

Научная статья

УДК: 551.554

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-1-137-144

EDN: RHPKJZ

**ТЕМПЕРАТУРНО-ВЕТРОВОЙ РЕЖИМ В КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКАХ ПО ДАННЫМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМ РАЗРЕШЕНИЕМ****Егор Юрьевич Федурин<sup>1</sup>, Николай Александрович Калинин<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия<sup>1</sup> egor.fedurin@gmail.com<sup>2</sup> kalinin@psu.ru

**Аннотация.** Атмосферная турбулентность в пограничном слое атмосферы оказывает существенное влияние на термодинамические процессы, влияющие на формирование погоды и климата, на эффективность ветроэнергетики и безопасность авионавигации. Случайные неоднородности, возникающие при турбулентном движении в атмосфере, создают помехи при астрономических наблюдениях и слежении за воздушно-космическими объектами, поэтому изучение процессов образования и развития турбулентности остается важным направлением в атмосферных исследованиях. Цель работы – выявить особенности вертикальных профилей температуры воздуха и скорости ветра в пограничном слое атмосферы в ясную погоду и в кучево-дождевых облаках.

По данным радиозондирования атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением рассчитаны усредненные вертикальные профили производных потенциальной температуры воздуха и скорости ветра. Выявлены особенности изменения по высоте вертикальных градиентов потенциальной температуры воздуха и скорости ветра, а также проведен анализ связи этих величин с атмосферной турбулентностью. Установлено, что в ясную погоду в пограничном слое атмосферы происходит сухоадиабатическое вертикальное смещение воздушных масс, а в кучево-дождевых облаках адиабатичность нарушена. В ясную погоду в приземном слое в дневные сроки наблюдений отмечается отток тепла, а в ночные сроки приток. В кучево-дождевых облаках вне зависимости от времени суток наблюдается множество перемежающихся тонких слоев, в которых происходит приток или отток тепла. Также отмечено, что в кучево-дождевых облаках и в подоблачном слое осуществляется вертикальное турбулентное перемешивание тепла.

**Ключевые слова:** потенциальная температура, ветер, турбулентность, кучево-дождевое облако, число Ричардсона, сдвиг ветра

**Для цитирования:** Федурин Е. Ю., Калинин Н. А. Температурно-ветровой режим в кучево-дождевых облаках по данным радиозондирования с высоким пространственно-временным разрешением // Географический вестник = Geographical bulletin. 2026. № 1(76). С. 137–144. DOI: 10.17072/2079-7877-2026-1-137-144 EDN: RHPKJZ

Original article

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-1-137-144

EDN: RHPKJZ

**ANALYSIS OF TEMPERATURE AND WIND SPEED IN CUMULONIMBUS CLOUDS BASED ON RADIOSONDE DATA WITH HIGH SPATIOTEMPORAL RESOLUTION****Yegor Yu. Fedurin<sup>1</sup>, Nikolay A. Kalinin<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup> Perm State University, Perm, Russia<sup>1</sup> egor.fedurin@gmail.com<sup>2</sup> kalinin@psu.ru

**Abstract.** Turbulence in the boundary layer of the atmosphere has a significant impact on thermodynamic processes affecting the formation of weather and climate, the efficiency of wind energy, and the safety of air navigation. Random inhomogeneities caused by turbulent motion in the atmosphere interfere with astronomical observations and tracking of aerospace objects, therefore the study of the turbulence formation and development processes remains an important

© Федурин Е. Ю., Калинин Н. А., 2026

Лицензировано по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, перейдите по ссылке <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Метеорология

Федурин Е. Ю., Калинин Н. А.

direction in atmospheric research. This study aims to identify the features of vertical profiles of air temperature and wind speed in the boundary layer of the atmosphere in clear weather and in cumulonimbus clouds.

