

50 JAHRE MONIN–OBUKHOV’SCHER ÄHNLICKEITSTHEORIE

TH. FOKEN

Abt. Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Bayreuth, Deutschland

1 EINLEITUNG

Nachdem Obukhov im Jahr 1946 die universelle Länge für Austauschprozesse in der Bodenschicht gefunden hatte, war die Entwicklung der entsprechenden Ähnlichkeitstheorie durch Monin und Obukhov im Jahr 1954 eine logische Konsequenz. Diese Theorie war dann Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Messgeräte und die Durchführung vieler Experimente, was schließlich zur Formulierung der universellen Funktionen in ihrer heutigen Form führte. Der Beitrag soll einen historischen Überblick geben und den gegenwärtigen Stand der Beschreibung der Bodenschicht mit ihren spezifischen Problemen diskutieren.

Meine persönlichen und beruflichen Kontakte zu Prof. A. M. Obukhov und Prof. A. S. Monin ergaben sich durch gemeinsame Expeditionen mit russischen Kollegen. In den Jahren 1975 und 1976 war ich Teilnehmer an den Expeditionen KASPEX–75 und KASPEX–76 (Foken, et al., 1978) des Institutes für Ozeanologie Moskau (Direktor: A. S. Monin) und 1981 des Internationalen Turbulenzmessgerätevergleichsexperimentes (ITCE–81) in Tsimlyansk, Russland (Tsvang, et al., 1985) des Institutes für Physik der Atmosphäre (Direktor: A. M. Obukhov). Von 1980 bis 1990 war ich schließlich wissenschaftlicher Sekretär des KAPG–Projektes (Kooperation der Osteuropäischen Akademien der Wissenschaften im geowissenschaftlichen Bereich) “Atmosphärische Grenzschicht” initiiert durch A. M. Obukhov (Foken und Bernhardt, 1994).

2 HISTORISCHER ÜBERBLICK

Nach der Veröffentlichung der Reynolds’schen Zerlegung (Reynolds, 1894) erfuhr die Hydrodynamik zu Beginn des letzten Jahrhunderts eine deutliche Weiterentwicklung, verbunden mit den Arbeiten von Taylor (1915), Richardson (1920) und Prandtl (1925). Vor dem Zweiten Weltkrieg erfolgten dazu experimentelle Studien in der Atmosphäre hauptsächlich im deutschen Sprachraum. So definierte Schmidt (1925) in Wien den Austauschkoefizienten, Geiger (1927) fasste in München mikroklimatologische Arbeiten in seinem berühmten Buch ‘Das Klima der bodennahen Luftschicht’ zusammen (Geiger, et al., 1995) und Albrecht schrieb in Potsdam nach vielen experimentellen Studien (Kleinschmidt, 1935) die erste Arbeit über die Energiebilanz der Erde (Albrecht, 1940). Nach den fundamentalen Arbeiten zum Turbulenzspektrum (Kármán und Howarth, 1938, Taylor, 1938) wurden diese Untersuchungen während des Zweiten Weltkrieges durch russische Wissenschaftler weitergeführt, wobei Kolmogorov (1941, 1941) eine herausragende Rolle einnahm. Obukhov (1946) fand schließlich die Maßstabslänge für die Bodenschicht drei Jahre vor Lettau. Dies waren die Grundlagen für die Monin–Obukhov’sche Ähnlichkeitstheorie (1954). Zu Beginn der 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts fanden bemerkenswerte Experimente statt, im Wesentlichen verbunden mit den Namen von Lettau, Swinbank, Dyer und Tsvang. Ebenfalls zu dieser Zeit wurde die direkte Messmethode für turbulente Flüsse, die Eddy–Kovarianz–Methode, entwickelt (Montgomery, 1948, Obukhov, 1951, Swinbank, 1951). Zum Einsatz kam diese Methode aber erst nach der Entwicklung von Ultraschallanemometern durch Bovscheverov und Voronov (1960) und nur wenig später durch Kaimal und Businger (1963) und Mitsuta (1966). Diese Phasendifferenzanemometer wurden inzwischen ersetzt durch Anemometer mit Laufzeitmessung (Hanafusa, et al., 1982).

