

*И. С. ТРЕВОГО, И. Ф. ГАРАСИМЧУК, В. Н. НОВОСАД*

## ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ РЕФРАКЦИЯ И ДИНАМИКА ПУНКТОВ В ГОРОДСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Горизонтальная рефракция в городской среде зависит от атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, скорости ветра, интенсивности солнечной радиации, а также времени суток и года, степени загрязнения атмосферы, наличия локальных возмущающих зон (очагов) повышенной температуры, плотности и характера застройки, рельефа и ряда других климатических и индивидуальных особенностей города. Поэтому в поисках эффективных методов ослабления и учета ошибок рефракции при угловых наблюдениях в городской триангуляции целесообразно выполнить исследования рефракционных полей в разных по классификации [5] городах.

С этой целью в трех крупных городах страны Одессе, Минске и Кишиневе мы построили экспериментальные полигоны, на которых в разные годы вели экспериментальные круглосуточные угловые и метеорологические наблюдения. Результаты исследования горизонтальной рефракции над приморским городом Одесса опубликованы в [2, 4, 6]. В данной статье освещаются исследования, выполненные в континентальных городах Минске и Кишиневе.

Влияние рефракции в сети городской триангуляции можно учесть или ослабить, детально изучив температурное поле района работ, которое на 90% характеризует поле рефракции. К сожалению, гидрометеослужба практически не ведет наблюдений за температурными полями над городами. Поэтому в изучаемых городах создана сеть метеорологических постов (до 15 в одном городе). Метеопосты расположены в основном на зданиях и по возможности на высотах прохождения визирных лучей угловых наблюдений. Большая часть метеорологических постов совмещена с пунктами экспериментальной триангуляционной сети.

Носителями пунктов в городской триангуляции выбраны высокие (до 16 этажей) капитальные здания прямоугольной или башенной формы. По два пункта в каждом городе расположены на земле за городом или на его границе (рис. 1). Длины направлений 1,6...4,4 км. Угловые и метеорологические измерения проводили круглосуточно и синхронно по специальной программе, рассчитанной на максимально возможную точность.

Исследования вели летом. Именно в этот период года согласно метеостатистике следует ожидать максимальных разностей температур  $\Delta t$  центр—окрестность и, конечно, большего влияния горизонтальной рефракции. Для угловых измерений

применялся теодолит Т 05. Каждые четверть часа в Кишиневе и треть часа в Минске выполнялся один круговой прием без перестановок лимба. Днем наблюдали на визирные цели, а ночью на мигающие люкасы с периодом мерцания 1 с. Одновременно регистрировали состояние видимости, облачности, погоды, колебание изображения в баллах (от 1 до 5) и т. п. Погода в основном была ясной и жаркой (до  $+30 \dots +33^\circ \text{C}$ ). Температура и влажность воздуха измерялись психометрами

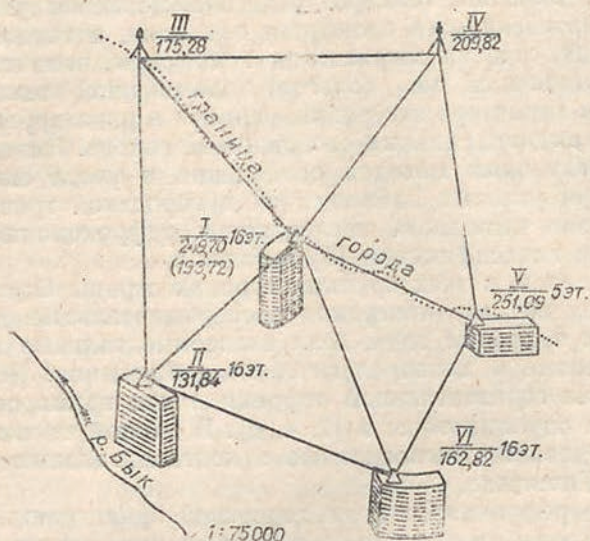


Рис. 1. Схема экспериментальной триангуляционной сети в Кишиневе.