Averaged vertical profiles of potential air temperature and wind speed were calculated according to sounding data with high spatiotemporal resolution. The features of changes in the height of vertical gradients of potential air temperature and wind speed were identified, and the relationship between these values and atmospheric turbulence was analyzed. The study has found that in clear weather in the boundary layer of the atmosphere there occurs a dry adiabatic vertical displacement of air masses, while in cumulonimbus clouds adiabaticity is disturbed. In clear weather, in the surface layer there is an outflow of heat in the daytime and an influx of heat in the nighttime. In cumulonimbus clouds, regardless of the time of day, there are many alternating thin layers in which an influx or outflow of heat take place. It is also noted that vertical turbulent mixing of heat occurs in and under cumulonimbus clouds.

**Keywords:** potential temperature, wind, turbulence, cumulonimbus cloud, Richardson number, wind shear

**For citation:** Fedurin Ye. Yu., Kalinin N. A. Analysis of temperature and wind speed in cumulonimbus clouds based on radiosonde data with high spatiotemporal resolution. *Geographical Bulletin*, 2026, no. 1(76), pp. 137–144. DOI: 10.17072/2079-7877-2026-1-137-144 EDN: RHPKJZ

## Введение

В качестве наиболее эффективного критерия возникновения и развития процессов турбулентных течений, протекающих в атмосфере, а также для идентификации областей устойчивости/неустойчивости или стабильности/нестабильности атмосферы, используется число Ричардсона –  $Ri$  [7; 12].

Для летнего времени года типична суточная смена стратификации в пограничном слое, в связи с этим высота слоя турбулентного перемешивания варьируется в течение суток. Согласно данным лидарных [11; 13] и содарных [9] измерений, а также данным радиозондирования атмосферы [6], высота слоя турбулентного перемешивания в дневное время может достигать 900 м и более, при этом наиболее высокий уровень турбулентной энергии наблюдается в нижнем 500-метровом слое. В ночное же время, когда развивается сильная температурная инверсия и устанавливается устойчивая стратификация, турбулентное перемешивание существенно ослабевает и сохраняется лишь в верхней части приземного слоя. В нижней части приземного слоя скорость ветра и турбулентные движения замедляются, что в наибольшей степени проявляется в городской среде в связи с влиянием шероховатости урбанизированной поверхности [8; 9; 16; 17]. При этом наблюдается повышение уровня максимума турбулентной энергии выше приземного слоя, а перенос турбулентной энергии происходит сверху вниз.

Слои с устойчивой и неустойчивой стратификацией, а также распределения числа Ричардсона характеризуются изменчивостью во времени и имеют слоистую структуру по высоте [1; 11; 17]. Причиной возникновения высотной перемежаемости стратификации и числа Ричардсона являются низкоуровневые струйные течения. В области струйных течений число Ричардсона, как правило, имеет меньшие значения, чем за их пределами, однако для всех струйных течений характерны его резкие скачки вдоль оси до значений, значительно превышающих критическое  $Ri_{кр} = 0,25$ . Иными словами, ветровая турбулентность имеет наименьшую интенсивность в центральной части струйных течений, где  $Ri > Ri_{кр}$ , и увеличивается к периферии струйных течений, на высотах, где  $Ri < Ri_{кр}$  [2; 16].

На рост интенсивности турбулентности может влиять наличие атмосферных волн, что объясняется частичной трансформацией волновой энергии в турбулентную [2; 14; 15]. Ветровая турбулентность при наличии атмосферных волн и значении числа Ричардсона ниже критического может быть довольно сильной. С исчезновением волны интенсивность турбулентности уменьшается на всех высотах.

Расчеты по данным реанализа ECMWF ERA-Interim показывают, что за пределами пограничного слоя атмосферы наибольшие значения числа Ричардсона наблюдаются в районе тропопаузы [3].

Цель данной работы состоит в том, чтобы по данным радиозондирования атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением выявить закономерности температурно-ветрового режима, характерные для кучево-дождевых облаков.

## Методика

В настоящее время при экспериментальных исследованиях атмосферы широко используются различные средства зондирования, позволяющие получать метеорологические данные в реальном времени с необходимым пространственным и временным разрешением: радары, содары, лидары, беспилотные летательные аппараты, радиозонды.

