

УДК 528.061:522.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

© 2020 г. Д. В. Дементьев<sup>a, b, \*</sup>

<sup>a</sup>Группа Компаний “Геодезия и Строительство”, Строительный проезд, 1, Москва, 125363 Россия

<sup>b</sup>Кафедра геодезии “МИИГАиК”, Гороховский пер. 4, корп. 1, Москва, 105064 Россия

\*e-mail: [ddv@gis2000.ru](mailto:ddv@gis2000.ru); [geod@miigaik.ru](mailto:geod@miigaik.ru)

Поступила в редакцию 03.07.2019 г.

После доработки 02.09.2019 г.

Принята к публикации 25.09.2019 г.

Классические методы определения вертикальной рефракции развиваются более 300 лет, однако их точность не соответствует требуемой точности при решении большинства современных научно-прикладных задач (например, передачи высот). Это объясняется тем, что в их основе лежит положение, согласно которому оптические свойства атмосферы не изменяются в течение всего периода выполняемых измерений. Однако атмосфера непрерывно находится в турбулентном движении, из-за чего ее оптические свойства все время меняются случайным образом, что приводит к изменению рефракции. Но это свойство атмосферы при использовании классических методов определения рефракции не учитывается. В конце 60-х гг. прошлого столетия были предложены новые динамические (турбулентные) методы определения рефракции. Исследования, выполненные в Физико-Техническом институте АН ТССР в 80–90-х гг. прошлого столетия, а также в настоящее время Группой Компаний ГИС совместно с кафедрой геодезии МИИГАиК в Москве, подтверждают их высокую точность.

**Ключевые слова:** рефракция, вертикальный градиент показателя преломления, турбулентность, частота флуктуаций, углы прихода

**DOI:** 10.31857/S0002351520020029

### ВВЕДЕНИЕ

В приземном слое атмосферы в результате угловых измерений существенные искажения вносит рефракция [1]. Ошибки, вызываемые рефракцией, могут составлять 1'/км и более, т.е. превышать инструментальные ошибки на один–два порядка. Например, инструментальные угловые ошибки современных высокоточных электронных тахеометров составляют 0.5" и 1" и более. Большинство оптических измерений прикладного характера выполняется в приземном слое атмосферы, где особенно велики ошибки за рефракцию.

При оценке величины рефракции вводят понятие “коэффициента рефракции” —  $k$ . Точечным коэффициентом рефракции  $k$  называется отношение среднего радиуса Земли  $R_3 = 6\,371\,302$  м к точечному радиусу световой кривой  $R_c$

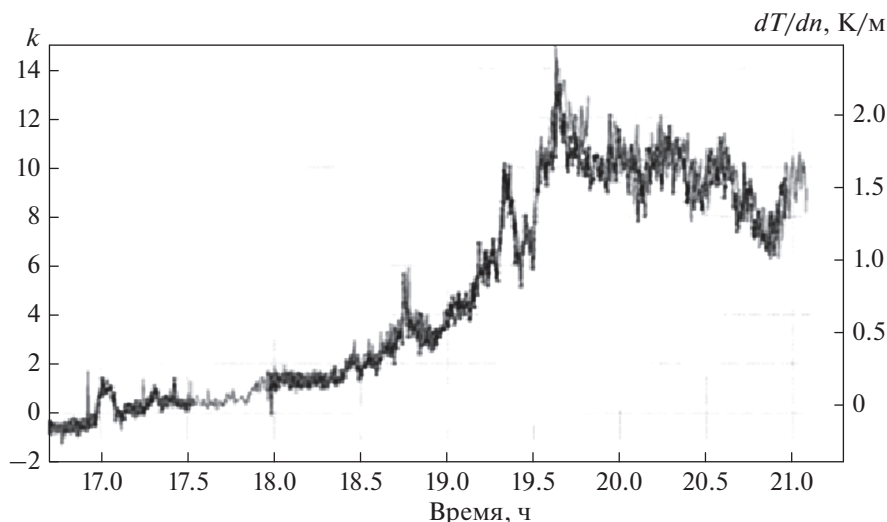
$$k = R_3/R_c.$$

В зависимости от условий наблюдений значения  $k$  могут изменяться в значительном диапазоне. Так, например, в 1977 г. Хьюбнер в солнечные дни наблюдал коэффициенты рефракции в пре-