Dies war nun die Grundlage für berühmte Experimente. Einerseits die so genannten Vergleichsexperimente für Turbulenzmessgeräte (Dyer und Bradley, 1982, Miyake, et al., 1971, Tsvang, et al., 1973, Tsvang, et al., 1985), die auch einige grundsätzliche Untersuchungen enthielten, und andererseits Expe-

perimente zur speziellen Untersuchung der turbulenten Austauschprozesse, wobei das KANSAS 1968 Experiment (Izumi, 1971) eine herausragende Stellung einnahm, da es die Grundlagen für die heute allgemein verwendete universelle Funktion nach Businger et al. (1971) lieferte. Eine wichtige Zusammenfassung zu den Austauschprozessen zwischen der Atmosphäre und der Unterlage wurde 1973 durch den 'Workshop on Micrometeorology' (Haugen, 1973) gegeben.

Nach Kritiken zum experimentellen Aufbau des KANSAS Experimentes durch Wieringa (1980) und der Erwiderung durch Wyngaard et al. (1982), welche die Wiederholung des Experimentes empfahlen, sind bislang keine maßgeblichen Aktivitäten in diese Richtung durchgeführt worden. Der gegenwärtige Status sind korrigierte universelle Funktionen nach Högström (1988).

3 DIE OBUKHOV-LÄNGE

Obukhov (1946) nahm entsprechend dem Buckingham'schen Π -Theorem an, dass die Größen g/T_0 (g : Schwerebeschleunigung, T_0 : Oberflächentemperatur), v_* (Schubspannungsgeschwindigkeit) and $q/(c_p \cdot \rho)$, mit q : energetischer Wärmefluss, c_p : spezifische Wärme bei konstantem Druck und ρ : Luftdichte, die atmosphärische Turbulenz über einem Pflanzenbestand beschreiben. Alle Symbole werden analog der klassischen Quelle benutzt. Es ergibt sich nur ein Parameter mit der Dimension einer Länge, der diesen Prozess beschreibt – die Obukhov Länge –

$$L = - \frac{v_*^3}{\kappa \cdot \frac{g}{T_0} \cdot \frac{q}{c_p \cdot \rho}} \quad (1)$$

mit κ : von-Kármán-Konstante. In der Bodenschicht (Prandtl-Schicht) werden die vertikalen Flüsse als höhenkonstant angenommen:

$$\overline{w'T'} = \frac{q}{c_p \cdot \rho} = const \quad (2)$$

$$-\overline{\rho u'w'} = \tau = const \quad v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (3)$$

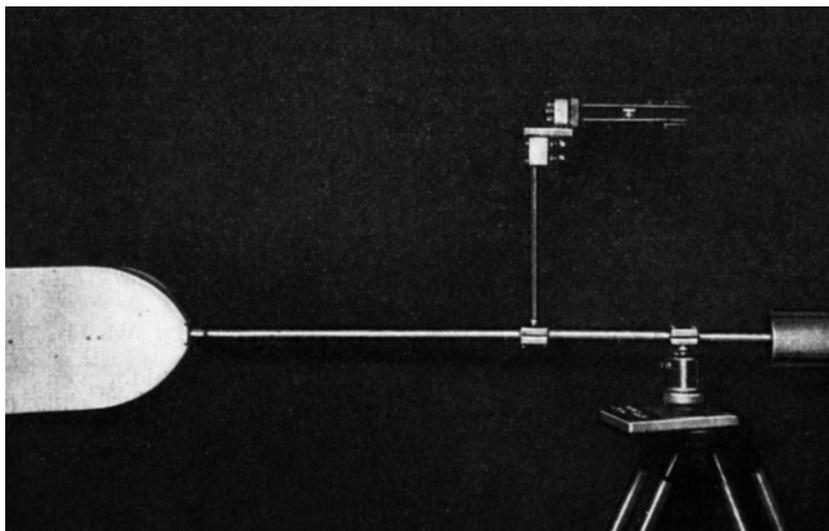


Abbildung 1: Windfahne mit zwei senkrecht zueinander stehenden Hitzdrahtanemometern zur Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit, entwickelt 1949 von Konstantinonov (Obukhov, 1951).