В представленной работе в качестве средства измерения используется система радиозондирования АРНК «Полус-М» [10], функционирующая на основе спутниковых навигационных платформ и позволяющая получать вертикальные профили температуры, влажности, направления и скорости ветра от поверхности земли до 30–35 км летом и до 20–25 км зимой с дискретностью по времени 2 с, а по высоте 3–5 м. Предел допускаемой абсолютной погрешности данного оборудования по измерению температуры составляет  $\pm 0,6^\circ \text{C}$ , а среднеквадратическая погрешность измерения скорости среднего ветра составляет 0,7 м/с.

## Метеорология

Федурин Е. Ю., Калинин Н. А.

Формула для расчета безразмерного числа Ричардсона имеет следующий вид:

$$Ri = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta/dz}{\beta^2}$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\theta$  – средняя потенциальная температура слоя, К;  $\beta$  – вертикальный градиент скорости ветра (сдвиг ветра),  $c^{-1}$ ;  $z$  – высота, м.

Наиболее благоприятным для развития турбулентности являются слои со значениями  $Ri < 1$  [7].

Существуют критические значения вертикального сдвига ветра, сочетание которых с различными величинами вертикального градиента температуры может привести к возникновению интенсивного турбулентного обмена: при  $-0,4^\circ C/100 \text{ м} > \frac{dT}{dz} \geq -1^\circ C/100 \text{ м}$  сдвиг ветра  $\beta$  должен быть  $\geq 1 \text{ c}^{-1} \times 10^{-2}$ ; при  $0^\circ C/100 \text{ м} > \frac{dT}{dz} \geq -0,4^\circ C/100 \text{ м}$  сдвиг ветра  $\beta$  должен быть  $\geq 2 \text{ c}^{-1} \times 10^{-2}$ ; при  $\frac{dT}{dz} \geq 0^\circ C/100 \text{ м}$  сдвиг ветра  $\beta$  должен быть  $\geq 3 - 4 \text{ c}^{-1} \times 10^{-2}$  [6].

Интенсивность турбулентной энергии определяется не только градиентами температуры и ветра, но также зависит от изменения этих градиентов. Для оценки степени турбулентности атмосферы и для определения тех слоев, в которых может наблюдаться турбулентность, необходимо обращать внимание не только на большие  $\beta$  и малые значения  $Ri$ , но и на характер изменения этих величин по вертикали.

Для возникновения повышенной турбулентности благоприятно такое положение, когда малые значения  $\beta$  (большие величины  $Ri$ ) в нижележащем слое переходят в большие значения  $\beta$  (малые значения  $Ri$ ) в соседнем вышележащем слое. Турбулентность начинается в слое с большими значениями  $\beta$ , т.е. в слое с резким усилением ветра.

Верхняя граница турбулентной зоны обычно связана с тем уровнем, вблизи которого наблюдается резкий переход от малых значений  $Ri$  к его большим величинам.

В мощных слоях с малыми значениями  $Ri$  турбулентность либо отсутствует, либо присутствует сверху и снизу данного слоя. Для возникновения турбулентности более благоприятно существование тонких неоднородных слоев [4]. Иными словами, рассматривать следует не только первые, но и вторые производные данных величин по высоте.

Также вторая производная потенциальной температуры по высоте, как следует из уравнения притока тепла в турбулентной атмосфере, характеризует вертикальный турбулентный приток тепла [7]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Опыт наблюдений показывает, что благодаря конвекционным потокам радиозонд всегда затягивает в кучево-дождевое облако через его нижнюю границу. По данным аэрологической станции «Пермь» в летние периоды 2018–2024 гг. для исследования отобрано 20 таких случаев в дневной срок наблюдений (12 ч всемирного согласованного времени (ВСВ)) и 5 случаев в ночной срок (0 ч ВСВ). Во всех случаях наблюдались грозовые явления и ливневые осадки: в дневные сроки наблюдений, как правило, внутримассовые, а в ночные сроки – фронтальные. С целью сравнения вертикальных профилей также было отобрано такое же количество выпусков при ясной погоде и повышенном атмосферном давлении в моменты прохождения через пункт наблюдений антициклонов.

