

А. Л. ОСТРОВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ РАДИОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ВСХОЛМЛЕННОЙ МЕСТНОСТИ

Вопросам влияния атмосферы на точность радиодальномерных измерений, в частности методом повышения точности физических редуций расстояний, измеренных радиодальномерами, посвящена обширная литература. Тем не менее эти вопросы не нашли окончательного разрешения. Более того, нет даже надежных количественных и качественных характеристик атмосферных влияний на точность радиодальномер-

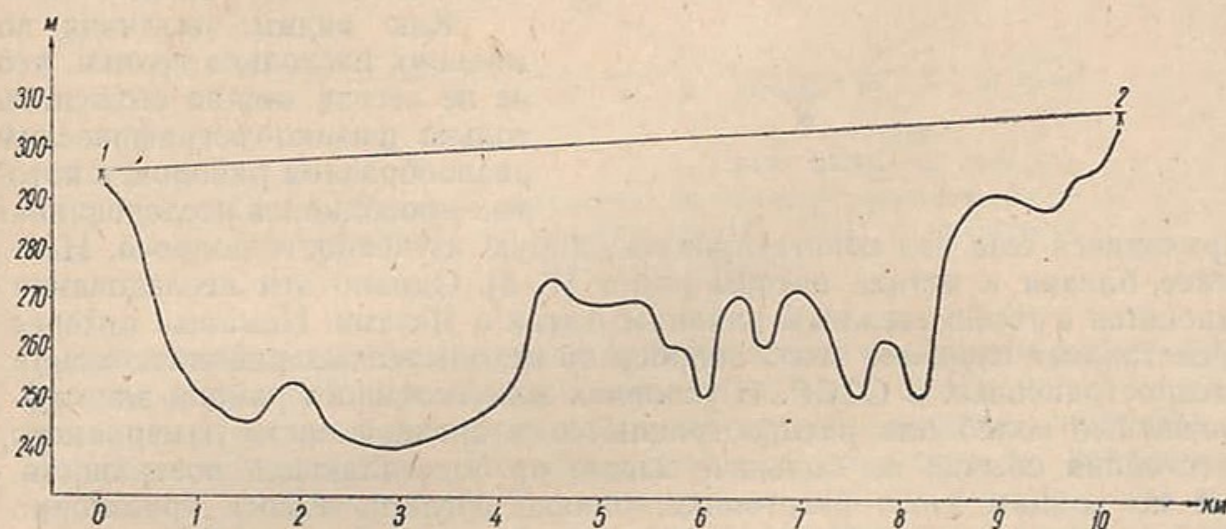


Рис. 1. Профиль вдоль линии-эталона (замыкающей).

ных измерений во всех многообразных физико-географических условиях районов и областей страны. Что касается методов физического редуцирования длин, или методов определения поправок, обусловленных характером распределения показателя преломления атмосферы на пути радиоволн, то они остаются несовершенными, если иметь в виду высокоточные измерения.

Такое положение объясняется чрезвычайной сложностью и трудностью вопроса. Между тем, вопросы эти весьма важны, так как без их решения невозможно дальнейшее повышение точности измерения расстояний радиоэлектронными методами.

Из работ, посвященных исследованию влияния атмосферы на радиодальномерные измерения, заслуживает внимания обобщающая монография А. А. Генике [2]. В ней рассматривается весь комплекс вопросов теории и практики радиодальномерных измерений. Из зарубежных исследований настоящей проблемы особо отметим отчеты специальной

международной исследовательской группы № 19, руководимой полковником Эдж; работы К. Д. Маклеллана [9] (Канада), С. Баккелида [8] (Норвегия), М. С. Томпсона [10] (США).

Очень важен вопрос о наиболее выгодном времени суток для ведения наблюдений. Таким временем условимся считать время, когда измеренные метеоэлементы в двух конечных точках линии наиболее представляют как среднеинтегральные значения этих метеоэлементов на пути электромагнитных волн. К сожалению, для радиодальномерных измерений пока не удалось определить наиболее благоприятное время суток.

Так, по исследованиям К. Д. Маклеллана, удовлетворительные результаты могут быть получены около 13 ч; по исследованиям в КНР — в период от 5 до 9 ч утра. Как показывают исследования в Норвегии, наиболее достоверными оказались измерения с 7 ч вечера до 7 ч утра; по данным О. А. Мозжухина [4], — с 3—4 до 7 ч утром и с 11 до 17—18 ч днем.

Как видим, различия во мнениях настолько велики, что их не всегда можно объяснить только физико-географическим разнообразием районов, в которых проводились исследования.