mit T' : Fluktuationen der Lufttemperatur, w' : Fluktuationen der vertikalen Windgeschwindigkeit und τ : Schubspannung. Da L bereits 8 Jahre vor der Monin–Obukhov’schen Ähnlichkeitstheorie (Monin und Obukhov, 1954) gefunden wurde, wird diese Länge ‘nur’ als Obukhov–Länge bezeichnet. Obukhov (1946) formulierte weiterhin, dass direkte Messungen der Schubspannung nach der Eddy–Kovarianz–Methode

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \quad (4)$$

von grundlegender Bedeutung für die Untersuchung der Bodenschicht und für die Kontrolle indirekter Methoden ist. Daraufhin entwickelte 1949 Konstantinonov (Obukhov, 1951) eine Windfahne mit zwei senkrecht zueinander stehenden Hitzdrahtanemometern zur Messung der Schubspannungsgeschwindigkeit (Abbildung 1). Diese Arbeiten waren parallel zu ähnlichen Untersuchungen von Montgomery (1948) und Swinbank (1951).

4. DIE MONIN–OBUKHOV’SCHES ÄHNLICHKEITSTHEORIE

A. S. Monin (* 02.07.1921) und A.M. Obukhov (05.05.1918 – 03.12.1989), siehe Abbildung 2, entwickelten ihre berühmte Ähnlichkeitstheorie (Monin und Obukhov, 1954) auf der Basis folgender Grundlagen:

- Experimentelle Arbeiten des Geophysikalischen Hauptobservatoriums Leningrad, im Wesentlichen verbunden mit Wissenschaftlern wie Lajchtman, Budyko, usw,
- das logarithmische Windprofil (Prandtl, 1925),
- die Verschiebungshöhe (Paeschke, 1937) und
- die Obukhov–Länge (Obukhov, 1946).



Abbildung. 2: A.S. Monin (links) und A.M. Obukhov (rechts)

Ebenfalls auf der Grundlage des Buckingham’schen Π –Theorems nahmen Monin und Obukhov für das dimensionslose Wind- und Temperaturprofil

$$\frac{\kappa \cdot z}{v_*} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \quad (6)$$

an (v : Windgeschwindigkeit und T_* : dynamische Temperatur), dass beide nur Funktionen der Parameter g/T_0 , v_* , $q/(c_p \cdot \rho)$, und der Höhe z sind. Es existiert dann nur ein dimensionsloser Koeffizient z/L . Es ist dabei anzumerken, dass die dimensionslosen Profile ohne die von–Kármán–Konstant κ und mit der turbulenten Prandtl–Zahl $Pr_t = 1$ geschrieben sind. Beide kannten Priestley’s und Swinbank’s (1947) An-

nahme, dass bei labiler Schichtung für die turbulenten Diffusionskoeffizienten von Wärme und Impuls gelten sollte $K_H > K_m$:

$$\frac{1}{Pr_t} = \frac{K_H}{K_m} > 1 \quad (7)$$

Sie nahmen jedoch $K_H = K_m$ an, da noch erhebliche experimentelle Defizite bestanden. Jedoch dokumentierten sie eine mögliche Modifikation ihrer Theorie. Mit dem gefundenen dimensionslosen Parameter z/L lässt sich das Wind- und Temperaturprofil dann mit der universellen Funktion schreiben:

$$\frac{\kappa \cdot z}{v_*} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = \varphi_1\left(\frac{z}{L}\right) \quad (8)$$

$$\frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \varphi_2\left(\frac{z}{L}\right) \quad (9)$$