Данные наблюдений интерполированы кубическими сплайнами на вертикальную сетку с шагом 5 м от уровня наблюдательной станции до высоты 1400 м. Такая высота обоснована тем, что подавляющая часть радиозондов при пролете через кучево-дождевое облако, сопровождающееся грозовыми явлениями, выходит из строя на высоте около 1500–2000 м. Также эта высота приблизительно соответствует высоте пограничного слоя атмосферы.

После интерполяции в узлах сетки произведены расчеты первой и второй производных потенциальной температуры и скорости ветра по высоте.

Затем на основе полученных расчетов построены усредненные профили исследуемых величин.

### Результаты и их обсуждение

На рисунках 1–4 представлены усредненные вертикальные профили первой производной потенциальной температуры ( $\partial\theta/\partial z$ ) и вертикального градиента скорости ветра ( $\beta = \partial v/\partial z$ ), а также вторые производные этих же величин ( $\partial^2\theta/\partial z^2$ ,  $\partial\beta/\partial z$ ).

Как видно из рисунков 1–2, значения  $\partial\theta/\partial z$  в ясную погоду в слое 300–1300 м равны нулю, в то время как в кучево-дождевом облаке данная величина показывает существенную изменчивость по высоте. Как известно [5], потенциальная температура воздуха не изменяется при сухадиабатическом процессе, при устойчивой стратификации растет с высотой, а при сухонеустойчивой падает. В слоях изотермии и инверсии потенциальная температура растет с высотой наиболее быстро.

Метеорология

Федурин Е. Ю., Калинин Н. А.