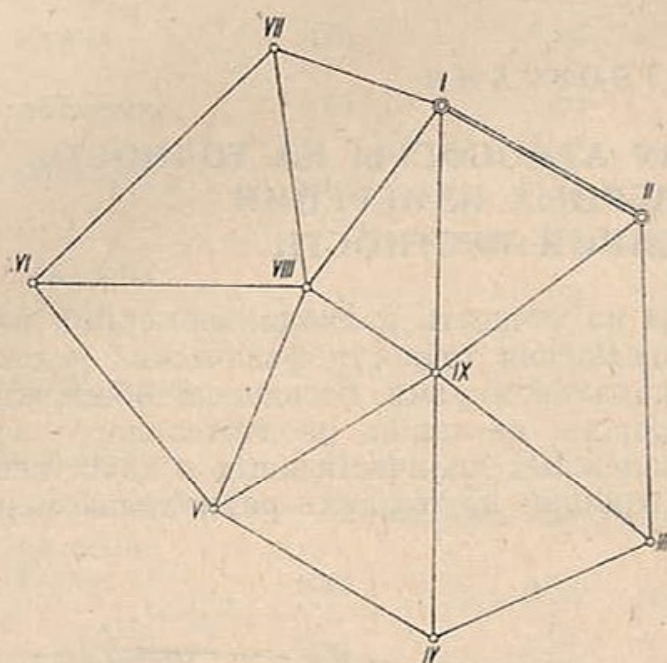


Рис. 2. Схема сети.

Приходится еще раз констатировать слабую изученность вопроса. Наиболее близки к истине авторы работ [1, 3]. Однако эти исследования относятся к горно-таежным районам Алтая и Якутии. Немалый интерес представляет изучение этого вопроса во всхолмленных районах, весьма распространенных в СССР. В условиях всхолмленного района электромагнитные колебания распространяются в средней части измеряемого расстояния обычно на большей высоте от подстилающей поверхности, чем по концам этого расстояния, однако средняя высота траектории радиоволн на отдельной линии редко превышает 100 м.

Кафедрой инженерной геодезии и отраслевой лабораторией по изучению влияния атмосферы на геодезические измерения Львовского политехнического института были предприняты специальные экспериментальные исследования в этой области. Исследования проводились в западном районе УССР с повышенной влажностью воздуха.

При подобного рода исследованиях очень важно исключить или сделать постоянным влияние других погрешностей и, прежде всего, ошибок отражений от земли. Как следует из ряда работ, ошибки, вызываемые отражением от земли для некоторого расстояния, при неизменном положении ведущей и ведомой станций, являются постоянной величиной. Поэтому программа исследований предусматривала проведение продолжительных радиодальномерных измерений на линии-этalone с довольно сложным профилем (рис. 1), характерным для всхолмленного района. Колебания отметок вдоль линии достигали 60 м при средней высоте луча над подстилающей поверхностью 37,6 м. Линия-эталон является одной из сторон сплошной сети триангуляции (рис. 2), все стороны которой были измерены впоследствии радиодальномером,

Линия-эталон — замыкающая ломаного базиса (два излома). Сложный профиль и большие уклоны вдоль линии не позволили непосредственно измерять эту линию проволоками. Длина эталона была предварительно определена в июне—июле 1966 г. Относительная ошибка измерения эталона (замыкающей) — порядка 1 : 800 000.

Радиодальномерные измерения на базисе ставились с 25 июля по 17 августа 1966 г. Ведущая и ведомая станции радиодальномера РДГ устанавливались на штативах соответственно на пунктах I и II. Радио-

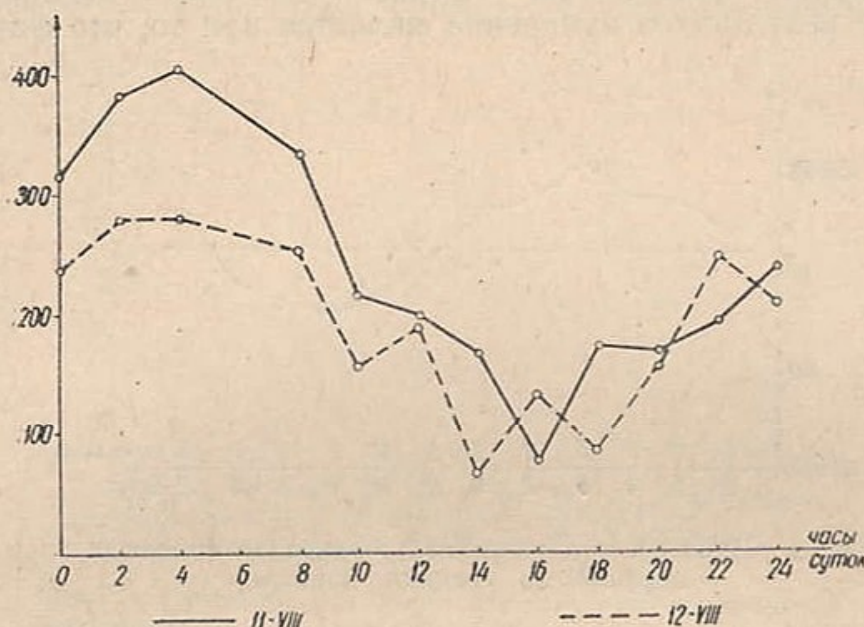


Рис. 3. Суточные изменения результатов радиодальномерных измерений при безоблачной (11. VIII) и переменной (12. VIII) погоде.