Die universelle Funktion lässt sich als Reihenentwicklung für $|z/L| < 1$ mit $\beta = 0,6$ darstellen:

$$\varphi\left(\frac{z}{L}\right) = 1 + \beta \frac{z}{L} \quad (10)$$

Für stark labile Schichtung $z/L \ll -1$ wurde der Potenzansatz

$$f\left(\frac{z}{L}\right) \approx C\left(\frac{z}{L}\right)^{-1/3} + const \quad (11)$$

angenommen und für stark stabile Schichtung, $z/L \gg 1$, folgt wegen

$$K = \kappa \cdot v_* \cdot L \cdot Ri \quad (12)$$

dass $Ri \approx R = const.$ ist.

Obukhov publizierte weitere Ähnlichkeitsfunktionen, die aber völlig unabhängig von der Monin–Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie waren, wie z. B. die Ähnlichkeitsfunktion für den Temperaturstrukturparameter (Obukhov, 1960):

$$C_T^2 \approx \overline{w^2 T}^{4/3} \cdot \left(\frac{g}{T_0}\right)^{-2/3} \cdot z^{-4/3} \quad (13)$$

5. UNIVERSELLE FUNKTIONEN

Nach der Formulierung der Ähnlichkeitstheorie für die Bodenschicht gab es erhebliche experimentelle Anstrengungen, um die universellen Funktionen zu bestimmen. Erste Arbeiten stammen von Swinbank (1964, 1968), Tschalikov (1968) und Zilitinkevich und Tschalikov (1968); ein Überblick ist enthalten bei Foken (2003). Die gegenwärtig hauptsächlich genutzte universelle Funktion nach Businger et al. (1971) beruht auf den Daten des KANSAS Experiment von 1968 (Izumi, 1971) und unterscheidet sich für den Impuls und Wärmeaustausch:

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} \left(1 - 15 \frac{z}{L}\right)^{-1/4} & -2 < \frac{z}{L} < 0 \\ 1 + 4,7 \frac{z}{L} & 0 < \frac{z}{L} < 1 \end{cases}, \quad (14)$$

$$\varphi_H\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} 0,74 \cdot \left(1 - 9 \frac{z}{L}\right)^{-1/2} & -2 < \frac{z}{L} < 0 \\ 0,74 + 4,7 \frac{z}{L} & 0 < \frac{z}{L} < 1 \end{cases}. \quad (15)$$

Diese Funktionen gelten für $\kappa = 0,35$ und $Pr_t^{-1} = 1,35$.

Im Rahmen des 'Workshop on Micrometeorology' (Haugen, 1973) wurden auch grundlegende funktionelle Abhängigkeiten diskutiert, wie die O'KEYPS-Gleichung (Obukhov, Kaimal, Elliot, Yamamoto, Panofsky, Sellers):

$$\left[\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right)\right]^4 - \gamma \cdot \frac{z}{L} \left[\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right)\right]^3 = 1, \quad (16)$$

die mit der universellen Funktion von Dyer–Businger–Typ (Businger, 1988) gelöst werden kann:

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \left(1 + \gamma \cdot \frac{z}{L}\right)^{-1/4} = 1 \quad (17)$$

Der Zusammenhang dieser universellen Funktion für den Impuls mit der für fühlbare Wärme wird durch die Dyer–Businger–Gleichung beschrieben:

$$\varphi_H = \begin{cases} \varphi_m^2 & z/L < 0 \\ \varphi_m & z/L \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

Ein wichtiger Punkt ist die Normalisierung der Obukhov–Länge (Yaglom, 1977):