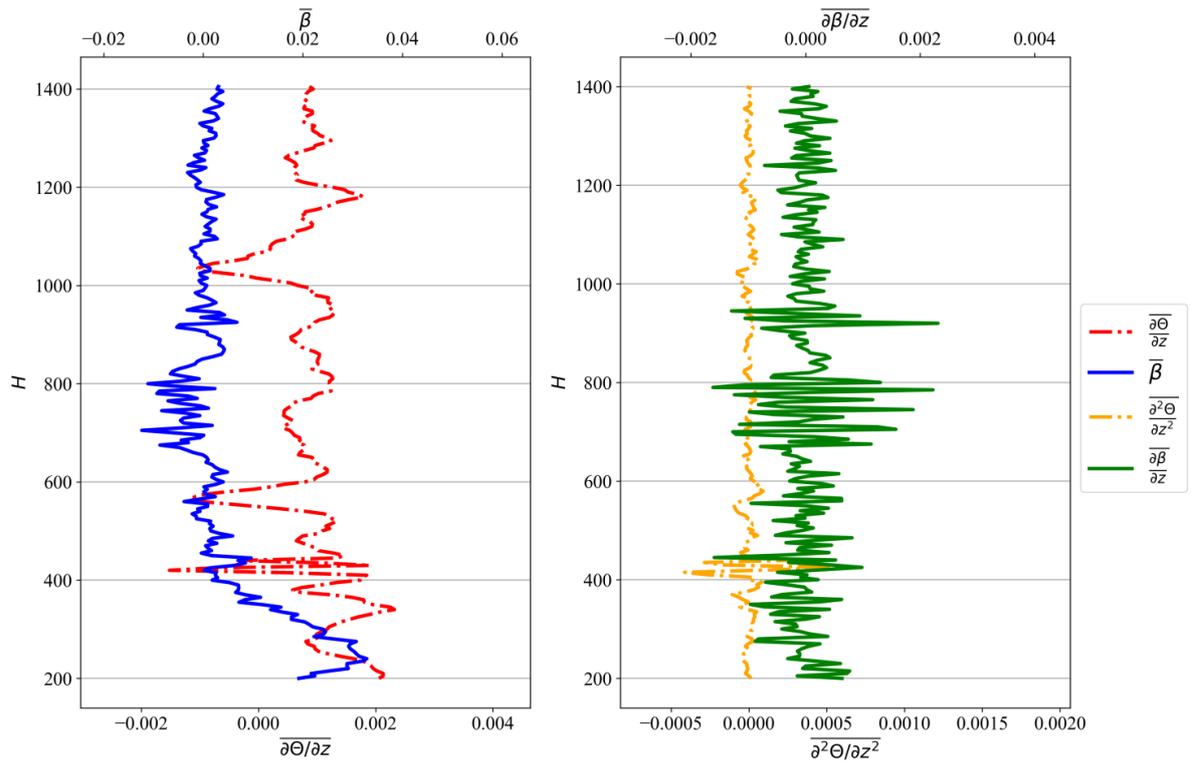


Рис. 1. Усредненные вертикальные профили  $\beta$  и  $\partial\theta/\partial z$  и скорости их изменения с высотой в кучево-дождевых облаках в дневные сроки наблюдений

Fig. 1. Averaged vertical profiles  $\beta$  and  $\partial\theta/\partial z$  and the rate of their change with height in cumulonimbus clouds during daytime observation periods

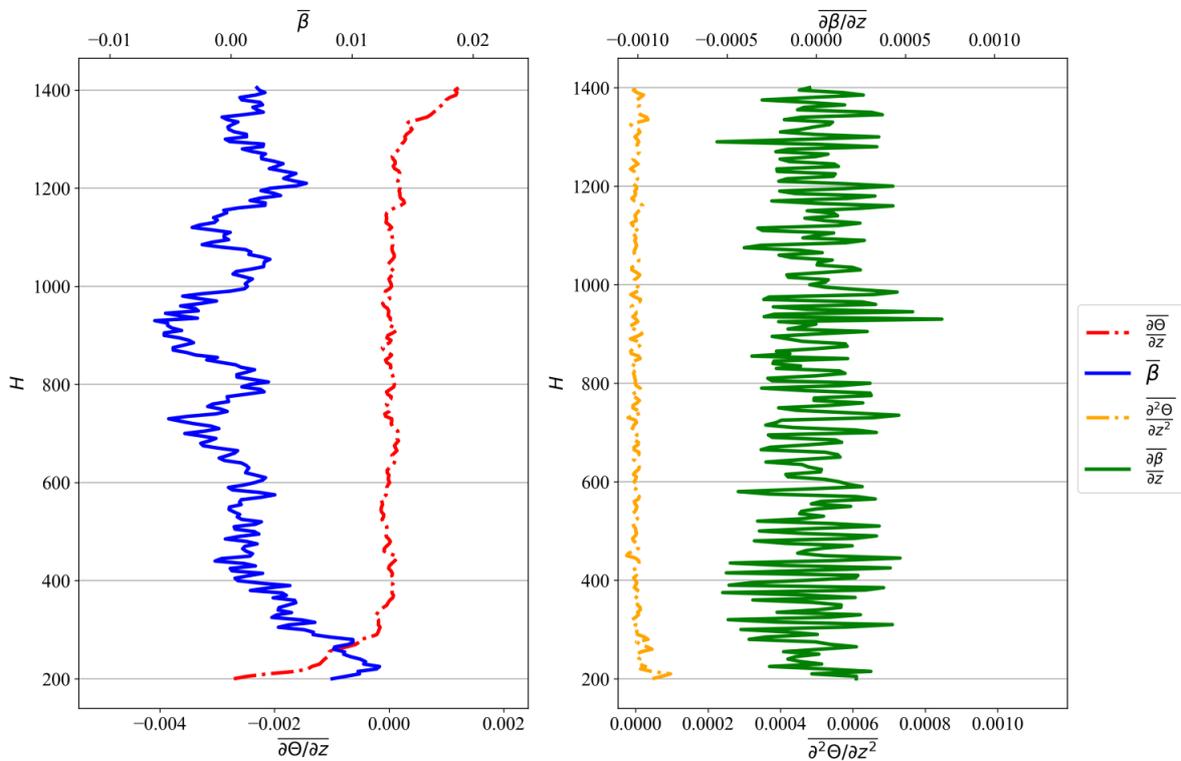


Рис. 2. Усредненные вертикальные профили  $\beta$  и  $\partial\theta/\partial z$  и скорости их изменения с высотой в ясную погоду в дневные сроки наблюдений

Fig. 2. Averaged vertical profiles  $\beta$  and  $\partial\theta/\partial z$  and the rate of their change with height in clear weather during daytime observation periods

## Метеорология

Федурин Е. Ю., Калинин Н. А.