дальномерные измерения велись круглосуточно по четным часам суток, причем в каждый четный час выполнялся один прием на 12 несущих частотах. Иногда из-за непогоды или по организационным причинам измерения прерывались. Метеорологические элементы — давление B , влажность e , температура T — измерялись как на пункте I, так и на пункте II. Ручным анемометром на пункте I измерялась скорость ветра, фиксировалась облачность по пятибальной системе: 0 — безоблачно, $1/4$, $1/2$, $3/4$ — покрытие видимого небосвода облаками на одну, две и три четверти, 1 — полное покрытие облаками. Всего на базисе было выполнено 120 приемов, так что за время измерений на каждый четный час суток пришлось порядка 10 приемов. Точность одного приема радиодальномерных измерений, вычисленная по внутренней сходимости всех наблюдений, характеризуется средней квадратической ошибкой, равной ± 86 мм. Среднее значение длины эталона по радиодальномерным измерениям — 10115,224 м. Длина эталона по измерениям инвариантными проволоками — 10115,341 м. Постоянная поправка по этим данным оказалась равной +117 мм, по паспортным данным +100 мм, т. е. поправки достаточно согласуются.

Результаты наблюдений имели явно выраженный суточный ход. Этот ход хорошо прослеживается как по измерениям за отдельные сутки, так и по средним наблюдениям за весь период постановки эксперимента на эталоне.

На рис. 3 показаны изменения результатов измерений за отдельные сутки при безоблачной и переменной погоде. Амплитуда этих из-

менений достигает 31 и 22 см, что при длине линии в 10 км весьма существенно. При этом ночные измерения несколько преувеличены, а дневные несколько приуменьшены. Конечно, отдельные приемы наблюдений обременены ошибками случайного характера.

Большой интерес представляют графики результатов наблюдений по средним данным, где случайные погрешности значительно ослаблены. Такой график показан на рис. 4. Осредненная кривая имеет амплитуду 15 см, она достаточно плавная, без значительных изломов. Максимум приходится примерно на 6 ч, минимум — на 16 ч. Причиной суточного хода результатов измерений является или то, что формула для

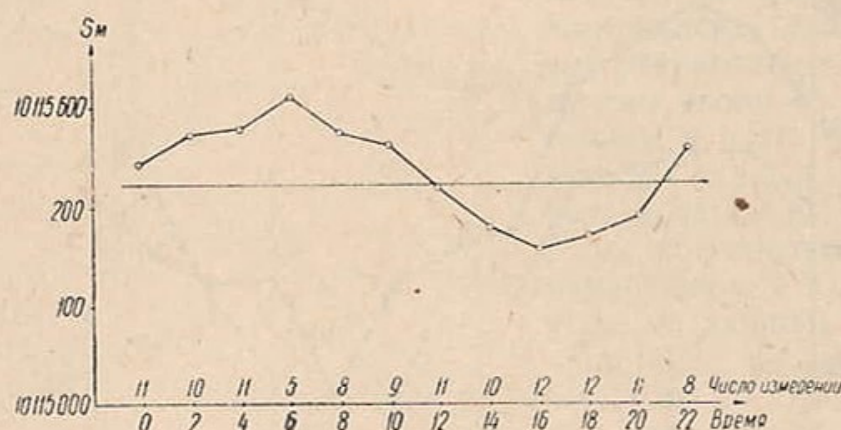


Рис. 4. Суточный ход результатов радиодальномерных измерений по средним данным.

показателя преломления n не верна в пределах суточных изменений метеорологических элементов, или, что вероятнее всего, вычисленное значение n не характеризует состояния воздуха на всем пути прохождения сигнала, так как метеозамеры измерялись только на концах линии. Наконец, можно еще допустить, что измерение метеозамеров сопровождалось систематическими ошибками, имеющими суточную амплитуду. Однако последнее предположение, видимо, не правдоподобно. Понятно, что здесь мы имеем дело с изменением времени прохождения радиоволн, выраженном в виде кажущегося изменения расстояния.

Суточный ход результатов радиодальномерных измерений наблюдался и другими исследователями. Интересно, что в работе [10] описывается суточный ход, подобный тому, что наблюдался и нами, т. е. максимальные значения расстояний приходились на ночное время, минимальные — на дневное. Наоборот, в работах [1, 2], например, описывается обратная картина: значения расстояний, полученные в ночные часы, оказывались приуменьшенными. Представляется, что здесь нет противоречий и причины таких различных суточных изменений могут быть объяснены. Видимо, все зависит от характера распределения влажности с высотой. В свободной атмосфере упругость водяного пара e убывает с высотой однако в приземном слое иногда наблюдается обратная картина — возрастание влажности с высотой, т. е. инверсия влажности. Очень часто инверсия влажности имеет место в воздушном слое с инверсией температуры. Это явление хорошо известно в физике под названием термодиффузии, когда в смеси газов более легкий газ (здесь водяной пар) диффундирует в сторону более высоких температур.