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \cdot \frac{1}{\text{Pr}_t} \cdot \frac{g}{T_0} \cdot \frac{w'T'}{c_p \cdot \rho}} \quad (19)$$

(u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit) die auch die turbulente Prandtl–Zahl einschließen oder auch ohne die von–Kármán–Konstante erfolgen kann, wobei Letzteres in den Arbeiten von S.S. Zilitinkevich gemacht wurde. Auch kann die turbulente Prandtl–Zahl entweder in der Profildgleichung

$$\frac{\kappa}{\text{Pr}_t} \cdot \frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \varphi_H\left(\frac{z}{L}\right) \quad (20)$$

oder in der universellen Funktion verwendet werden

$$\varphi_H\left(\frac{z}{L}\right) = \text{Pr}_t \left(1 + \gamma \cdot \frac{z}{L}\right)^{-1/2} \quad z/L < 0, \quad (21)$$

wie es von Högström (1988) gemacht wurde.

Die Obukhov–Länge wurde bislang für trockene Luft definiert. Die Anwendung der virtuellen Temperatur T_v entspricht besser dem physikalischen Prozess und stellt die Erweiterung für feuchte Luft dar:

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \cdot \frac{g}{T_{v0}} \cdot \frac{w'T'_v}{c_p \cdot \rho}} \quad (22)$$

Allerdings wurden die universellen Funktionen bislang immer für trockene Luft abgeleitet.

6 GEGENWÄRTIGER STAND DER MONIN–OBUKHOV’SCHEN ÄHNLICHKEITSTHEORIE

Die Kritik am KANSAS Experiment durch Wieringa (1980) beruhte auf Störungen des Umströmungsverhaltens des Mastes und auf einem zu hohem Overspeeding der Schalensternanemometer und auf Problemen bei den Ultraschallanemometern nach dem Phasenverschiebungsverfahren und einer unrealistischen von–Kármán–Konstante. Auf der Grundlage dieser Ursachen formulierte Högström (1988) die universellen Funktionen neu. Für die Funktion nach Businger et al. (1971) gilt danach:

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} \left(1 - 19,3 \frac{z}{L}\right)^{-1/4} & -2 < z/L < 0 \\ 1 + 6 \frac{z}{L} & 0 < z/L < 1 \end{cases}, \quad (24)$$

$$\varphi_H\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} 0,95 \cdot \left(1 - 11,6 \frac{z}{L}\right)^{-1/2} & -2 < z/L < 0 \\ 0,95 + 7,8 \frac{z}{L} & 0 < z/L < 1 \end{cases}. \quad (25)$$

Hierbei beruhen die Funktionen auf $\kappa = 0,40$ und $\text{Pr}_t^{-1} = 1,05$ ist in die universelle Funktion einbezogen.

Eine Zusammenfassung gegenwärtiger Untersuchungen zur Monin–Obukhov’schen Ähnlichkeitstheorie wurde von Högström (1996) publiziert. Ein Wert von 0.40 für die von–Kármán–Konstante ist weitgehend akzeptiert. Aber selbst heute liegt die Genauigkeit der turbulenten Prandtl–Zahl nur bei 5–10 % (siehe Tabelle 1).

Autor	Pr_t^{-1}
Businger et al. (1971)	1,35
– Korrektur nach Wieringa (1980)	1,00
– Korrektur nach Högström (1996)	1,05
Kader and Yaglom (1972)	1,15 – 1,39
Foken (1990)	1,25
Högström (1996)	1,09 ± 0,04

Tabelle 1: Werte der reziproken turbulenten Prandtl–Zahl nach verschiedenen Autoren (Foken, 2003).