делах от  $-8$  до  $+16$  на высоте порядка 50 см относительно подстилающей поверхности [2], что соответствует отклонению луча в вертикальной плоскости от  $-129.6''$  до  $+259.2''$  на 1 км. Следовательно, поиск путей определения рефракции и ее учета весьма актуален. К настоящему времени разработано несколько десятков методов определения рефракции [3], большая часть которых основана на положении, что оптические свойства атмосферы не изменяются на протяжении всего периода измерений, т.е. статичны. Эти методы рефракции используются более 300 лет [3]. Практически все они основываются на теории Ньютона. Однако, в настоящее время сложилось устойчивое мнение, что “...несмотря на многолетние усилия проблема учета рефракции в геодезических измерениях не получила даже удовлетворительного практического решения” [4].

### ОСНОВЫ ВИЗУАЛЬНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕФРАКЦИИ

При оценке рефракции необходимо принимать во внимание, что атмосфера неоднородна: ее плотность меняется с высотой и в значительно



**Рис. 1.** Ход коэффициента рефракции  $k$ , полученный 9.09.2008 на основании синхронного измерения взаимных зенитных расстояний двумя электронными тахеометрами Leica TCRP 1201, установленными на концах трассы протяженностью 805 м. Инструментальная точность приборов 1" [5].

меньшей степени в горизонтальном направлении. Кроме того, атмосфера всегда находится в турбулентном движении. Вследствие этого возникают пульсации полей метеоэлементов: температуры, давления, влажности и скорости ветра, что, в свою очередь, вызывают пульсации показателя преломления воздуха, а следовательно, и рефракции. Поэтому формулы определения рефракции, основанные на выводах Ньютона для преломления света в статически устойчивых слоях атмосферы, не обеспечивают достаточной точности из-за хаотического изменения показателя преломления воздуха в реальной атмосфере.

Рефракция в реальной атмосфере представляет собой случайный быстро изменяющийся процесс, зависящий от многих трудно учитываемых фактов качества примера, на рис. 1 [5] показана часть дневного хода коэффициента рефракции, полученного 9.09.2008 в 100 км южнее Гамбурга. Из рис. 1 видно, что в течение 4 ч коэффициент рефракции  $k$  изменяется случайным образом в диапазоне от  $-1$  до  $+15$ . Как правило, для определения рефракции используются формулы, которые по умолчанию основаны на том положении, что атмосфера является средой с устойчивыми оптическими свойствами.

Однако, еще в 1975 г. [6] обращалось внимание на тот факт, что "полное освобождение наблюдений от влияния турбулентных и флуктуационных процессов в атмосфере возможно только путем непосредственного измерения угла рефракции в момент наблюдений". Несколько ранее (в 60-х гг. прошлого столетия) по этой причине для решения проблемы рефракции начали разрабатываться новые — турбулентные методы определения

рефракции, которые учитывают турбулентность атмосферы [7, 8]. К настоящему времени выполнен целый ряд экспериментальных исследований, целью которых является в основном выявление эмпирических зависимостей между рефракцией и искажениями световой волны вследствие турбулентности [3, 7–11]. Значительная часть работ посвящена разработке визуальных методов определения рефракции по амплитуде колебаний визирной цели и оценке размытия изображения регулярной миры (теста Фуко) [9–11]. Результаты экспериментальных исследований различных авторов подтверждают зависимость между величиной рефракции и амплитудой колебаний изображения визирной цели. Аналогичные результаты получены и при использовании регулярной миры (рис. 2). Так, например, в научно-исследовательском Физико-Техническом институте АН ТССР проводились исследования, в задачу которых входила сравнительная оценка двух различных визуальных методов определения рефракции, основанных на измерении амплитуды колебаний цели и оценки размытия изображения параллельной миры [12].