Термодиффузия влажности в приземном слое воздуха наблюдалась автором в 1956 г. [5]. Заметим, что характер распределения влажности с высотой изучен еще недостаточно прежде всего из-за ненадежности

современных массовых наблюдений над влажностью на высотах и сложной структуры распределения влажности в тропосфере, особенно в ее приземном слое. Тем не менее явление инверсии влажности в метеорологии известно [6, 7]. Не исключено, что в будущем представится возможность по характеру изменения радиодальномерных измерений определять характер распределения влажности с высотой, т. е. будет решаться обратная задача. Если во время дневных измерений луч идет в воздушных слоях с нормальным распределением температуры (убывание влажности с высотой), а ночью — в слоях с инверсионным рас-

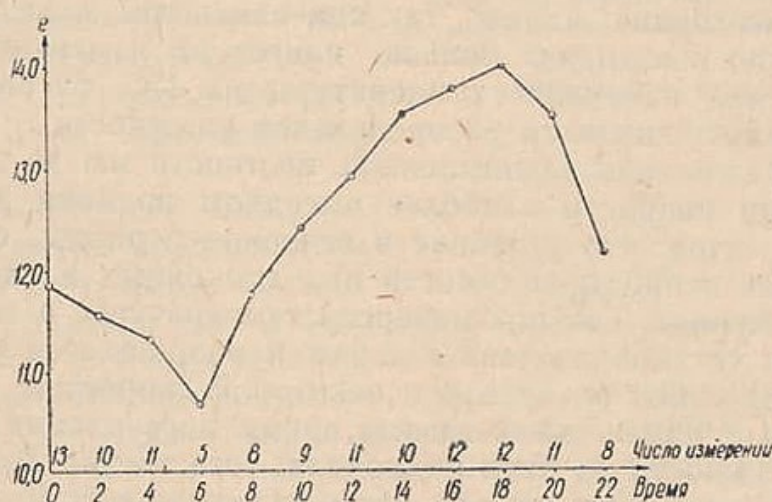


Рис. 5. Суточный ход упругости водяного пара по осредненным результатам измерений у ведущей и ведомой станций.

пределением температуры (возрастание влажности с высотой), то должна наблюдаться картина, имевшая место в нашем случае и описанная в работе [10]. В условиях всхолмленного района, как правило, будет иметь место суточный ход с максимумом ночью, так как инверсионный слой температуры, а значит в большинстве случаев и влажности, довольно часто распространяется на высоту 100—200 и более метров, т. е. выше уровня прохождения луча. В горном районе, когда радиосигнал идет на большой высоте, до которой слой инверсии влажности не достигает, должен наблюдаться суточный ход с минимумом ночью. Итак, есть основание полагать, что при инверсии температуры (обычно ночью, ранним утром и поздним вечером), в условиях всхолмленного района влажность, измеренная на концах линии, меньше по сравнению с той, которая имеет место на высоте луча.

Возникает вопрос: действительно ли в наших измерениях причиной суточного хода является неточный учет влажности? Анализируя возможные причины суточных изменений результатов измерений расстояния, мы построили по измерениям влажности у ведущей и ведомой станции за весь период наблюдений осредненный график изменения абсолютной влажности e в течение суток (рис. 5). Оказалось, что абсолютная влажность также имеет суточный ход, причем, во-первых, влажность в ночные часы меньше, чем в дневные, что, впрочем, известно из метеорологии, а, во-вторых, суточный ход влажности находится в обратной корреляционной связи с суточным ходом расстояния: в 6 ч влажность минимальна, расстояние максимально; в 16 ч влажность максимальна, расстояние минимально.

Все это еще раз подтверждает, что так как мы измеряли влажность на высоте ведущей и ведомой станций ($i=1,5$ м), а радиоволны

проходили на средней высоте 37,5 м, то днем мы завышали влажность по сравнению с той, которая имела место на пути распространения радиоволн, а значит, занижали расстояние. Ночью, наоборот, влажность, принимаемая в расчет, была меньше фактической на пути электромагнитных колебаний. В результате ночные измерения завышены.

Простые расчеты показывают, что если влажность на пути радиоволн ночью была больше, а днем меньше измеренной на 1 мм рт. ст., то этого достаточно, чтобы появился суточный ход расстояния примерно такого размаха, который имеет место в наших измерениях. Напомним, что инверсионное распределение температуры способствует занижению измеренных расстояний; однако, так как изменение влажности на 1 мм рт. ст. примерно в пять раз больше влияет на изменение показателя преломления, чем изменение температуры на 1°C, то результирующее влияние оказывает характер распределения влажности.