последовательно на высотах 2, 6, 6 и 2 м. Давление воздуха измеряли барометрами-анероидами, скорость ветра анемометрами, а прямую и суммарную солнечную радиацию активометром и пиранометром. Результаты метеорологических измерений корректировались необходимыми поправками. На период наблюдений собраны и метеоданные с ближайших гидрометеорологических обсерваторий.

В континентальных городах синхронные наблюдения вели непрерывными сериями продолжительностью по 3 сут с перерывами в работе между сериями. Общий объем экспериментальных наблюдений в двух городах составил 15 сут. За этот период выполнено 936 приемов угловых наблюдений. Большая часть экспериментальных работ проведена при ясной и жаркой погоде. Угловые наблюдения в Минске вели по шести направлениям с пунктов I и II (рис. 2). Пункт I расположен в центральной части города на 14-этажном здании башенного типа. Пункт II находится на 9-этажном жилом доме ближе к восточной окраине. В Кишиневе наблюдения вели с пункта I (см. рис. 1), оборудованного на 16-этажном доме — башне на

южной окраине города. При таком выборе пунктов направления в разной степени подвержены влиянию горизонтальной рефракции, что весьма интересно.

До анализа экспериментальных наблюдений кратко рассмотрим материалы триангуляционной сети Минска за прошлые годы. Сеть триангуляции I класса представляет собой центральную систему, один пункт которой находится в центре города, а все остальные за его границей или на окраине. В центральную

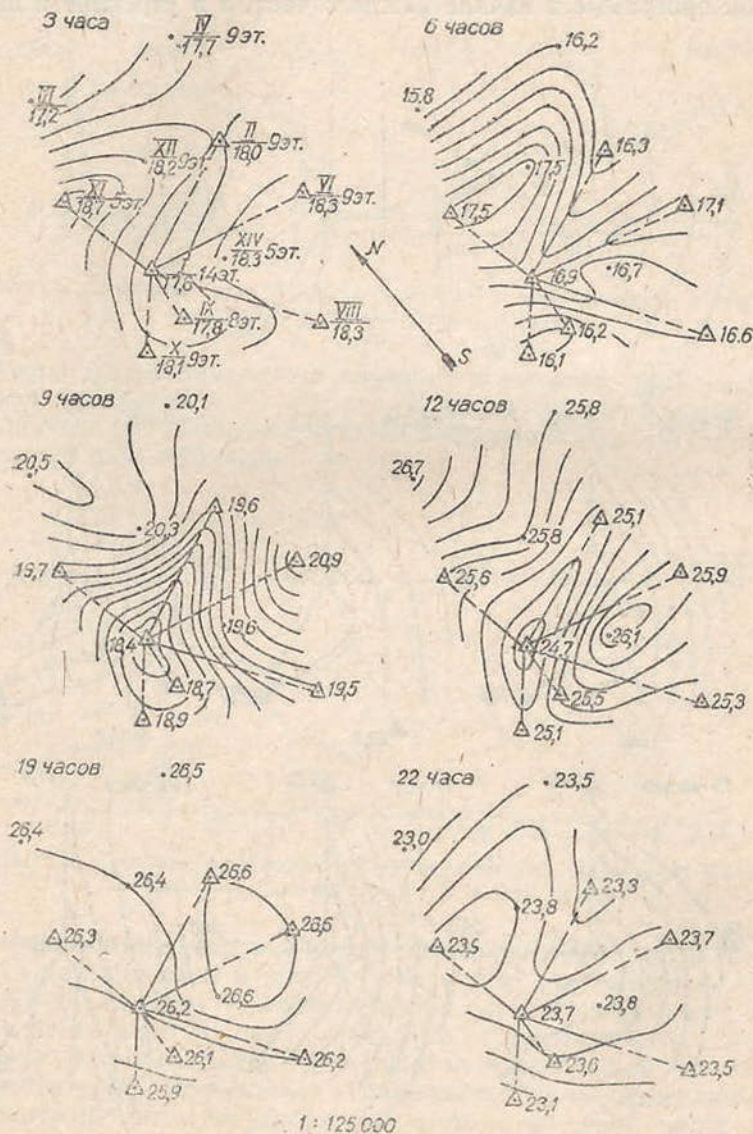


Рис. 2. Обобщенные карты изотерм температурного поля над Минском в ясную погоду (сечение  $0,2^{\circ}\text{C}$ , центральная часть города).