Кроме того, несколько сезонов подряд на полигонах с различной подстилающей поверхностью (такыр, полупустынная растительность (редкая трава) либо холмистая поверхность с низким кустарником) выполнялись исследования рефракции с использованием классических методов определения рефракции. При этом угол вертикальной рефракции определялся путем сравнения измеренных зенитных расстояний с эталонными, полученными из обработки результатов геометрического нивелирования II кл.



Рис. 2. Мира с параллельной структурой (тест Фуко) [12].

Для определения угла вертикальной рефракции  $r$  турбулентным методом на основании измерений максимальной амплитуды колебаний визирной цели  $\sigma_{\max}$  в работе [9] предложена рабочая формула

$$r = r_n + 0.05\sigma_{\max} L^{1/2} h_3^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $r_n$  — нормальное значение рефракции,  $r_n$  определяется как  $r_n = 8.13L \times 0.000244 \frac{P}{T^2}$  (здесь  $P$  — давление в мбар,  $T$  — температура воздуха, К);  $L$  — длина трассы;  $h_3$  — эквивалентная высота визирного луча. Здесь вторая часть формулы (1) характеризует аномальную составляющую угла рефракции  $r_{\text{ан}} = 0.05\sigma_{\max} L^{1/2} h_3^{-1/2}$ .

Согласно [9], данный метод довольно прост и позволяет определять рефракцию визуально сразу же по амплитуде колебаний визирной цели без использования какой-либо сложной дополнительной аппаратуры. Недостаток — невысокая точность, особенно при низких высотах визирного луча либо при развитой неустойчивой температурной стратификации.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕФРАКЦИИ ПО ФЛУКТУАЦИЯМ УГЛА ПРИХОДА

В отличие от него, метод определения рефракции по флуктуациям угла прихода, полностью автоматизирован, что исключает субъек-

тивные ошибки наблюдателя при визировании на цель и оценке амплитуды колебаний, а также позволяет определять рефракцию в реальном масштабе времени. Все эти качества дают возможность определять рефракцию с точностью, соответствующей точности используемого прибора, о чем свидетельствуют результаты исследований. К недостаткам метода относится крайне высокая стоимость приборов с автоматическим наведением на визирную цель. Хотя необходимо отметить, что еще в 70-х гг. прошлого столетия прибор для исследования рефракции по флуктуациям угла прибора был создан и успешно применялся на протяжении десятка лет в условиях Средне-Азиатской пустыни в различные сезоны года [8, 12]. Для вычисления угла вертикальной рефракции  $r$  используется усредненное значение структурной характеристики поля показателя преломления  $\bar{C}_n$  [8], которая определяется на основании измерений флуктуаций угла прихода тахеометром с автоматическим наведением на визирную цель

$$r = r_n + r_{\text{ан}} = 8.13L \left( 0.000244 \frac{P}{T^2} \pm \frac{B(\lambda)\bar{C}_n}{h^{2/3} a(Ri)} \right). \quad (2)$$