Таким образом, для всхолмленной местности мы до некоторой степени разрешили вопрос о наиболее выгодном времени радионаблюдений в течение суток: это утренние и вечерние периоды, охватывающие так называемые периоды видимости при спокойных и слегка колеблющихся изображениях. Так как инверсия температуры, а за ней и инверсия влажности устанавливается вечером и разрушается утром начиная с самых низких слоев воздуха и с некоторой скоростью распространяется вверх, то с изменением высоты время наступления минимальных градиентов влажности на пути радиоволн, естественно, будет несколько изменяться. В нашем случае это промежутки между 9—12 ч утром и 18—22 ч вечером. Возможно, установление и разрушение инверсий влажности несколько запаздывает по сравнению с инверсией температуры. Добавим, что в предгорном районе при значительно большей высоте луча над подстилающей поверхностью (более 150 м) в 1957 г. сотрудники кафедры инженерной геодезии наблюдали этим радиодальномером обратную картину, т. е. приуменьшенные значения расстояний ночью и преувеличенные днем.

Перейдем теперь к изложению результатов исследований на других сторонах триангуляционной сети (рис. 2). Триангуляционная сеть была отнаблюдена еще в 1961 г., а затем, после измерения базиса, уравнена как свободная. Точность сети может быть охарактеризована следующими величинами: средняя квадратическая ошибка уравнированного угла $m_{\beta} = \pm 0'', 32$; ошибка в логарифме наиболее удаленной стороны $m_{lg a} = \pm 9,4$ единиц седьмого знака; относительная ошибка в логарифме этой стороны

$$\frac{1}{N} = \frac{m_{lg a}}{\mu \cdot 10^7} = \frac{1}{460\,000}.$$

Таким образом, все стороны сети известны с ошибкой не ниже $\frac{1}{500\,000}$. Сеть содержит 9 пунктов и 17 сторон. Средняя длина сторон —

10 км, минимальная — 5 км, максимальная — 13 км. Характер профилей по всем направлениям подобен профилю по замыкающей ломаного базиса (рис. 1). Поверхность земли по всем направлениям покрыта лесами, садами, сельскохозяйственными, преимущественно колосовыми, культурами, хорошо поглощающими радиоволны десятисантиметрового диапазона. Оголенные, гладкие поверхности по направлениям отсутствуют. В результате по всем линиям величина дисперсии показаний электронно-лучевой трубки при измерениях на различных несущих частотах в среднем составляет 2 ммк/сек, не превышает 5 ммк/сек и носит квази-

гармонический характер, что указывает на отсутствие сколь-либо заметных отражений от земли. Монотонных увеличений или уменьшений отсчетов на всем диапазоне несущих частот не обнаружено ни по одному направлению. Колебания времени распространения электромагнитных волн — τ в отдельных приемах наблюдений на эталоне и на линиях сети сгруппированы в табл. 1.

Замечено, однако, что максимальные отсчеты электронно-лучевой трубки приходятся вблизи двенадцатого деления шкалы резонатора; минимальные значения отсчетов имеют место в начале диапазона несущих частот. Это объясняется инструментальными погрешностями (внутренними отражениями), а не отражениями от земли.

Радиодальномерные измерения на всех линиях проводились по однотипной программе: выполнялось восемь приемов на 12 несущих частотах, причем четыре приема выполнялось днем, два — в первой половине дня, два — во второй, примерно симметрично относительно полудня и в указанные периоды; четыре приема выполнялось ночью последовательно один за другим. Такая программа измерения линий позволяла проверить закономерности атмосферных влияний, обнаруженных на базисе, и выяснить эффективность радиодальномерных измерений, проводимых в найденные наиболее благоприятные периоды. Непосредственно измеренные расстояния были приведены к центрам знаков, редуцированы на уровень моря, в предположении совпадения уровенной поверхности с референц-эллипсоидом, а затем спроектированы на плоскость Гаусса. При этом были вычислены длины линий сети:

S_{ci} — средние из всех восьми приемов наблюдений;

S_{di} — из четырех дневных приемов;

S_{ni} — из четырех ночных приемов;

S_{ti} — полученные из триангуляции.

Значения расстояний S_{di} и S_{ni} , а также разности $d_i = S_{di} - S_{ni}$ приведены в табл. 2. Легко заметить, что в этих разностях преобладает отрицательный знак. Следовательно, как и на эталоне, при измерении линий сети ночью мы получали завышенные значения длин по сравнению с дневными измерениями. Разности d_i вызваны преимущественно неточным учетом метеорологических элементов, а также инструментальными ошибками и содержат как систематическую, так и случайную части. Рассматривая дневные и ночные измерения как двойные измерения, определим коэффициент случайного влияния λ .

$$\lambda = \frac{[d_i]}{[S_i]}; \quad (1)$$

$$\lambda = 3,23 \cdot 10^{-6}.$$

Затем исключим из разностей d_i систематическую часть

$$d'_i = d_i - \lambda S_i. \quad (2)$$

Таблица 1

Пределы колебаний τ -времени распространения электромагнитных волн при измерениях на различных несущих частотах

Пределы колебаний τ , н/сек	Число приемов
0—1,0	7
1,1—2,0	145
2,1—3,0	88
3,1—4,0	12
более 4	14