Из рисунка 2 следует, что в ясную погоду в пограничном слое атмосферы происходит адиабатическое вертикальное смещение воздушных масс за исключением приземного слоя атмосферы, в котором потенциальная температура уменьшается с высотой, что объясняется прогревом этого слоя атмосферы от подстилающей поверхности и развитием сильной неустойчивости. Таким образом, в приземном слое в ясную погоду происходит нарушение адиабатичности и отток тепла, а турбулентного перемешивания тепла в пограничном слое атмосферы нет ( $\partial^2\theta/\partial z^2 \approx 0$ ).

Для кучево-дождевых облаков и подоблачной зоны (рис. 1) характерно хаотичное слоистое изменение потенциальной температуры с высотой. Наблюдается множество тонких слоев с притоком и оттоком тепла. Для всего пограничного слоя атмосферы характерно отклонение от адиабатического процесса. Также величина  $\partial^2\theta/\partial z^2$  показывает, что в слое 400–450 м происходит вертикальное турбулентное перемешивание тепла, при этом данный слой в среднем соответствует высоте основания кучево-дождевых облаков.

Анализ графиков также показывает, что в подоблачном слое и в нижней части кучево-дождевых облаков как сама величина сдвигов скорости ветра, так и ее колебания интенсивнее, чем в ясную погоду: первая производная скорости ветра по высоте (сдвиг ветра) в кучево-дождевых облаках приблизительно вдвое больше, чем в ясную погоду, а вторая производная скорости ветра в слое 700–900 м в кучево-дождевых облаках в 3–4 раза превышает таковую в условиях безоблачной погоды. Следовательно, в нижней части кучево-дождевого облака наблюдается слой с резкими изменениями сдвига ветра, что может способствовать возникновению турбулентности.

Рисунки 3–4 показывают, что ночью все исследуемые величины ведут себя аналогично дневным срокам: 1) для потенциальной температуры в ясную погоду характерно сухоадиабатическое распределение в пограничном слое атмосферы за исключение приземного слоя. В кучево-дождевых облаках распределение этой величины хаотичное; 2) в кучево-дождевых облаках наблюдаются слои с вертикальным турбулентным перемешиванием тепла, в ясную погоду такие слои отсутствуют; 3) величины первой и второй производной скорости ветра по высоте в кучево-дождевых облаках больше, чем в ясную погоду.

