

УДК 528.061

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-8-13>

Результаты исследования нового турбулентного метода оценки рефракции в жаркую погоду

И. Ю. Васютинский¹, С. И. Васютинская¹, Д. В. Дементьев²✉

¹Московский государственный университет геодезии и картографии,
г. Москва, Российская Федерация

²ООО «ГиС», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: dementiev@yandex.ru

Аннотация. Одним из наиболее востребованных видов геодезических работ является тригонометрическое нивелирование. Однако во многих случаях из-за погодных условий периоды выполнения этого вида работ крайне ограничены. Особенно сложно выполнять тригонометрическое нивелирование в жаркую погоду, когда визирные цели из-за флуктуаций показателя преломления сильно размыты и их положение хаотически изменяется. В такие периоды сильно возрастают ошибки измерения зенитных расстояний, вызванных влиянием рефракции. По этой причине геодезические наблюдения рекомендуется выполнять только при благоприятных условиях, т. е. в ограниченные периоды времени (как правило, после восхода Солнца и перед его заходом). Целью данной работы является исследование точности нового турбулентного метода определения рефракции в самое неблагоприятное время наблюдений – в полдень в жаркий безоблачный день, т. е. в условиях, когда геодезические работы выполнять не рекомендуется.

Ключевые слова: атмосфера, рефракция, турбулентный метод определения рефракции, температурная стратификация, угол прихода, флуктуации показателя преломления воздуха, скважность

Для цитирования:

Васютинский И. Ю., Васютинская С. И., Дементьев Д. В. Результаты исследования нового турбулентного метода оценки рефракции в жаркую погоду. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 8–13. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-8-13>

Accuracy assessment of a novel turbulence-based refraction method under hot weather conditions

I. Yu. Vasyutinsky¹, S. I. Vasyutinskaya¹, D. V. Dementiev²✉

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

²GiS LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: dementiev@yandex.ru

Annotation: Trigonometric leveling ranks among the most sought-after geodetic survey techniques. Yet, adverse weather often severely restricts viable working periods. Hot weather poses particular challenges, as

fluctuations in the atmospheric refractive index blur sighting targets and induce chaotic positional shifts. This markedly amplifies zenith distance measurement errors due to refraction. Consequently, geodetic observations should be confined to favorable conditions, typically shortly after sunrise and before sunset. The study evaluates the accuracy of a novel turbulence-based refraction determination method under the most adverse conditions: midday on a hot, cloudless day, when such work is generally inadvisable.

Keywords: atmosphere, turbulence-based refraction determination method, temperature stratification, angle of arrival, fluctuations in the refractive index of air, borehole spacing

For citation:

Vasyutinsky I. Yu., Vasyutinskaya S. I., Dementiev D.V. (2026). Accuracy assessment of a novel turbulence-based refraction method under hot weather conditions. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 8–13. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-8-13>

Введение

Широко известно, что при выполнении тригонометрического нивелирования оптические измерения всегда рекомендуется выполнять в благоприятное для наблюдений время, т. е. при безразличной температурной стратификации атмосферы [1]. При выполнении работ в других условиях точность получаемых результатов из-за вертикальной рефракции значительно снижается, и поэтому они, как правило, могут быть использованы только для грубой оценки получаемых высот. Предложено много формул для определения вертикальной рефракции, в связи с чем в работе [2] отмечается: «Предложенных формул не меньше, чем формул поправок за рефракцию. Однако, задача учёта рефракции не нашла окончательного разрешения». В СССР обширные исследования вертикальной рефракции были проведены в ЦНИИГАИК и во Львовском политехническом институте. Как показывают исследования, точность определения рефракции большинством классических методов невысока – как правило, на один-два порядка ниже инструментальной точности используемого прибора.

Турбулентные методы определения рефракции

Турбулентные методы определения рефракции начали разрабатываться сравнительно недавно – с 70-х гг. прошлого столетия [3–6].

Это объясняется тем, что теория турбулентных методов определения рефракции базируется на классической теории рефракции, созданной Ньютоном и теории оптики турбулентной атмосферы, в создание которой внесли значительный вклад как отечественные, так и зарубежные учёные: О. Рейнольдс,

Д. И. Тейлор, Л. Ф. Ричардсон, А. М. Обухов, А. Н. Колмогоров, А. С. Монин, Л. А. Чернов, А. С. Гурвич, В. И. Миронов, М. В. Кабанов, В. В. Носов, В. Е. Зуев, В. А. Банах, В. И. Татарский, В. В. Покасов, А. М. Яглом и др.

Для получения информации о рефракции необходимо измерять искажения волны и определить зависимости между явлениями рефракции и искажениями световой волны.

От известных ранее способов турбулентные методы отличаются тем, что основаны на измерении и анализе параметров световой волны, прошедшей трассу в момент измерений [3–6].