Результаты измерения длин линий днем и ночью

Линии	$S_{д,м}$	$S_{н,м}$	$d_i = S_{дi} - S_{нi,мм}$
I—IX	10 576 446	10 576,583	— 137
I—VII	5 795,699	5 795,717	— 18
I—VIII	9 004,960	9 005,058	— 98
VIII—VII	9 483,818	9 483,989	— 171
VIII—VI	10 745,198	10 745,221	— 23
VIII—IX	5 977,164	5 977,144	+ 20
VIII—V	9 343,316	9 343,292	+ 24
VI—V	11 770,446	11 770,444	+ 2
VI—VII	13 161,707	13 161,801	— 94
IX—II	10 583,768	10 583,776	— 8
IX—III	11 088,403	11 088,424	— 21
IX—IV	12 133,636	12 133,643	— 7
IX—V	10 547,557	10 547,594	— 37
IV—V	10 617,518	10 617,527	— 9
IV—VII	9 927,090	9 927,094	— 4
II—III	13 524,645	13 524,596	+ 51
$[S]=164 \text{ км.}$		$[d_i] = -530 \text{ мм}$	

Теперь определим коэффициент случайного влияния μ

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\left[\frac{d_i'^2}{S_i} \right]}{n-1}}, \quad (3)$$

где n — число линий.

Заметим, что введение в формулу (3) веса $P_i = \frac{1}{S_i}$ не изменит существенно значения μ , так как сеть примерно равносторонняя, что, впрочем, соответствует характеру радиодальномерных измерений, точность которых мало зависит от длины и, кроме того, d_i' содержат только случайную часть ошибок измерений. Вычисления дают $\mu = \pm 19,66 \cdot 10^{-6}$.

Как известно, определение λ по результатам двойных измерений обычно дает заниженные значения, ибо разности d_i' еще ничего не говорят об абсолютных величинах систематических ошибок в рядах измерений. Чтобы произвести более надежное определение μ и λ и выяснить, действительно ли дневные наблюдения, выполненные в благоприятные периоды, не содержат существенных систематических ошибок, произведем сравнительную оценку результатов радиодальномерных измерений с длинами линий, полученными из триангуляции, принимая эти последние за близкие к истинным. Результаты сравнения сведены в табл. 3. Как видим, действительно, дневные результаты практически не содержат систематических ошибок ($[\Delta_d] = -3 \text{ мм}$) и более близки к истинным, чем ночные, причем последние действительно завышены ($[\Delta_n] = -559 \text{ мм}$). На основании формул (1), (2), (3) и в этом случае были вычислены коэффициенты λ_d , λ_n и μ_d , μ_n для дневных и ночных результатов:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= 0,02 \cdot 10^{-6}; \quad \lambda_n = 3,41 \cdot 10^{-6}; \\ \mu_d &= 18,07 \cdot 10^{-6}; \quad \mu_n = 21,33 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Сравнение с триангуляцией результатов радиодальномерных измерений, выполненных днем и ночью

Линии	$S_{Ti}, м$	$S_{di}, м$	$\Delta_{di} = S_{Ti} - S_{di}, мм$	$\frac{\Delta_{di}}{S_i}$	$S_{ni}, м$	$\Delta_{ni} = S_{Ti} - S_{ni}, мм$	$\frac{\Delta_{ni}}{S_i}$
I—IX	10576.558	10576.446	+112	1: 54 000	10576.583	— 25	1:423 000
I—VII	5795.667	5795.699	— 32	1:181 000	5795.717	— 50	1:116 000
I—VIII	9004.976	9004.960	+ 16	1:563 000	9005.058	— 82	1:110 000
VIII—VII	9483.826	9483.818	+ 8	1:1580000	9483.989	—163	1: 58 000
VIII—VI	10745.272	10745.198	+ 74	1:145 000	10745.221	+ 51	1:217 000
VIII—IX	5972.156	5977.164	— 8	1:747 000	5977.144	— 12	1:498 000
VIII—V	9343.181	9343.316	—135	1: 57 000	9343.292	—111	1: 84 200
VI—V	11770.473	11770.446	+ 27	1:436 000	11770.444	+ 29	1:406 000
VI—VII	13161.665	13161.707	— 42	1:313 000	13161.801	—136	1: 97 000
IX—II	10583.805	10583.768	+ 37	1:286 000	10583.776	+ 29	1:365 000
IX—III	11088.424	11088.403	+ 21	1:528 000	11088.424	0	—
IX—IV	12133.607	12133.636	— 29	1:414 000	12133.643	— 36	1:337 000
IX—V	10547.495	10547.557	— 62	1:170 000	10547.594	— 99	1:104 000
IV—V	10617.514	10617.518	— 4	1:2656000	10517.527	— 13	1:817 000
IV—VII	9927.102	9927.090	+ 12	1:827 000	9927.094	+ 8	1:1240000
II—III	13524.647	13524.645	+ 2	1:6742000	13524.596	+ 51	1:265 000