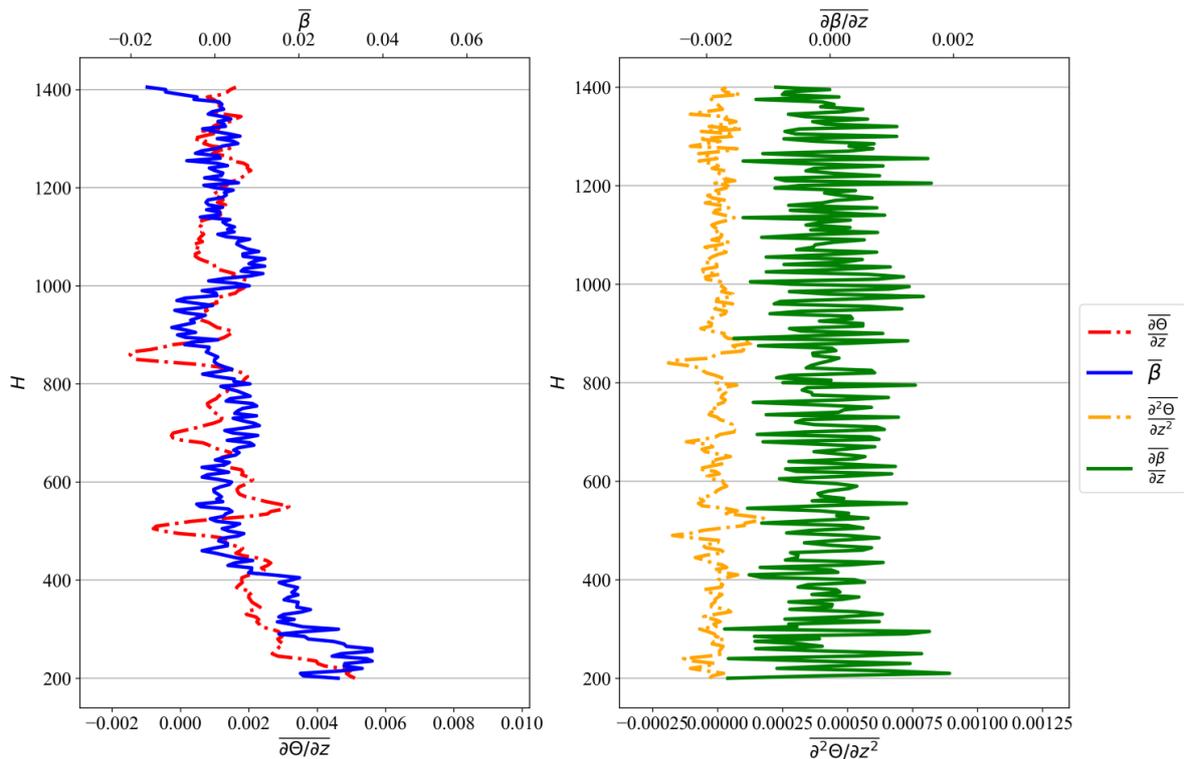


Рис. 3. Усредненные вертикальные профили  $\beta$  и  $\partial\theta/\partial z$  и скорости их изменения с высотой в кучево-дождевых облаках в ночные сроки наблюдений

Fig. 3. Averaged vertical profiles  $\beta$  and  $\partial\theta/\partial z$  and the rate of their change with height in cumulonimbus clouds during nighttime observation periods

## Метеорология

Федурин Е. Ю., Калинин Н. А.

