВЕЛИРОВАНИИ

Влиянию рефракции на высокоточное нивелирование посвящен ряд работ советских и зарубежных авторов. В СССР наиболее фундаментальными работами по этому вопросу являются исследования Н. А. Павлова [1] и И. И. Энтина [2].

Сразу же отметим, что если Н. А. Павлов приходит к выводу о систематическом влиянии рефракции на результаты нивелирования, то И. И. Энтин утверждает диаметрально противоположное, т. е. делает вывод о случайном влиянии рефракции. Противоречивые выводы относительно влияния рефракции имеют место и в исследованиях заграничных авторов. Наиболее убедительным подтверждением сказанного может служить отчет Т. И. Куккамяки, сделанный им на IX общем собрании Международного союза геодезии и геофизики в Хельсинки, из которого следует, что в различных странах нет единого мнения о методике производства высокоточного нивелирования. В частности, в вопросе должно ли обратное нивелирование производиться сразу же после прямого, т. е. приблизительно в одинаковых атмосферных условиях, или через некоторый промежуток времени по возможности в других условиях, в десяти названных Т. И. Куккамяки странах придерживаются самых различных мнений. Таким образом, вопрос о характере влияния рефракции на высокоточное нивелирование нельзя считать окончательно решенным.

В данной статье предпринимается попытка показать, что в настоящее время нет оснований категорически утверждать о случайном влиянии рефракции на результаты высокоточного нивелирования.

Как указывает И. И. Энтин, основными предпосылками детальных исследований ЦНИИГАиК, изложенными в работе [2], явилось, во-первых, отрицание вывода Н. А. Павлова о том, что поднятие нивелира до двух метров значительно уменьшает влияние рефракции и, во-вторых, несоответствие значений ошибок за рефракцию в превышения, вычисленных по формуле Н. А. Павлова на основании метеорологических измерений, и значений этих же ошибок, полученных из геометрического нивелирования.

Тем не менее отметим, что выполненное летом 1950 г. двойное нивелирование замкнутого полигона длиной 2.9 *км*, на которое ссылается И. И. Энтин, не отрицает вывода Н. А. Павлова об уменьшении рефракции с поднятием луча визирования. В подтверждение сказанного воспользуемся таблицей 9 из работы [2], в которой даны невязки полигона, полученные из нивелировок на высоком и обычном штативах.

Таблица 1

Невязки полигона f_h в *мм*

Нивелировка, ход	Высокий штатив	Обычный штатив
Первая нивелировка, прямой ход	+0,1	—3,6
Первая нивелировка, обратный ход	—2,1	—2,2
Вторая нивелировка, прямой ход	—1,4	+1,6
Вторая нивелировка, обратный ход	+4,8	+5,4
Среднее	±2,1	±3,2

Как видно из таблицы 1, в любом случае невязка f_h на высоком штативе меньше невязки $f_{h'}$ на обычном штативе, а в среднем это уменьшение составляет 1,5. Принято считать [3], что невязки нивелирных полигонов почти не включают в себя действие рефракции. С этой точки зрения можно было бы утверждать, что приведенные в таблице 1 уменьшения невязок в полигонах не объясняются действием рефракции. Изучение причин, вызывающих уменьшение невязок в замкнутых полигонах с применением высокого штатива, заслуживает внимания, однако, настоящая статья не преследует цель детального рассмотрения этого вопроса.

Что касается формулы Н. А. Павлова, то, как справедливо указывает Ф. Н. Красовский [3], вряд ли можно рассматривать ее как пригодную для введения поправок за рефракцию в результаты высокоточного геометрического нивелирования, тем не менее возможность оценить по этой формуле порядок искажений нивелирования нельзя отрицать. Таким образом, Ф. Н. Красовский разделял мнение Н. А. Павлова о систематическом влиянии рефракции на результаты высокоточного геометрического нивелирования. Автор работы [2], наоборот, считает, что нивелирная рефракция носит случайный характер.

Все сказанное выше привело нас к мысли попытаться проанализировать приведенный в работе [2] полевой материал исследований. Первое, на что мы обратили внимание, это несоответствие хода вертикальных градиентов температуры, приведенных в работе [2], ходу вертикальных градиентов температуры, полученным из многочисленных наблюдений метеорологов. Как известно, ночью температура приземного слоя воздуха возрастает с высотой (инверсия). Вертикальный температурный градиент будет положительным. Через час—два после восхода Солнца, вследствие возрастания солнечного излучения и нагревания подстилающей поверхности, инверсия в приземном слое воздуха разрушается. Температурные градиенты, пройдя нулевые значения, становятся отрицательными, т. е. происходит падение температуры воздуха с высотой. В вечернее время температурные градиенты опять становятся равными нулю и переходят в положительные, так как лучеиспускание почвы превосходит лучепоглощение. Положительные градиенты обычно удерживаются в течение всей ночи. Такие закономерности хорошо подтверждаются, например, в работах [4, 5] и других. По метеорологическим наблюдениям, результаты которых изложены в работе [2], такой закономерности не обнаруживается.