Впервые экспериментальные исследования метода определения рефракции по флуктуациям угла прихода были выполнены в 70–80-х гг. прошлого века на геодинимическом полигоне Физико-технического института АН Туркменской ССР под Ашхабадом. При этом использовалось созданное для этой цели лазерное углоизмерительное устройство, которое автоматически измеряло направление на цель 50 раз в секунду с точностью 1".

Исследования проводились в разные сезоны года на трассах протяженностью 2,5 и 1,0 км.

С появлением роботизированных тахеометров процесс определения рефракции значительно упростился, так как эти приборы позволяют автоматически осуществлять наведение на визирную цель и выполнять регистрацию результатов наблюдений с высокой скоростью.

В данной статье на основе выполненных исследований рассматривается возможность использования этого метода в самых неблагоприятных условиях наблюдений.

Экспериментальная проверка турбулентного метода определения рефракции при неблагоприятных условиях наблюдений (при неустойчивой температурной стратификации) с помощью роботизированного тахео-

метра. В Москве была выбрана трасса протяженностью 572 м. Взятое за эталонное превышение между крайними точками было определено по программе геометрического нивелирования II класса. Тригонометрическое нивелирование между конечными точками трассы выполнялось роботизированным тахеометром с инструментальной точностью 1". Визирный луч проходил над асфальтированным тротуаром на высоте порядка 1,4 м.

Работа выполнялась в самое жаркое время солнечного дня с 10 до 16 час, когда геодезические наблюдения выполнять не рекомендуется. Температура воздуха составляла +27...+29 °С, ветер 2 м/с Ю-ЮВ, давление 754 мм рт. ст. В течение всего периода наблюдений визирная

цель хаотически колебалась и была расплывчатой, а её форма непрерывно менялась.

В качестве примера рассмотрим результаты измерений, проводимых практически непрерывно с 13 до 13 час 45 мин, со скважностью 5". Всего было выполнено 300 измерений.

Для каждого момента измерений, исходя из сравнений результатов тригонометрического и геометрического нивелирования, были получены значения углов рефракции r , принимаемые за эталонные.

Для расчета текущих значений вертикального угла рефракции r_d , полученного турбулентным методом, использовалась известная формула [6, 7]

$$r_d = r_n + r_{ан} = 8,13 L (0,000244 \frac{P}{T^2} \pm \frac{B(\lambda)\bar{C}_n}{h^{2/3} a(Ri)}). \quad (1)$$

Здесь $r_n = 8,13 L \cdot 0,000244 \frac{P}{T^2}$ – нормальная составляющая угла рефракции;

$r_{ан} = \pm \frac{8,13 \cdot L \cdot \bar{C}_n \cdot B(\lambda)}{h^{2/3} a(Ri)}$ – аномальная составляющая угла рефракции;

где L – длина трассы, в см; P – давление, в мбар; T – температура воздуха, в К; $B(\lambda)$ в мбар/град, зависит от длины волны λ [4]; \bar{C}_n – структурная характеристика поля показателя преломления в $см^{-1/3}$; h – эквивалентная высота трассы, в см; $a(Ri)$ – универсальная безразмерная функция, которая зависит от температурной стратификации атмосферы [8].

При неустойчивой температурной стратификации атмосферы преобладающее влияние оказывает аномальная составляющая угла рефракции $r_{ан}$, значение которой определяется в основном величиной \bar{C}_n

$$r_{ан} = 8,13L \frac{B(\lambda)\bar{C}_n}{h^{2/3} a(Ri)}. \quad (2)$$

Для определения структурной характеристики показателя преломления воздуха на трассе используется выражение [9]

$$\bar{C}_n = 0,30 \cdot \Delta_{\alpha(OTP)} \cdot \varphi(\alpha_R)^{-1/2} \cdot L^{-1/2} \cdot (2R)^{1/6}, \quad (3)$$

где $\Delta_{\alpha(OTP)}$ – угол прихода отражённой световой волны; L – длина трассы; R – радиус объектива

приемника; $\varphi(\alpha_R)$ – числовая функция, позволяющая определить дисперсию дрожания с учётом усредняющего действия приемного объекта и зависящая от длины трассы [10, 11].

Результаты измерений группировали в виде отдельных циклов, каждый из которых содержал 30 отсчётов зенитного расстояния при КЛ и 30 отсчётов при КП.

Данные определений угла рефракции турбулентным методом r_d и углы рефракции r , полученные с использованием результатов тригонометрического и геометрического нивелирования, которые принимались за эталонные, представлены на рис. 1 и 2 в виде графиков хода рефракции циклов измерений № 2 и № 10.

Графики рефракции для всех циклов наблюдений имеют хаотичный характер и совершенно не повторяются.