Здесь  $r_n$  — нормальная часть рефракции.  $r_n = 8.13L \times 0.000244 \frac{P}{T^2}$ ;  $r_{\text{ан}}$  — аномальная часть рефракции.  $r_{\text{ан}} = \pm 8.13L \frac{B(\lambda)\bar{C}_n}{h^{2/3} a(Ri)}$ , где  $L$  — длина трассы в см;  $P$  — давление в мбар;  $T$  — температура воздуха в К;  $B(\lambda)$  в мбар/град., зависит от длины волны  $\lambda$  [4];  $\bar{C}_n$  в  $\text{см}^{-1/3}$ ;  $h$  — эквивалентная высота трассы в см;  $a(Ri)$  — универсальная безразмерная функция [13]. Как отмечено выше, в визуальных методах при определении рефракции используется в одном случае — оценка амплитуды колебаний [14], а в другом — оценка размытия изображения миры [15]. Эти методы основаны на том, что при прохождении света через слой турбулентной атмосферы изображения протяженных объектов, удаленных от наблюдателя, оказываются размытыми из-за фазовых флуктуаций, возникающих в световой волне. Благодаря этому эффекту можно оценить величину  $C_n^2$ , а затем и рефракцию. Однако, в этом случае необходимо иметь в виду, что более мелкие, меньше, чем  $2R$  (диаметр приемного объектива), неоднородности поля показателя преломления не будут вызывать смещения изображения, а приведут к его размытию, т.е. к ухудшению качества изображения. В то же время крупномасштабные неоднородности будут вызывать смещение изображения [13]. Для визуальных наблюдений амплитуды колебаний изображения визирной цели и размытия изображения миры использовался нивелир Ni 004, который был установлен под навесом на жестком основании на высоте 220.0 см. Исследования проводились 01.10.1989 г. под Ашхабадом.

Длина трассы  $L = 1$  км, время наблюдений с 8 до 20 ч. В течение дня температура изменялась от  $+9^\circ\text{C}$  в 6 ч утра до  $+25^\circ\text{C}$  в 15 ч и  $+18^\circ\text{C}$  в 18 ч, а давление за этот период колебалось незначительно и составляло 980–985 мбар.

Для вычисления усредненного для трассы значения  $\bar{C}_n$  по размытию изображения штрихов параллельной миры использовалась формула [13]

$$\bar{C}_n = 0.6 \left( \frac{\ln \frac{4}{\pi q}}{1.46 L k^{1/3} \left( \frac{2\pi L}{M} \right)^{5/3}} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь  $q$  – контраст изображения,  $L$  – длина трассы,  $k$  – волновое число,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны,  $M$  – максимальный период миры, изображение которого наблюдается размытым.  $\bar{C}_n^2$  определяли одновременно по размытию изображения миры и по амплитуде колебаний изображения визирной цели. Полученные экспериментальные значения угла вертикальной рефракции этими способами обычно различались между собой в полтора–два раза, а иногда и более, особенно при нейтральной температурной стратификации [12]. По-видимому, различие по модулю полученных результатов объясняется тем, что оба метода работают в разных частотных диапазонах, а именно: отсчеты амплитуды колебаний изображения визирной цели выполняются на частотах менее 1 Гц, иначе оценить амплитуду визуально невозможно, а размытие миры оценивается на частотах более 10 Гц, т.е. когда глаз уже оценить не может колебания изображения из-за инерционности зрения. Так как значительная часть спектра колебаний визирной цели оказывается срезанной и не участвует в обработке данных, то получаемые этими методами значения рефракции не только отличаются друг от друга, но и оказываются заниженными по сравнению с истинными.

В последние годы ведущие зарубежные приборостроительные фирмы Швейцарии, США, Японии начали выпускать роботизированные электронные тахеометры, у которых процесс измерений полностью автоматизирован, включая поиск цели и наведение на нее.

Точность измерения направлений такими приборами очень высока и может составлять  $0.5''$  и  $1.0''$ , а частота измерений – несколько Гц. Летом 2018 г. с целью оценки возможностей использования этих приборов для определения рефракции были выполнены полевые исследования. При этом на полигоне фирмы “Геодезия и Строительство” в Москве была выбрана горизонтальная трасса протяженностью  $L = 625.22$  м с однородной подстилающей поверхностью, которая проходила вдоль Сходненского канала. Высота визирного луча составляла порядка  $1.70$  м. В табл. 1 даны результаты

наблюдений для этой трассы. Наблюдения на трассах выполнялись роботизированным электронным тахеометром Trimble S 9 днем 13.08.2018 г. В качестве примера представлены выборки зенитных расстояний для ограниченного времени наблюдений – порядка 2 мин.