систему входит девять треугольников. Внешние пункты удалены на 8...9 км от центра. По материалам 1959 г. невязка сети по внешнему полигону составила  $-3,9''$ , а по периметру, схватывающему сектор наших экспериментальных работ, невязка оказалась  $-4,88''$ . Отрицательный знак невязки свидетельствует, что угловые измерения искажены горизонтальной рефракцией.

Метеорологические измерения в серии вели непрерывно по одной программе в начале каждого часа, а в утренние и вечер-

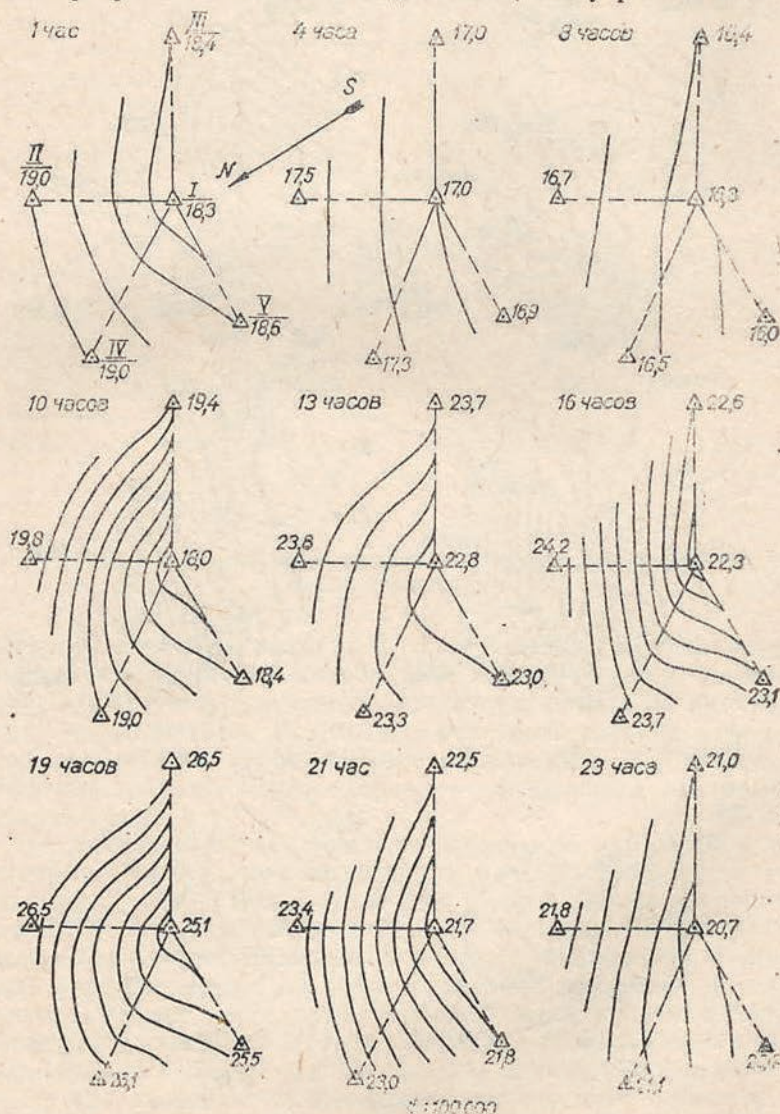


Рис. 3. Обобщенные карты изотерм температурного поля над Кышинево в ясную погоду (сечение  $0,2^{\circ}\text{C}$ ).