Рис. 1. Графики углов рефракции за период с 13 час 02 мин 10 с до 13 час 04 мин 35 с

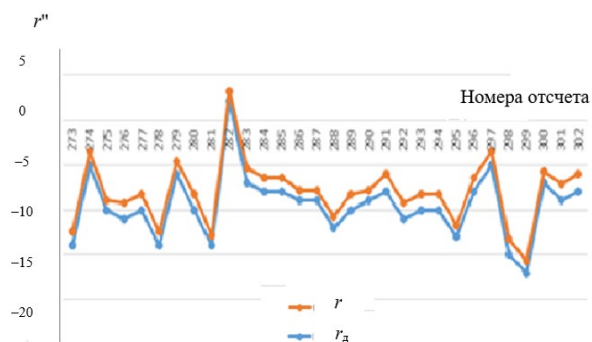


Рис. 2. Графики углов рефракции за период с 13 час 22 мин 45 сек до 13 час 25 мин 45 сек

Как видно на графиках, угол рефракции в жаркое время дня имеет в основном отрицательное значение, величина которого изменяется с большой частотой, а значения рефракции, принятые за эталонные и полученные турбулентным методом, практически совпадают и характеризуются средней квадратической ошибкой порядка 1,2".

Выполненный эксперимент подтверждает высокую точность определения рефракции динамическим методом в самых неблагоприятных условиях.

Эффект хаотического изменения величины рефракции наиболее сильно проявляется в жаркую погоду на более длинных трассах при отсутствии облачности и слабом ветре. При этом даже может возникнуть потеря видимости визирной цели.

Средняя квадратическая ошибка определения рефракции турбулентным методом r_d , вычисленная на основании сравнения с «эталонными» значениями рефракции r в текущие моменты времени, составляет 1,2".

Это лишний раз подтверждает мудрость великого мыслителя древности – Гераклита Эфесского (IV век до н. э.), что «дважды нельзя войти в одну реку». Полученные результаты свидетельствуют о том, что если не измерить величину рефракции в текущее мгновение, то, по-видимому, ее значение больше никогда не получить, особенно в тех случаях, когда измерения рефракции выполняются не одновременно с выполняемыми оптическими наблюдения или в другом месте (на другой трассе или в другом районе).

В работе также приведены результаты исследований вертикальной рефракции турбулентным методом, на трассах несколько большей протяженности при неустойчивой температурной. Были получены точности, практически соответствующие инструментальной точности используемого прибора (1 ...2"), что соответствует результатам измерений, полученным в данной работе.

Следует отметить, что разработкой турбулентных методов определения рефракции занимаются и за рубежом. В частности, исследовалась зависимость между вертикальной рефракцией и искажениями изображения визирной цели, а также дрожанием изображения и флуктуациями интенсивности принимаемого сигнала. При этом использовались геодезические приборы с ПЗС и сцинтилляторы [12,13]. Однако указанные методы определения рефракции до настоящего времени не внедрены.

Трудности внедрения этих методов обусловлены тем, что не удалось установить функциональную связь между случайными искажениями световой волны и рефракцией.

Кроме того, необходимо вычислять сложно поддающиеся учёту многие параметры, характеризующие турбулентность атмосферы.

Сознавая перспективность турбулентных методов и понимая указанные трудности, в Институте геодезии и фотограмметрии (Швейцария) сделан вывод о необходимости продолжении исследований.

Заключение

1. Эксперименты по определению рефракции на трассах различной протяженности при неустойчивой температурной стратификации атмосферы подтверждают высокую точность турбулентного метода, практически соответствующую инструментальной точности роботизированного тахеометра. Временной ход рефракции имеет случайный характер и неповторим. Угол рефракции может иметь отрицательное, но реже положительное значение. Нельзя использовать постоянный коэффициент рефракции для введения поправок в результаты измерений.

2. Турбулентный метод определения и учета величины и знака значения рефракции с использованием роботизированных тахеометров расширяет возможности тахеометрического нивелирования.

3. Турбулентный метод позволяет исключить влияние вертикальной рефракции на результаты измерений на расстояниях до 800 м, что связано с ограниченной дальностью дей-

ствия используемых приборов, а также значительно увеличить диапазон рабочего времени даже при неблагоприятных условиях наблюдений без снижения точности результатов измерений.

4. Турбулентный метод прост в реализации и не требует какой-либо доработки серийно выпускаемых электронных тахеометров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Struwe W. Beschreibung der zur Ermittlung des Hohenschiedes dem schwarzenund dem Caspischen. Meere ausgeführten Messungen. СПб., 1849. 408 p.

2. Островская С. А. Учёт вертикальной рефракции на основании взаимных наблюдений и эквивалентных высот луча. Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1983. № 3. С. 51–60.

3. Дементьев В. Е. Об определении вертикальной рефракции. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1973. № 5. С. 29–31.

4. Дементьев В. Е. Рефракция и миражи. М. : Галлея. Принт, 2009. С. 391.