В течение всего цикла наблюдений температура воздуха составляла  $20^\circ\text{C}$ , давление 1001 мбар, ветер С-З, скорость ветра – 5 м/с.

Роботизированный тахеометр устанавливался на штативе на твердом каменном основании. Аналогичные условия были и при установке штатива с отражателем на конечных точках трассы, т.е. просадок штатива в момент измерений не наблюдалось ни на станции, ни на точках установки отражателей. Поэтому можно полагать, что все искажения зенитного расстояния во время измерений, в основном, обусловлены вертикальной рефракцией. Отметки точек трасс были получены из геометрического и тригонометрического нивелирования. Углы вертикальной рефракции для каждой трассы определялись по величине разности между “истинным” зенитным расстоянием  $z_0$  и измеренным с помощью роботизированного тахеометра зенитным расстоянием  $z_{\text{и}}$ . “Истинные” значения зенитного угла  $z_0$  вычислялись на основе данных геометрического нивелирования II кл. точек полигона, на которые устанавливались электронный тахеометр и отражатель.

В табл. 1 приведены измеренные значения зенитных расстояний  $z_{\text{и}}$  для соответствующего момента наблюдений. Здесь же даны “истинные” значения зенитного угла  $z_0$ , которые получены при проведении исследований. Истинный угол вертикальной рефракции  $r$  для данного момента наблюдений получали как разность между истинным (вычисленным) зенитным расстоянием  $z_0$  и зенитным расстоянием  $z_{\text{и}}$ , измеренным с помощью роботизированного тахеометра.

$$r = z_0 - z_{\text{и}}. \quad (4)$$

Для вычисления угла вертикальной рефракции  $r_{\text{д}}$  по флуктуациям угла прихода использовалась формула (2).

На оценку точности величины рефракции влияют:

- инструментальная точность измерения вертикального направления роботизированным тахеометром, которая составляет  $1''$ ;
- точность геометрического нивелирования II кл. (средняя квадратическая ошибка 2 мм на 1 км);
- точность измерения высот инструмента и отражателя, которая составляет 2 мм.

С учетом вышесказанного, среднюю квадратическую ошибку определения истинного зенитного расстояния  $z_0$  можно принять равной  $1.5''$ , а средняя квадратическая ошибка “истинного” значе-

**Таблица 1.** Сравнение результатов определения вертикальной рефракции 13.08.18 динамическим методом  $r_d$  на трассе протяженностью 625.22 м с истинными значениями рефракции  $r$ . Начало наблюдений 15 h 06 м. Продолжительность наблюдений ~2 мин.  $z_0 = 90^\circ 02' 05.5''$  – истинное зенитное расстояние, вычисленное с учетом результатов геометрического нивелирования

№ п/п	Время, с	Измеренные зенитные расстояния $z_H$	Истинные значения угла вертикальной рефракции $r = z_0 - z_H$	Углы вертикальной рефракции $r_d$ , которые определены турбулентным методом	$\Delta r = r - r_d$
1	0 s	90°02'17.4"	-11.9"	-9.9"	-2.0"
2	7	90°02'25.5"	-20.0	-17.6	-2.4
3	14	90°02'23.5"	-18.0	-15.7	-2.3
4	21	90°02'26.3"	-20.8	-18.3	-2.5
5	28	90°02'09.6"	-4.1	-2.4	-1.6
6	35	90 02'13.6"	-8.1	-6.3	-1.8
7	42	90°02'17.4"	-11.9	-9.9	-2.0
8	49	90°02'31.6"	-26.1	-23.4	-2.7
9	56	90°02'13.2"	-7.7	-6.0	-1.7
10	63	90°02'13.2"	-7.7	-6.0	-1.7
11	70	90°02'07.9"	-2.4	-0.9	-1.5
12	77	90°02'07.5"	-2.0	-0.5	-1.5
13	84	90°02'07.5"	-2.0	-0.5	-1.5
13	91	90°02'07.1"	-1.6	-0.1	-1.5
14	98	90°02'07.1"	-1.6	-0.1	-1.5
15	105	90°02'06.7"	-1.2	+0.3	-1.5
16	112	90°02'06.7"	-1.2	+0.3	-1.5
17	119	90°02'06.7"	-1.2	+0.3	-1.5
18	126	90°02'06.7"	-1.2	+0.3	-1.5
19	133	90°02'10.7"	-5.2	-3.5	-1.7
20	140	90°02'15.5"	-10.0	8.1	-1.9
21	147	90°02'17.4"	-11.9	-9.9	-2.0
22	154	90°02'14.2"	-8.7	-6.9	-1.8
23	161	90°02'13.5"	-8.0	-6.2	-1.8
24	168	90°02'13.7"	-8.2	-6.4	-1.8