ние часы по две программы в час. Для реализации экспериментальных работ только в Минске использованы 28 психометров, шесть барометров, шесть анемометров и комплект приборов для измерения солнечной радиации. По результатам обработки метеорологических наблюдений в Минске и Кишиневе построены более 350 часовых и 132 обобщенных по подобию погодных условий карт изотерм. Их фрагменты на отдельные часы суток приведены на рис. 2 и 3. Пункты триангуляции на рис. 2 и 3

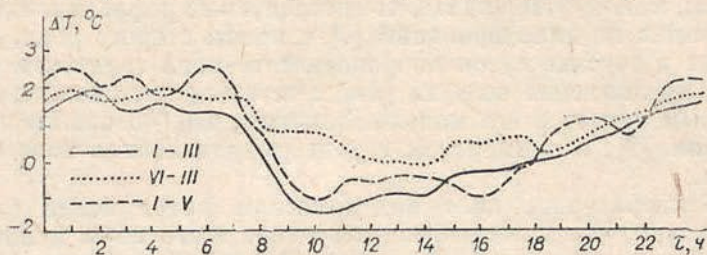


Рис. 4. Суточный ход разностей температур над Минском и его окраинами в ясную летнюю погоду.

выделены треугольниками, а метеопосты точками, температуры воздуха подписаны в °C. На рис. 2, кроме того, приведена информация о расположении пунктов экспериментальной триангуляционной сети в Минске.

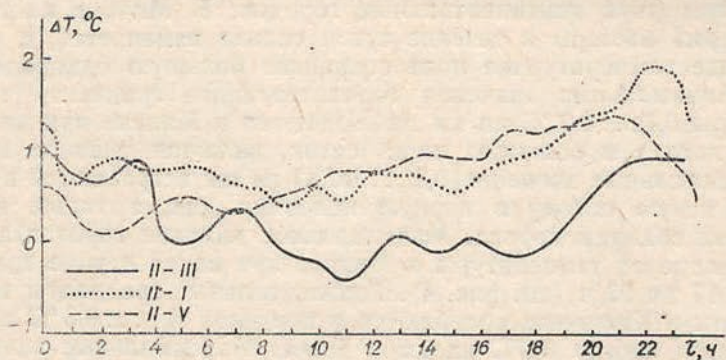


Рис. 5. Суточный ход разностей температур между центром Кишинева и его окраинами в ясную летнюю погоду.

Карты изотерм построены по температурам воздуха, измеренных на высотах 6 м для Минска и 2 м для Кишинева. Детальный анализ карт изотерм позволил сделать заключение, что в континентальных городах независимо от погодных условий существует устойчивое температурное поле, изотермы которого имеют тенденцию замыкаться и принимать форму концентрических окружностей. Судя по картам изотерм, на протяжении суток наблюдается резко выраженный ход разностей температур  $\Delta t$  между центральной и периферийными частями города (рис.

4, 5). Минимум разностей температур приходится на дневной период, а максимум наступает ночью. Отрицательные значения  $\Delta t$  на графиках можно объяснить значительной разностью высот пунктов. Пункты I и II находятся в центре Минска и Кишинева на многоэтажных зданиях, в то время как пункты III, V (рис. 4) и III (рис. 5) расположены за городом на земле. Уже суточный ход  $\Delta t_{II-V}$  (см. рис. 5) не имеет отрицательных разностей, так как оба пункта находятся на зданиях. Таким образом, можно утверждать, что исследуемые рефракционные поля относятся по классификации [4] к полям второго рода, для которых в течение суток направление вектора градиента показателя преломления воздуха  $\text{grad } n$  остается постоянным, а переменным является его модуль. Заметим, что, по нашим исследованиям [2], в приморском городе рефракционное поле первого рода.

Температурное поле над Минском имеет более сложную структуру, чем в Кишиневе, вероятнее всего из-за наличия локальных возмущающих факторов. Избежать их влияния трудно, так как Минск равнинный город с перепадами высот менее 50 метров (первая группа городов по «рельефу» [5]). В Кишиневе, в южном секторе города, отсутствуют рефракционно-опасные объекты, а визирные лучи идут гораздо выше, поскольку город расположен в широкой долине и перепады высот превосходят 100 м (третья группа городов по «рельефу» [5]) (см. рис. 1). Это и привело к заметной разнице в структуре карт изотерм двух континентальных городов. В Минске плотность и форма изотерм в течение суток сильно изменяется, а в Кишиневе температурное поле сохраняет большую однородность.