Понятие о вертикальных температурных градиентах имеет только среднестатистический смысл и существование такой статистической закономерности нельзя отрицать. А на результаты нивелирования, выполненного на многочисленных станциях, в определенной мере должны ока-

зывать воздействие именно эти среднестатистические закономерности в распределении температуры (плотности) воздуха.

Далее, считая неосуществимым определение величины рефракции без знания действительной структуры температурного поля, автор работы [2] обратился к прямому определению влияния рефракции, используя нивелирование одних и тех же точек длинным и коротким лучом, а именно: превышения между двумя реперами, удаленными друг от друга на 100 *м*, определялись с одного штатива и с трех штативов (длины плеч соответственно 50 и 16,7 *м*). Действительно, так как влияние рефракции на отсчеты по рейке пропорционально квадрату расстояния от нивелира до рейки, то такой путь следует признать правильным. Поэтому, если h_q — превышение, полученное длинным лучом, и $h_к$ — превышение, полученное при нивелировании короткими лучами, то разность

$$\Delta\rho = h_q - k_к \qquad (1)$$

в какой-то степени будет представлять собой влияние рефракции.

Однако для решения вопроса о характере влияния рефракции автор сгруппировал все полученные значения по их знаку, величине и частоте появления отдельно для каждого участка [2, стр. 75, табл. 15], а также подсчитал теоретическую частоту появления $\Delta\rho$ разной величины и пришел к выводу, что $\Delta\rho$ являются величинами случайными и подчиняются закону Гаусса, а следовательно, влияние рефракции при нивелировании из середины носит случайный характер. Такая обработка результатов наблюдений не может быть признана правильной, так как в ней совершенно не учитываются среднестатистические закономерности суточного хода температурных градиентов по высоте.

Как известно [3], наиболее выгодным временем для нивелирования являются периоды примерно от 5^h00^m до 8^h30^m часов утра и от 15^h30^m до 19^h30^m часов вечера, т. е. время вблизи моментов изменения знака и перехода через нуль вертикальных градиентов температуры. Поэтому для наклонных участков величины ошибок нивелирования, выполненного при инверсионном распределении температуры воздуха, должны быть одного знака, а при нормальном — другого. Для горизонтальных участков такая закономерность не должна обнаруживаться, так как визирные лучи при нивелировании из середины претерпевают одинаковые искривления. Такое предположение справедливо, если действительно, как мы указывали ранее, на результаты нивелирования воздействуют среднестатистические градиенты температуры.

Посмотрим, насколько соответствуют результаты исследований, опубликованные в работе [2], нашим предположениям. К сожалению, приведенные в этой работе разности температур по высоте δt не вскрывают общеизвестной статистической закономерности распределения температуры и по ним невозможно установить моменты нулевых градиентов. Поэтому мы довольно условно разделили как утренние, так и вечерние серии наблюдений на две равные по числу измерений группы. Причем, те дни, когда не была выполнена полная программа наблюдений, в обработку не брались. Итак, значения $\Delta\rho$ за каждый день наблюдений были разделены на четыре группы: две утренних и две вечерних. Положим, в некоторую дату утром было выполнено 30 определений $\Delta\rho$, тогда $\Delta\rho_{ср\,I}$ — есть среднее арифметическое значение из 15 первых определений, а $\Delta\rho_{ср\,II}$ — среднее арифметическое значение из 15 последующих определений. Аналогично по вечерним наблюдениям получим $\Delta\rho_{ср\,III}$ и $\Delta\rho_{ср\,IV}$.

Далее были образованы разности

$$d\Delta\rho_{утр.} = \Delta\rho_{ср\,I} - \Delta\rho_{ср\,II}, \quad (2)$$

$$d\Delta\rho_{веч.} = \Delta\rho_{ср\,III} - \Delta\rho_{ср\,IV}, \quad (3)$$

которые и приведены в таблице 2.

Из данных таблицы видно, что для наклонных участков распределение знаков имеет определенную закономерность, а именно: для Северо-Кавказского участка в $d\Delta\rho_{утр.}$ преобладает знак плюс, а в $d\Delta\rho_{веч.}$ — знак минус; для Подмосковного участка наоборот.

Таким образом, данные таблицы 2 указывают на систематическое влияние рефракции в нивелировании.

Что касается разных знаков для Северо-Кавказского и Подмосковного участков, то это вытекает из того, что превышения между реперами на указанных участках имели противоположные знаки. Как и предполагалось, для горизонтальных участков в распределении знаков $d\Delta\rho$ не наблюдается какой-либо закономерности.