$$\sigma S \approx 10,2 \text{ км } [\Delta_d] = - 3 \text{ мм}$$

$$[\Delta_n] = - 559 \text{ мм}$$

$$\text{средние относ. ошибки } 1:920 \text{ 000}$$

$$1:390 \text{ 000}$$

$$m_d = \pm 54 \text{ мм};$$

$$m_n = \pm 73 \text{ мм}$$

$$\frac{m_d}{S_{cp}} = \frac{1}{190000};$$

$$\frac{m_n}{S_{cp}} = \frac{1}{140000}.$$

Сравнивая величины μ_d и μ_n с ранее вычисленным μ , видим, что они достаточно согласуются. В то же время возрастает коэффициент случайного влияния с переходом к ночным измерениям. Что касается коэффициента систематического влияния, то поскольку λ_d примерно в два с половиной порядка меньше λ_n , коэффициент λ , полученный по результатам двойных измерений, определен надежно, хорошо согласуется с λ_n и, следовательно, относится именно к ночным измерениям.

Аналогичным образом рассмотрим вопрос о точности радиодальномерных измерений из суточных программ, вернее из всех восьми приемов наблюдений каждой линии. Заметим, что заранее можно ожидать не повышения, а понижения точности S_{ci} по сравнению с S_{di} , так как значения линий S_{ci} обременены систематическими ошибками, содержащимися в ночных приемах измерений. Значения линий S_{ci} и S_{Ti} , а также $\Delta_{ci} = S_{Ti} - S_{ci}$ приведены в табл. 4. Как видим, $[\Delta_{ci}] = -268 \text{ мм}$, т. е. линии S_{ci} в своем большинстве завышены. Были также подсчитаны коэффициенты случайного и систематического влияния μ_c и λ_c :

$$\mu_c = 17,39 \cdot 10^{-6}; \quad \lambda_c = 1,63 \cdot 10^{-6}.$$

Действительно, хотя коэффициент случайного влияния уменьшился, а коэффициент систематического влияния стал примерно вдвое меньше по сравнению с λ_n , λ_c остался примерно в 100 раз больше λ_d , а это означает, что дневные измерения из четырех приемов точнее суточных (дневных и ночных) из восьми приемов.

Сравнение средних из 8 приемов результатов радиодальномерных наблюдений с триангуляцией

Линии	$S_{Ti}, \text{ м}$	$S_{ci}, \text{ м}$	$\Delta_{ci} = \frac{S_{Ti} - S_{ci}}{\text{мм}}$	$\frac{\Delta_{ci}}{S_i}$
I—IX	10 576.558	10 576.514	+ 44	1: 240.000
I—VII	5 795.667	5 795.708	— 41	1: 141.000
I—VIII	9 004 976	9 005.009	— 31	1: 273.000
VIII—VII	9 483.826	9 483.904	— 78	1: 122.000
VIII—VI	10 745 272	10 745.210	+ 62	1: 173.000
VIII—IX	5 977 156	5 977.154	+ 2	1: 2 988.000
VIII—V	9 343.181	9 343.304	— 123	1: 76.000
VI—V	11 770 473	11 770.445	+ 28	1: 420.000
VI—VII	13 161.665	13 161.754	— 89	1: 148.000
IX—II	10 583 805	10 583 772	+ 33	1: 321.000
IX—III	11 088 424	11 088.414	+ 10	1: 1 100.000
IX—IV	12 133.607	12 133.640	— 33	1: 368.000
IX—V	10 547.495	10 547.576	— 81	1: 130.000
IV—V	10 617 514	10 617 522	— 8	1: 1 327.000
IV—VII	9 927.102	9 927 092	+ 10	1: 993.000
II—III	13 524.647	13 524 620	+ 27	1: 500.000

$[\Delta_{ci}] = -268 \text{ мм}$
среднее 1:580000

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}};$$

$$m = \pm 55 \text{ мм};$$

$$\frac{m}{S} = \frac{1}{185000}.$$

На основании полученных величин λ и μ подсчитаем ожидаемый продольный сдвиг для вытянутого радиодальномерного полигонометрического хода длиной в 200 км, проложенного в условиях всхолмленного района; подсчитаем также величины ожидаемых абсолютных и относительных ошибок для линий длиной в 25 км в зависимости от времени выполнения программы наблюдений. При этом воспользуемся формулами

$$m_L^2 = \mu^2 L + \lambda^2 L^2; \quad (4)$$

$$m_S^2 = \mu^2 S + \lambda^2 S^2. \quad (5)$$

Таблица 5

Ожидаемая точность ходов радиополигонометрии в зависимости от времени производства измерений

Время выполнения наблюдений	Число приемов	Коэффициенты		$L=200 \text{ км}$		$S=25 \text{ км}$	
		λ	μ	$m_L, \text{ мм}$	$m_L:L$	$m_S, \text{ мм}$	$m_S:S$
Ночь	4	$3.41 \cdot 10^{-6}$	$21.33 \cdot 10^{-6}$	746	1:268 000	± 136	1:184 000
День и ночь	8	$1.63 \cdot 10^{-6}$	$17.39 \cdot 10^{-6}$	408	1:490 000	± 96	1:260 000
День, в наивыгоднейшие периоды	4	$0.02 \cdot 10^{-6}$	$18.07 \cdot 10^{-6}$	255	1:784 000	± 90	1:278 000