Högström (1996) gab folgende Werte für die Genauigkeit der gegenwärtig genutzten universellen Funktionen an:

- $|z/L| \leq 0,5$: $|\delta\varphi_H| \leq 10 \%$,
- $|z/L| \leq 0,5$: $|\delta\varphi_m| \leq 20 \%$,
- $z/L > 0,5$: $\varphi_H, \varphi_m = \text{const} ?$ (z.B. fanden Handorf et al. (1999) $\varphi_m = 4$ für $z/L > 0,6$),
- $\varphi_H, \varphi_m = f(z_i) ?$ Entsprechend den Untersuchungen von Johannson et al.(2001) sollte eine Abhängigkeit der universellen Funktionen zur Mischungsschichthöhe z_i bestehen.

Es sollte immer bedacht werden, dass die Einschränkungen in der Genauigkeit der turbulenten Prandtl– und Schmidt–Zahl als auch der universellen Funktionen immer auch Einschränkungen in der Genauigkeit von Wettervorhersage- und Klimamodellen sind! Ein weiteres Problem ist das so genannte Residuum in der Energiebilanzschließung (Culf, et al., 2004, Foken, 1998). Ein zusätzlicher Einfluss auf die Genauigkeit der universellen Funktionen wäre gegeben, wenn die ungeschlossene Energiebilanz auf systematischen Genauigkeitsproblemen bei der Eddy-Kovarianz-Methode beruhen würde.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Monin–Obukhov’sche Ähnlichkeitstheorie ist in ihrer Gültigkeit auf die Bodenschicht (höhenkonstante Flüsse) oberhalb der rauen Unterschicht (möglicherweise nicht mehr gültig über hoher Vegetation) auf den Stabilitätsbereich $|z/L| \leq 1 \dots 2$ und homogene Unterlagenbedingungen begrenzt.

Zum besseren Verständnis der Einschränkungen bei nicht idealen Bedingungen ist ein möglichst exaktes Wissen zu allen Parametern der Ähnlichkeitstheorie notwendig. Demnach sollte man Wyngaard et al. (1982) zustimmen, dass die Probleme des KANSAS Experimentes von 1968 nur durch neue Experimente gelöst werden können. Gegenwärtig bestehen dazu gute Voraussetzungen, denn die Eddy-Kovarianz-Methode erfuhr in den letzten 5-10 Jahren deutliche Verbesserungen durch neue Sensoren, verbesserte Korrekturen und Qualitätstests (Moncrieff, 2004).

Für Modellierer ist es wichtig zu wissen, dass ein besseres Verständnis der Physik der Prozesse in der Bodenschicht letztlich für die Qualität der Modellergebnisse besser ist, als eine Anpassung durch ‚Stellschrauben‘.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich meinen russischen Kollegen danken, die es mir ermöglichten, die Monin–Obukhov’sche Ähnlichkeitstheorie an den Orten ihrer Entwicklung zu studieren.