5. Дементьев В. Е. Определение вертикальной рефракции по флуктуациям угла прихода светового пучка. Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 4. С. 786–796.

6. Савиных В. П., Васютинский И. Ю., Дементьев Д. В. Обзоры актуальных проблем. Вертикальная рефракция света в приземном слое атмосферы: традиционные проблемы определения рефракции и новые технические достижения. Успехи физических наук РАН. 2022. Т. 192. № 8. С. 926–943.

7. Дементьев В. Е., Васютинский И. Ю., Дементьев Д. В. Современное состояние проблемы определения вертикальной рефракции в приземном слое атмосферы. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. № 1. С. 20–29.

8. Гурвич А. С., Кон А. С., Миронов В. И., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М. : Наука, 1976. 278 с.

9. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1981. 286 с.

10. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М. : Наука, 1967. 548 с.

11. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1983. 270 с.

12. Troller M., Szintillometrie zur Refraktionskorrektur von Tachymetermessungen. VPK 2001. 9. p. 603–607.

13. Weiss A. Determination of thermal stratification and turbulence of the atmospheric surface layer over various types of terrain by optical scintillometry. Dissertation ETH Zürich. 2002.

REFERENCES

1. Struve V. (1849). The struggle for the preservation of historical and art monuments in Schwarzenegger and the Caspian Sea. *St. Petersburg*. 408 P

2. Ostrovskaya S. A. (1983). Accounting for vertical refraction based on mutual observations and equivalent beam heights. *Geodeziya, kartografiya i aerofotos'yemka [Geodesy, cartography and aerial photography]*. No. 3. pp. 51–60 [in Russian].

3. Dementiev V. E. (1973). On the definition of vertical refraction. *Izv. VUZov. «Geodeziya i aerofotos'yemka» [Izv. VUZov. "Geography and aerial photography"]*. No. 5. pp. 29–31.

4. Dementyev V. E. (2009). *Refraktsiya i mirazhi [Refraction and mirages]*. Moscow : Halley Print. P. 391 [in Russian].

5. Dementiev V. E. (1982). Determination of vertical refraction by fluctuations in the angle of arrival of a light beam. *Kvantovaya elektronika [Quantum electronics]*. Vol. 9. No. 4. pp. 786–796 [in Russian].
6. Savinykh V. P., Vasyutinsky I. Yu., Dementyev D. V. (2022). Reviews of current problems. Vertical refraction of light in the surface layer of the atmosphere: traditional problems of determining refraction and new technical achievements. *Uspekhi fizicheskikh nauk RAN [Successes of Physical Sciences of the Russian Academy of Sciences]*. Vol. 192, No. 8. pp. 926–943 [in Russian].
7. Dementyev V. E., Vasyutinskiy I. Yu., Dementyev D. V. (2021). The current state of the problem of determining vertical refraction in the surface layer of the atmosphere. *Izv. VUZov. «Geodeziya i aerofotos"yemka» [Izv. VUZov. "Geography and aerial photography"]*. No. 1. pp. 20–29 [in Russian].
8. Gurvich A. S., Kon A. S., Mironov V. I., Khmelevtsov S. S. (1976). *Lazernoye izlucheniye v turbulentnoy atmosphere [Laser radiation in a turbulent atmosphere]*. Moscow : Nauka. 278 p. [in Russian].
9. Mironov V. L. (1981). *Rasprostraneniye lazernogo puchka v turbulentnoy atmosphere [Propagation of a laser beam in a turbulent atmosphere]*. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 286 p. [in Russian].
10. Tatarsky V. I. (1967). *Rasprostraneniye voln v turbulentnoy atmosphere [Wave propagation in a turbulent atmosphere]*. Moscow : Nauka. 548 p. [in Russian].
11. Zuev V. E., Banakh V. A., Pokasov V. V. (1983). *Optika turbulentnoy atmosfery [Optics of the turbulent atmosphere]*. L. : Gidrometeoizdat. 270 p. [in Russian].
12. Troller M. (2001). Syntillometry for correcting tachymetry parameters. *VPK* 9. pp. 603–607/
13. Weiss A. (2002) Determination of thermal stratification and turbulence of the surface layer of the atmosphere over various types of terrain by optical scintillometry. *Dissertation in Zurich*.

Об авторах

Игорь Юрьевич Васютинский – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии.

Станислава Игоревна Васютинская – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики.

Дементьев Дмитрий Викторович – инженер ООО «Геодезия и строительство» (ГИС).

Author details

Igor Yu. Vasyutinsky – D.Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy.

Stanislava I. Vasyutinskaya – PhD, Associate Professor, Department of Economics.

Dementyev D. Viktorovich – Engineer of Geodesy and Construction.

Получено / Received 05.05.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.09.2025

Принята к публикации / Accepted 15.10.2025