ния угла вертикальной рефракции в каждой точке временной оси характеризуется величиной не более 2".

Из табл. 1 видно, что в отдельные краткосрочные периоды наблюдений изменение зенитных расстояний на трассе 625.22 м происходило достаточно быстро – в течение менее одной минуты на довольно значительную величину ~ на 25", что свидетельствует о невозможности использования постоянных коэффициентов рефракции, полученных ранее на этой же трассе. Это подтверждает ранее сделанный в работе [9] вывод о том, что "трудности учета рефракции связаны с ее быст-

рыми изменениями во времени и пространстве". Эффект быстрого хаотического изменения величины рефракции наиболее сильно проявляется для более длинных трасс при отсутствии облачности и слабом ветре.

Как видно из табл. 1, значения рефракции, принятые за истинные и полученные турбулентным методом, практически совпадают и характеризуются средней квадратической ошибкой не более 2.5". Таким образом, выполненный эксперимент подтверждает высокую точность определения рефракции в момент измерений турбулентным методом, которая практически немного мень-

ше инструментальной точности используемого прибора – роботизированного тахеометра.

## ВЫВОДЫ

1. Как показали многочисленные экспериментальные исследования, наиболее распространенные классические методы определения рефракции, как правило, имеют сравнительно невысокую точность, которая на порядок меньше инструментальной точности современных приборов, используемых для решения прикладных задач. По этой причине классические методы определения рефракции находят ограниченное применение, так как считается, что их использование в ряде случаев может только ухудшить результаты выполненных измерений, и поэтому иногда их предлагают не использовать.

2. Результаты эксперимента соответствуют выводам многих исследователей о том, что угол рефракции быстро и значительно меняется случайным образом. Полученные данные свидетельствуют, что в течение нескольких секунд угол вертикальной рефракции может измениться на десятки угловых секунд (см. табл. 1 и рис. 1). Поэтому для повышения точности результатов необходимо вычислять рефракцию для конкретного момента наблюдений [6] и для конкретной трассы. В противном случае полученные поправки за рефракцию не будут соответствовать действительности.

3. Выполненный эксперимент с использованием роботизированного тахеометра подтверждает возможность применения метода определения рефракции по флуктуациям угла прихода в реальном масштабе времени. Полученная точность определения рефракции  $\sim 2''$ , что практически соответствует инструментальной точности используемого прибора, а систематическая ошибка рефракции вероятнее всего вызвана недостаточно точным определением высоты отражателя и инструмента, что сказалось на определении “истинного” значения угла вертикальной рефракции.

4. Для дальнейшего внедрения динамического метода определения рефракции при использовании электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирную цель требуется проведение более обширных экспериментальных исследований в различных условиях наблюдений.