LITERATUR

- Albrecht, F. (1940). Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche in verschiedenen Klimagebieten. *Reichsamt Wetterdienst, Wiss Abh*, Bd. VIII, Nr. 2, 1-82.
- Bovscheverov, V. M. und Voronov, V. P. (1960). Akustitscheskii fljuger. *Izv AN SSSR, ser Geofiz*, 6, 882-885.
- Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. und Bradley, E. F. (1971). Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J Atm Sci*, 28, 181-189.
- Businger, J. A. (1988). A note on the Businger-Dyer profiles. *Boundary-Layer Meteorol*, 42, 145-151.
- Culf, A. D., Foken, T. und Gash, J. H. C. (2004). The energy balance closure problem. In: Kabat, P., Claussen, M., Dirmeyer, P. A., Gash, J. H. C., de Guenni, L. B., Meybeck, H., Pielke Sr., R. A., Vörösmarty, C., Hutjes, R. W. A. und Lütke-meier, S. (Editors), *Vegetation, water, humans and the climate. A new perspective on an interactive system*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 159-166.
- Dyer, A. J. und Bradley, E. F. (1982). An alternative analysis of flux-gradient relationships at the 1976 ITCE. *Boundary-Layer Meteorol*, 22, 3-19.
- Foken, T., Kitajgorodskij, S. A. und Kuznecov, O. A. (1978). On the dynamics of the molecular temperature boundary layer above the sea. *Boundary-Layer Meteorol*, 15, 289-300.
- Foken, T. (1990). Turbulenter Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Unterlage - Methoden, meßtechnische Realisierung sowie ihre Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten. *Ber Dt Wetterdienstes*, 180, 287 pp.
- Foken, T. und Bernhardt, K. (1994). Atmospheric Boundary Layer Research in Central and East European Countries with KAPG, 1981-1990. *Geophys Rep*, 01, 1-58.
- Foken, T. (1998). Die scheinbar ungeschlossene Energiebilanz am Erdboden - eine Herausforderung an die Experimentelle Meteorologie. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät*, 24, 131-150.
- Foken, T. (2003). *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*. Springer, Heidelberg, 289 pp.
- Geiger, R. (1927). *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 246 pp.
- Geiger, R., Aron, R. H. und Todhunter, P. (1995). *The climate near the ground*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsges. mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 528 pp.
- Hanafusa, T., Fujitana, T., Kobori, Y. und Mitsuta, Y. (1982). A new type sonic anemometer-thermometer for field operation. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 33, 1-19.
- Handorf, D., Petoukhov, V. K., Dethloff, K., Eliseev, A. V., Weisheimer, A. und Mokhov, I. I. (1999). Decadal climate variability in a coupled atmosphere-ocean climate model of moderate complexity. *J Geophys Res*, 104/D22, 27253-27276.
- Haugen, D. H. (Editor), (1973). *Workshop on micrometeorology*. Am. Meteorol. Soc., Boston, 392 pp.
- Högström, U. (1988). Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. *Boundary-Layer Meteorol*, 42, 55-78.
- Högström, U. (1996). Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol*, 78, 215-246.
- Izumi, Y., 1971. Kansas 1968 field program data report. Air Force Cambridge Research Laboratory, Bedford, MA, pp. 79.
- Johansson, C., Smedman, A., Högström, U., Bresser, J. G. und Khanna, S. (2001). Critical test of Monin-Obukhov similarity during convective conditions. *J Atm Sci*, 58, 1549-1566.
- Kader, B. A. und Yaglom, A. M. (1972). Heat and mass transfer laws for fully turbulent wall flows. *Int J Heat Mass Transfer*, 15, 2329-2350.
- Kaimal, J. C. und Businger, J. A. (1963). A continuous wave sonic anemometer-thermometer. *J Climate Appl Meteorol.*, 2, 156-164.
- Kármán, T. v. und Howarth, L. (1938). On the statistical theory of isotropic turbulence. *Proc R Soc London*, A 164, 192-215.
- Kleinschmidt, E. (Editor), (1935). *Handbuch der meteorologischen Instrumente und ihrer Auswertung*. Springer, Berlin, 733 pp.
- Kolmogorov, A. N. (1941). Lokalnaja struktura turbulentnosti v neschtschimaemoi schidkosti pri otschen bolschich tschislach Reynoldsa. *Dokl AN SSSR*, 30, 299-303.
- Kolmogorov, A. N. (1941). Rassejanie energii pri lokalno-isotropoi turbulentnosti. *Dokl AN SSSR*, 32, 22-24.
- Mitsuta, Y. (1966). Sonic anemometer-thermometer for general use. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Ser. II, 44, 12-24.
- Miyake, M., Stewart, R. W., Burling, R. W., Tsvang, L. R., Kaprov, B. M. und Kuznecov, O. A. (1971). Comparison of acoustic instruments in an atmospheric flow over water. *Boundary-Layer Meteorol*, 2, 228-245.