Таблица 2

Таблица значений $d\Delta\rho$

Дата	$d\Delta\rho_{утр.}$	$d\Delta\rho_{веч.}$	Дата	$d\Delta\rho_{утр.}$	$d\Delta\rho_{веч.}$
Наклонные участки					
Северо-Кавказский			Подмосковный		
26/VII	+0,106	−0,070	7/VII	+0,016	−0,044
29/VII	+0,100	+0,062	9/VII	−0,014	+0,027
30/VII	+0,004	+0,002	10/VII	−0,043	+0,021
31/VII	+0,025	−0,035	11/VII	−0,033	+0,030
2/VIII	+0,006	+0,046	14/VII	+0,040	+0,056
4/VIII	+0,043	−0,018	15/VII	−0,024	−0,006
5/VIII	+0,094	−0,037	20/VII	−0,053	+0,041
6/VIII	−0,012	−0,070	3/VIII	+0,006	+0,067
7/VIII	−0,060	+0,008	4/VIII	−0,050	−0,008
11/VIII	+0,033	−0,143	6/VIII	−0,021	−0,015
12/VIII	+0,105	−0,036	11/VIII	−0,024	+0,023
13/VIII	+0,081	—	13/VIII	+0,050	+0,035
14/VIII	+0,074	−0,057	14/VIII	−0,114	+0,048
15/VIII	+0,232	−0,042	16/VIII	−0,015	+0,011
16/VIII	+0,114	—	17/VIII	−0,050	—
18/VIII	+0,063	—	18/VIII	—	+0,034
19/VIII	+0,117	−0,057	20/VIII	—	+0,076
20/VIII	+0,055	+0,065	21/VIII	+0,024	−0,004
21/VIII	+0,065	−0,071	22/VIII	—	+0,021
22/VIII	+0,061	−0,044			
Горизонтальные участки					
Северо-Кавказский			Подмосковный		
1/IX	−0,206	−0,050	13/VI	—	−0,020
2/IX	+0,037	—	14/VI	−0,036	—
3/IX	—	−0,008	16/VI	+0,066	+0,033
4/IX	+0,005	+0,047	18/VI	+0,028	−0,023
5/IX	−0,046	+0,019	22/VI	−0,091	+0,144
6/IX	−0,025	—	23/VI	+0,136	+0,160
8/IX	+0,046	+0,019	28/VI	−0,034	—
9/IX	−0,012	—	29/VI	−0,190	—
10/IX	+0,059	−0,076	30/VI	−0,010	—
			3/VII	+0,023	—
			31/VII	+0,010	−0,019
			23/VIII	—	−0,013
			24/VIII	—	−0,072

Чтобы рельефнее показать систематический характер $\Delta\rho$, эти величины были обработаны еще следующим образом: пусть на определенную дату имеем 30 утренних и 30 вечерних определений $\Delta\rho$. Все 60 определений были сгруппированы в 30 суммарных, причем суммировались первое утреннее и тридцатое вечернее определения, второе утреннее и двадцать девятое вечернее.

Считая, что примерно первая половина утренних и вторая половина вечерних наблюдений выполнялись в инверсионный период, а остальные в часы падения температуры воздуха с высотой, мы, применяя такое суммирование (от утра и вечера к середине дня), как бы увеличили значения $\Delta\rho$ вдвое. Далее вычислялись разности 16—1; 17—2; ... 30—15, т. е. от удвоенных $\Delta\rho$, полученных преимущественно при адиабатических или сверхадиабатических градиентах, вычитались удвоенные значения $\Delta\rho$, в основном при температурных инверсиях. Наконец, были вычислены средние арифметические значения соответствующих разностей по всем датам. Обозначим эти разности $d\Delta\rho'_к$ и $d\Delta\rho'_п$ соответственно для Северо-Кавказского и Подмосковного участков. В обработку брались лишь те даты, в которых имеются полные (по 30) утренние и вечерние наблюдения.

В таблице 3 приведены средние значения указанных разностей по двум наклонным участкам.

Таблица 3

Таблица значений $d\Delta\rho'$

Разности	$d\Delta\rho'_к$	$d\Delta\rho'_п$	Разности	$d\Delta\rho'_к$	$d\Delta\rho'_п$
16—1	—0,095	+0,070	24—9	—0,095	+0,080
17—2	—0,173	+0,048	25—10	—0,041	+0,042
18—3	—0,126	+0,007	26—11	—0,061	+0,086
19—4	—0,074	+0,083	27—12	+0,003	+0,021
20—5	—0,034	+0,026	28—13	+0,008	+0,072
21—6	—0,084	+0,062	29—14	—0,119	—0,048
22—7	—0,093	+0,041	30—15	—0,034	+0,041
23—8	—0,110	+0,018			

Таблица 3 комментарий не требует. Заметим только, что систематическое распределение знаков величин $d\Delta\rho'$ хорошо прослеживается и по отдельным датам.

Таким образом, в настоящее время нет оснований утверждать о случайном влиянии рефракции в высокоточном нивелировании. Поэтому вопрос о характере этого влияния, как и вопрос о методике производства высокоточного нивелирования, нуждается в дальнейшей разработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Павлов. Рефракция в высокоточном и точном нивелировании. Труды ЦНИИГАиК, вып. 23, М., 1937.
2. И. И. Энтин. Высокоточное нивелирование. Труды ЦНИИГАиК, вып. 111, М., 1956.
3. Ф. Н. Красовский. Избранные сочинения, т. III, М., 1955.
4. В. Иордан, О. Эггерт, М. Кнейссль. Руководство по высшей геодезии т. II. Перевод с немецкого, М., 1939.
5. Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 147. Гидрометеоиздат, Л., 1963.

Работа поступила
22 июня 1964 г.