Минимальные значения горизонтального градиента температуры  $0,1 \dots 0,2^\circ\text{C}$  на км наблюдаются в Минске при пасмурной погоде в большую часть суток, включая дневное время. Максимальные значения  $0,8 \dots 1,0^\circ\text{C}$  на км встречаются в жаркую ясную погоду в первую половину дня, а также ночью вблизи границы города. Максимальное влияние горизонтального градиента температуры в Минске при ясной погоде возможно с 17 до 22 ч (см. рис. 4). Горизонтальные градиенты температуры в Кишиневе колеблются в пределах  $0,1 \dots 0,3^\circ\text{C}$  на км, достигая иногда  $0,6^\circ\text{C}$  на км и более. Максимальные значения градиентов приходятся на вторую половину суток (см. рис. 3, 5). В ясную погоду они несколько возрастают по сравнению с пасмурной.

Подобные значения горизонтальных градиентов температуры получены и для приморского города. По исследованиям [3], во Львове горизонтальные градиенты выше — до  $2,0^\circ\text{C}$  на км. Очевидно, меньшие значения градиентов получены из-за преимущественного прохождения визирных лучей в общегородском поле рефракции. Чем выше над городом, тем меньше рефракция.

Анализ измерений температуры на высотах 2 и 6 м показал, что ее вертикальный градиент сохраняет в течение суток по-

стоянный отрицательный знак для метеопостов, находящихся на зданиях.

Результаты многосуточных угловых наблюдений подвергнуты статистической обработке с целью проверки гипотезы о законе нормального распределения и проверки гипотезы об отсутствии систематических периодических ошибок.

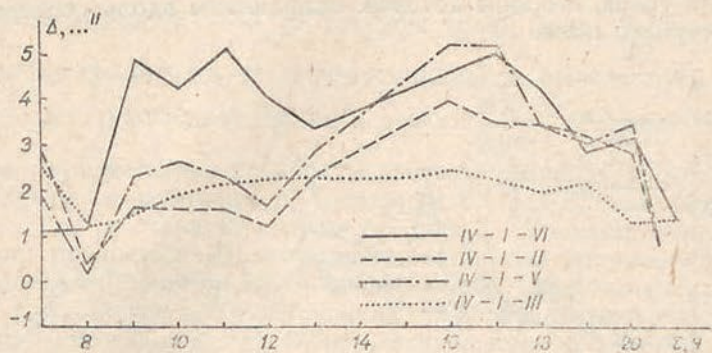


Рис. 6. Дневной ход горизонтальных углов на пункте I в Кишиневе в ясную летнюю погоду.

Проверка на нормальность распределения выполнена с помощью критерия  $\chi^2$  Пирсона. Из таблицы видно, что  $\chi^2_{\text{факт}} > \chi^2_{0,5д}$ , следовательно, гипотеза о нормальной генеральной совокупности

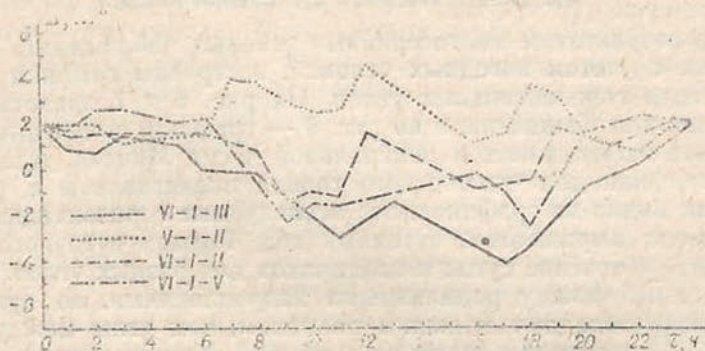


Рис. 7. Суточный ход горизонтальных углов на пункте I в Кишиневе в ясную летнюю погоду.

ти, из которой получена выборка углов, противоречит данным измерений, т. е. гипотеза о нормальности распределения отвергается.

Гипотеза об отсутствии систематических периодических ошибок проведена по критерию Аббе. В частности, для всех исследуемых углов (см. табл. 1) оказалось, что  $\tau_{\text{факт}} < \tau_{0,001}$ , следовательно, гипотеза об отсутствии систематических ошибок отвергается. Приведенные результаты позволяют предположить, что в Минске как по радиальным направлениям, так и по на-

правлениям, проходящим ближе к границам города, имеют место периодически действующие систематические ошибки, вызванные изменением в течение суток условий измерений и влиянием горизонтальной рефракции.