Результаты вычислений сведены в табл. 5, где, кроме упомянутых величин, приведены для наглядности λ и μ . Как видим, преимущество дневных программ, выполненных в благоприятные периоды, бесспорно, тогда как ночные измерения, особенно по величинам m_L и $m_L : L$, характеризуются недостаточной точностью. Здесь же мы имеем яркий пример того, как увеличение числа приемов не ведет к уточнению результатов измерений. Таким образом, правильный выбор времени проведения радиодальномерных измерений в условиях всхолмленного района имеет немаловажное значение и будет способствовать значительному повышению точности радиодальномерных измерений.

ВЫВОДЫ

1. В условиях всхолмленного района, когда средняя высота прохождения радиоволн над подстилающей поверхностью значительно больше высот установки ведущей и ведомой станций радиодальномера, показатель преломления $n_{1,2}$ радиоволн сантиметрового диапазона в атмосфере, определенный по измерениям метеоэлементов вблизи этих станций, не равен среднеинтегральному $\bar{n}$ на всем пути радиоволн, причем при инверсии влажности (преимущественно ночью) $n_{1,2} < \bar{n}$; при падении влажности с высотой $n_{1,2} > \bar{n}$. В результате при круглосуточных радиодальномерных измерениях одного и того же расстояния наблюдается изменение измеренных результатов относительно истинных по закону, близкому к синусоидальному. Амплитуда суточного хода измеренной линии длиной 10 км при средней высоте радиоволн над подстилающей поверхностью 30—50 м составляет по осредненным данным 15 см, а в отдельные сутки при тихой, антициклонной погоде с большими вертикальными градиентами влажности может достигать 30 см, т. е. отклонения от истинных значений составляют 7,5 и 15 см, что в относительной мере будет равно $\frac{1}{65\,000} - \frac{1}{130\,000}$. С такими погрешностями нельзя не считаться.

2. На основании многолетнего зондирования приземного слоя атмосферы и радиодальномерных измерений, выполненных рядом исследователей, а также описанных в настоящей статье, можно утверждать, что ночью структура распределения показателя преломления по высоте характеризуется максимальными градиентами. Поэтому именно ночью радиодальномерные измерения максимально искажены.

3. В условиях всхолмленного района наиболее благоприятны утренние и вечерние часы — со спокойными и слегка колеблющимися изображениями. Так как при радиодальномерных измерениях оптическая видимость не требуется, то периоды наблюдений могут быть несколько расширены и сдвинуты: утренние — к полудню; вечерние — к закату солнца. При пасмурной ветреной погоде с плотной облачностью, ранней весной и поздней осенью наблюдения можно вести на протяжении всего дня, исключая один-два часа от восхода и перед закатом солнца и близполуденное время (обычно 12—16 ч) со значительными вертикальными градиентами показателя преломления и сильными колебаниями изображений.

4. Действующая инструкция о построении государственной геодезической сети СССР рекомендует измерять стороны полигонометрии II класса шестью приемами, распределяя их по возможности равномерно в течение двух дней. В условиях всхолмленного района можно рекомендовать вести измерения в течение одного дня, в две видимости. Это

даст значительный экономический эффект и обеспечит надежную точность. Целесообразно продолжить подобного рода исследования в разнообразных физико-географических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В. И., Бондаренко В. Н. Радиодальномерные исследования в Горном Алтае. «Геодезия и картография» № 7, 1965.
2. Генике А. А. Геодезические фазовые радиодальномеры. Труды ЦНИИГАиК, вып. 164, М., 1963.
3. Злотин, В. В., Генике А. А. Радиодальномерные измерения в горно-таежных районах. «Геодезия и картография» № 7, 1965.
4. Мозжухин О. А. О выборе наиболее благоприятного периода в течение суток для проведения радиодальномерных измерений. В сб. «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», вып. 2, Изд-во Львов. ун-та, 1965.
5. Островский А. Л. Исследования по боковой рефракции в полигонометрии. Львов, 1958.
6. Подольский А. С. Температура и влажность горных склонов в сопоставлении со свободной атмосферой. Диссертация, 1959.
7. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. М., 1953.
8. Bakkelid S. Preliminary Results of studies of some Tellurometer Problems. Oslo, 1962.
9. McLellan C. D. A study of the Accuracy of the Tellurometer. „The Canadian Surveyor», vol. XIV, № 7, April, 1959.
10. Thompson M. C., Harris Jr., Janes B. und Fruthey F. E. Atmospheric Limitations on Electronic Distance-Measuring Equipment. „Journal of Geophysical Research», vol. 65, № 2, 1960.

Работа поступила
28 апреля 1968 г.