5. В случае дальнейшего экспериментального подтверждения высокой точности динамического метода определения рефракции открываются значительные перспективы для разработки новых более эффективных методов и средств, позволяющих получать результаты измерений, на которые может быть значительно уменьшено (практически исключено) влияние вертикальной рефракции в турбулентной среде.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в Группе Компаний ГиС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дементьев Д.В.* Анализ классических методов учета и определения рефракции в приземном слое атмосферы // Геодезия и картография. 2019. Т. 80. № 5. С. 2–11.
2. *Hübner E.* Einfluss der terrestrischen Refraktion auf den Laserstrahl in bodennahen Luftschichten // Vermessungstechnik, 1977. V. 25(10). P. 349–353.
3. *Островский А.Л.* Современные достижения и задачи рефрактометрии при геодезических измерениях // Всесоюзное совещание по рефракции электромагнитных волн в атмосфере: Тез. Докл. Томск. 1983. С. 24–36.
4. *Мозжухин О.А.* Рефракция в нивелировании и способ ее учета. Горьков. инж. строит. и-т. Горький, 1986. Деп. в ВИНТИ 5.06.86. № 4124-В. 186 с.
5. *Hirt C., Guillaume S., Wisbar A., Bürki B., Sternberg H.* Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements // J. Geophysical Research (JGR). 2010. 115, D21102. <https://doi.org/10.1029/2010JD014067>
6. *Изотов А.А.* Соображения об исследованиях в области атмосферной рефракции // Геодезия и картография. 1975. № 1. С. 12–16.
7. *Дементьев В.Е.* Об определении вертикальной рефракции // Изв. вузов. Сер. Геодезия и Аэрофотосъемка. 1973. № 5. С. 29–31.
8. *Дементьев В.Е., Дементьев Д.В., Парамонов А.Г.* Современная геодезическая техника и ее применение. Учебное пособие для ВУЗов. Орел: Картуш, 2019. 500 с.
9. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения / Под ред. Островского А.Л. М.: Недра, 1990. 235 с.
10. *Brunner F.K.* Geodetic Refraction: Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere. Berlin. Springer, 1984. P. 216.
11. *Bahnert G.* Bildflimmern und terrestrische Refraktion // Vermessungstechnik. 1985. № 4. P. 127–128. (нем.)
12. *Дементьев В.Е.* Рефракция и миражи М.: Галлея – Принт, 2009. 391 с.
13. *Гурвич А.С., Кон А.С., Миронов В.И., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М: Наука, 1976. 278 с.
14. *Островский А.Л., Мороз А.И.* Теория и практика флуктуационного метода определения вертикальной рефракции // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2000. № 3. С. 11–29.
15. *Виноградов В.В., Сухов Г.Н., Медовиков А.С., Шаронов А.В.* Определение рефракции при геодезическом нивелировании по размытию изображения регулярных структур // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1985. № 3. С. 15–18.

## Determination of Vertical Refraction in the Surface Layer of the Atmosphere

D. V. Dementiev<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>Group of Companies "Geodesy and Construction", Stroitelny proezd, 1, Moscow, 125363 Russia

<sup>2</sup>Department of Geodesy "MIIGAiK", Gorokhovskiy per. 4, building 1, Moscow, 105064 Russia

\*e-mail: [ddv@gis2000.ru](mailto:ddv@gis2000.ru); [geod@miigaik.ru](mailto:geod@miigaik.ru)

Classical methods for determining vertical refraction have been developing for more than 300 years, but their accuracy does not correspond to the required accuracy when solving most modern scientific and applied problems (for example, transmitting heights). This is explained by the fact that they are based on the position according to which the optical properties of the atmosphere do not change during the entire period of measurements. However, the atmosphere is constantly in turbulent motion, because of which its optical properties always randomly change, which leads to a change in refraction. But this property of the atmosphere is not taken into account when using classical methods for determining refraction. At the end of the 60s of the last century, new dynamic (turbulent) methods for determining refraction were proposed. Research carried out at the Physicotechnical Institute of the Academy of Sciences of the TSSR in the 80s and 90 of the last century, as well as at present the Group of Companies GIS together with the Department of Geodesy of MIIGAiK in Moscow confirm their high accuracy.

**Keywords:** refraction, vertical gradient of the refractive index, turbulence, fluctuation frequency, angles of arrival