Подобные статистические исследования углов экспериментальной сети в Одессе показали, что гипотезы отвергаются только для углов, стороны которых направлены вдоль изотерм температурного поля.

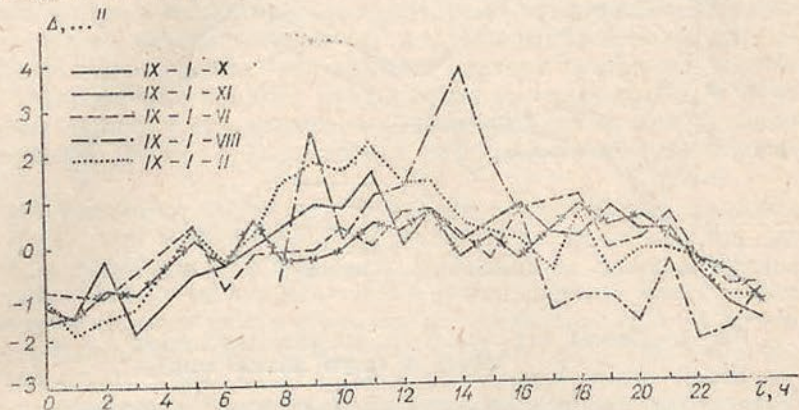


Рис. 8. Суточный ход горизонтальных углов на пункте I в центральной части Минска в ясную летнюю погоду.

По результатам многосерийных угловых наблюдений, осредненных с учетом погодных условий, построены графики суточного хода горизонтальных углов. На рис. 6 и 7 представлены графики для Кишинева, а на рис. 8 — графики, полученные при угловых наблюдениях в центральной части Минска. Аналогичные графики для приморского города представлены в [2].

Как видно из графиков, все исследуемые горизонтальные углы имеют выраженный суточный ход. Размах суточного хода меняется в течение суток и неодинаков для разных углов. Углы, измеряемые между радиальными направлениями, на пункте I в Минске обладают меньшим размахом, чем углы между произвольными направлениями на пункте II. Минимизация размаха наблюдается в пасмурную погоду. Заметно, что размах суточного хода углов резко увеличивается в дневное время. Это особенно четко видно на графиках суточного хода углов, полученных в Кишиневе (см. рис. 6, 7) и в Одессе [2]. Это же можно сказать и о графиках Минского эксперимента.

Реальные значения размаха суточного, или дневного, хода горизонтальных углов достигают 4...7" и не могут быть объяснены влиянием только горизонтальной рефракции. Поправки за рефракцию мы вычисляли по формуле из [2]

$$\delta = \frac{\rho}{S} \sum_{i=1}^{l-k} \left( \frac{dn}{dy} \right)_i x_i dx,$$



где

$$\frac{dn}{dy} = -105,25 \cdot 10^6 \frac{B}{T^2} \cdot \frac{dT}{dy}.$$

Здесь  $S$  — длина визирного луча:  $\rho'' = 206265''$ ;  $n$  — показатель преломления воздуха;  $x$  — отрезок пути по хорде световой кривой от визирной цели до текущей точки луча;  $\frac{dn}{dy}$  — горизонтальный градиент  $n$  на дифференциальном отрезке пути луча  $dx$ ;  $y$  — ось, перпендикулярная к оси  $x$ ;  $\frac{dT}{dy}$  — градиент температуры, определяемый по картам изотерм температурного поля.

Полученные величины  $\delta''$  составили  $0,1 \dots 0,2''$  в пасмурную и  $0,3 \dots 0,4''$  в жаркую солнечную погоду. Большие величины  $\delta''$  были редкостью. Максимальные величины поправок в любом городе приходится на дневной период. Причина малых величин  $\delta''$  заключается в небольших горизонтальных градиентах температуры и в том, что визирные лучи проходят на больших высотах. Одна из вероятнейших причин большого размаха хода угла, по нашему мнению [2, 5], — изменение координат пункта вследствие динамики сооружения, на котором он установлен, под влиянием внешней среды и в первую очередь солнечной радиации.