- Moncrieff, H. (2004). Surface turbulent fluxes. In: Kabat, P., Claussen, M., Dirmeyer, P. A., Gash, J. H. C., de Guenni, L. B., Meybeck, H., Pielke Sr., R. A., Vörösmarty, C., Hutjes, R. W. A. und Lütkeemeier, S. (Editors), *Vegetation, water, humans and the climate. A new perspective on an interactive system*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 173-182.
- Monin, A. S. und Obukhov, A. M. (1954). Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremesivaniya v prizemnom sloe atmosfery. *Trudy geofiz inst AN SSSR*, 24 (151), 163-187.
- Montgomery, R. B. (1948). Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. *J Meteorol*, 5, 265-274.
- Obukhov, A. M. (1946). Turbulentnost' v temperaturnoj - neodnorodnoj atmosfere. *Trudy Inst. Theor. Geofiz. AN SSSR*, 1
- Obukhov, A. M. (1951). Investigation of the micro-structure of the wind in the near-surface layer of the atmosphere (in Russian). *Izv AN SSSR, ser Geofiz*, 3, 49ff.
- Obukhov, A. M. (1960). O strukture temperaturnogo polja i polja skorostej v uslovijach konvekcii. *Izv AN SSSR, ser Geofiz*, 1392-1396.
- Paeschke, W. (1937). Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem in der bodennahen Luftschicht. *Z Geophys*, 13, 14-21.
- Prandtl, L. (1925). Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. *Z angew Math Mech*, 5, 136-139.
- Priestley, C. H. B. und Swinbank, W. C. (1947). Vertical transport of heat by turbulence in the atmosphere. *Proc R Soc London*, 543-561.
- Reynolds, O. (1894). On the dynamical theory of turbulent incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Phil Trans R Soc London*, A 186, 123-161.
- Richardson, L. F. (1920). The supply of energy from and to atmospheric eddies. *Proceedings Royal Society*, A 97, 354-373.
- Schmidt, W. (1925). *Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen*. Henri Grand Verlag, Hamburg, 118 pp.
- Swinbank, W. C. (1951). The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *J Meteorol*, 8, 135-145.
- Swinbank, W. C. (1964). The exponential wind profile. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 90, 119-135.
- Swinbank, W. C. (1968). A comparison between prediction of the dimensional analysis for the constant-flux layer and observations in unstable conditions. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 94, 460-467.
- Taylor, G. I. (1915). Eddy motion in the atmosphere. *Phil Trans R Soc London*, A 215, 1-26.
- Taylor, G. I. (1938). The spectrum of turbulence. *Proc R Soc London*, A 164, 476-490.
- Tschalikov, D. V. (1968). O profilja vetra i temperatury v prizemnom sloe atmosfery pri ustojtschivoj stratifikacii. *Trudy GGO*, 207, 170-173.
- Tsvang, L. R., Kaprov, B. M., Zubkovskij, S. L., Dyer, A. J., Hicks, B. B., Miyake, M., Stewart, R. W. und McDonald, J. W. (1973). Comparison of turbulence measurements by different instruments; Tsimlyansk field experiment 1970. *Boundary-Layer Meteorol*, 3, 499-521.
- Tsvang, L. R., Zubkovskij, S. L., Kader, B. A., Kallistratova, M. A., Foken, T., Gerstmann, W., Przandka, Z., Pretel, J., Zelený, J. und Keder, J. (1985). International turbulence comparison experiment (ITCE-81). *Boundary-Layer Meteorol*, 31, 325-348.
- Wieringa, J. (1980). A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorol*, 18, 411-430.
- Wyngaard, J. C., Businger, J. A., Kaimal, J. C. und Larsen, S. E. (1982). Comments on 'A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding'. *Boundary-Layer Meteorol*, 22, 245-250.
- Yaglom, A. M. (1977). Comments on wind and temperature flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol*, 11, 89-102.
- Zilitinkevich, S. S. und Tschalikov, D. V. (1968). Opređenje universalnych profilej skorosti vetra i temperatury v prizemnom sloe atmosfery. *Izv AN SSSR, Fiz Atm Okeana*, 4, 294-302.