Проверить это предположение помог корректно поставленный эксперимент в Кишиневе на пункте I (см. рис. 1), расположенном на границе города. Такой подход к выбору пункта наблюдений позволил выявить совместное влияние горизонтальной рефракции и температурной деформации зданий на координаты пунктов городской триангуляции. В этом легко убедиться, если внимательно проанализировать график дневного хода углов (см. рис. 6) на пункте I, схему экспериментальной сети (см. рис. 1) и карты изотерм (см. рис. 3). Наибольшему влиянию горизонтальной рефракции подвергаются направления I—III, I—V, I—VI. Направления I—II и I—IV нерелракционноопасны. Однако угол IV—I—II (см. рис. 6) имеет дневной ход, а угол IV—I—III неизменный (см. рис. 6). Причина в том, что под влиянием прямой солнечной радиации здания пришли в движение. Наиболее интересный и показательный график дневного хода угла IV—I—III, превратившийся в прямую линию вследствие компенсации двух источников ошибок, действующих с противоположными знаками.

На основании анализа карт изотерм, графиков суточного хода горизонтальных углов, поправок за рефракцию, условий видимости и т. п. можно утверждать, что для равнинных континентальных городов благоприятным периодом угловых измерений в триангуляции является время с 17 до 22 ч и частично ночь. Для континентальных городов с перепадом высот более 100 м благоприятное время наблюдений с 22 до 6 ч. Утренняя видимость, как правило, малопригодна для работы в любых горо-

дах из-за тумана, дымки и т. п. Пасмурная погода существенно расширяет период наблюдений. Желательно избегать направлений вдоль границ города.

Необходимо принимать во внимание, что в ясную солнечную погоду возможна температурная деформация высоких носителей пунктов городской сети.

Учет горизонтальной рефракции в городской триангуляции целесообразно осуществлять путем оптимального проектирования

Значения  $\chi^2$  для исследуемых углов экспериментальной триангуляционной сети города Минска

Углы	$\chi^2$	Число степеней свободы К	$\chi^2$	P %
IX—I—X	3,90	3	2,366	27,6
IX—I—XI	11,99	4	3,360	1,8
IX—I—II	7,27	3	2,366	6,8
IX—I—VI	3,37	1	0,455	7,0
IX—I—VIII	1,38	2	1,386	50,2
VII—II—I	3,07	3	2,366	39,1
VII—II—III	8,24	3	2,366	4,3
VII—II—IV	8,95	5	4,350	11,3
VII—II—V	12,98	4	3,360	1,2
VII—II—VI	9,17	6	5,350	17,1

сетей, основанном на знании климатических и индивидуальных особенностей города и рациональной организации измерений, реализующей результаты выполненных исследований. Это позволяет отказаться от трудоемкого метода введения поправок за горизонтальную рефракцию и связанных с этим дополнительных полевых измерений.

1. *Островский А. Л.* О выгоднейшем времени измерения горизонтальных углов в триангуляции и полигонометрии // Науч. записки ЛПИ. Сер. Геодезия. 1962. № 9. С. 18—22. 2. *Островский А. Л., Тревого И. С.* Исследование горизонтальной рефракции в триангуляционной сети приморского города // Геодезия и картография. 1983. № 11. С. 90—93. 3. *Тартачинский Р. М.* Температурное поле города и его влияние на результаты угловых измерений в городской триангуляции // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1974. Вып. 19. С. 98—100. 4. *Тревого И. С.* Горизонтальная рефракция в городах с различными индивидуальными особенностями // Совершенствование аппаратных средств и таблиц для определения рефракции электромагнитных волн в земной атмосфере. Иркутск, 1984. С. 83—86. 5. *Тревого И. С.* Горизонтальная рефракция в городских геодезических сетях // Состояние и перспективы развития геодезии и картографии. М., 1986. С. 88—91. 6. *Trevogo I. S.* Investigation of Horizontal Refraction in Triangulation Network of a Seaside City // XVIII General Assembly IAG. FRG. Hamburg, 1983. P. 58—64.

Статья поступила в редколлегия 21.02.90