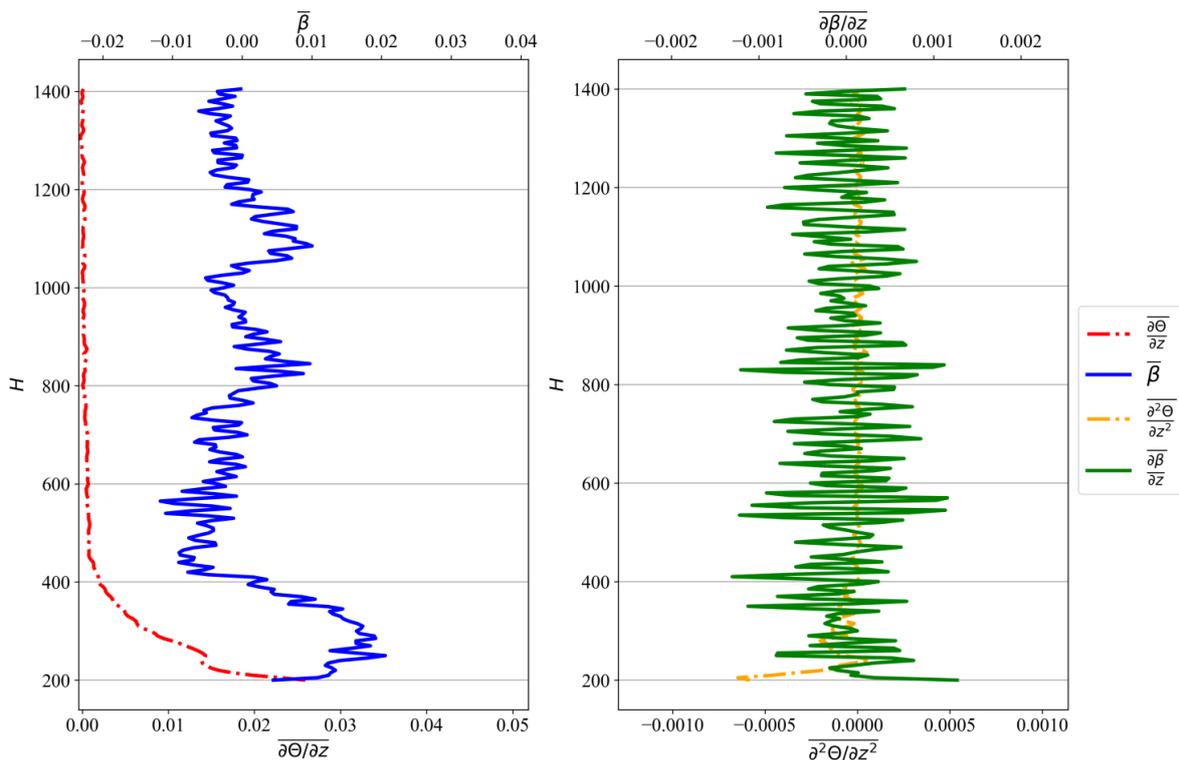


Рис. 4. Усредненные вертикальные профили  $\beta$  и  $\partial\theta/\partial z$  и скорости их изменения с высотой в ясную погоду в ночные сроки наблюдений

Fig. 4. Averaged vertical profiles  $\beta$  and  $\partial\theta/\partial z$  and the rate of their change with height in clear weather during nighttime observation periods

Разница есть лишь в распределении потенциальной температуры в приземном слое в ясную погоду, где наблюдается рост потенциальной температуры с высотой, что объясняется развитием в ночное время приземных инверсий и притока тепла в этом слое.

### Заключение

Современные данные радиозондирования атмосферы, имеющие разрешение по высоте 3–5 м, позволяют с более высокой точностью изучать вертикальные профили температуры, влажности, скорости и направления ветра, чем это было возможно делать в предыдущие годы.

В работе проанализированы такие случаи температурно-ветрового зондирования атмосферы, когда радиозонд залетает непосредственно в кучево-дождевое облако, и выявлены следующие закономерности:

1. Для пограничного слоя атмосферы в ясную погоду характерно сухоадиабатическое вертикальное смещение воздушных масс, за исключение приземного слоя;
2. В приземном слое атмосферы в ясную погоду в дневные сроки потенциальная температура с высотой уменьшается, и происходит отток тепла. В ночные сроки наоборот: потенциальная температура с высотой растет, происходит приток тепла;
3. В кучево-дождевых облаках распределение потенциальной температуры во всем пограничном слое атмосферы хаотичное и разделено на множество тонких слоев, а адиабатичность процесса нарушается;
4. В кучево-дождевых облаках наблюдаются слои с вертикальным турбулентным перемешиванием тепла, особенно у основания облаков, а в ясную погоду такие слои отсутствуют;
5. В кучево-дождевых облаках величины вертикального сдвига скорости ветра и его колебания интенсивнее, чем в ясную погоду, особенно в подоблачном слое и в нижней части облаков.

### Библиографический список

1. Банах В. А., Смалихо И. Н., Фалиц А. В. Температурно-ветровой режим устойчивого пограничного слоя в прибрежной зоне Байкала. I. Число Ричардсона // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 8. С. 621–630. DOI: 10.15372/AOO20200806 EDN: UVXNSV
2. Банах В. А., Смалихо И. Н., Фалиц А. В. Температурно-ветровое зондирование пограничного слоя атмосферы в прибрежной зоне Байкала. II. Атмосферные волны и ветровая турбулентность // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 8. С. 631–642. DOI: 10.15372/AOO20200807 EDN: QLUXXM
3. Ботьбасова Л. А. Стабильность атмосферы над специальной астрофизической обсерваторией РАН // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXVIII Международного симпозиума, Томск, 04–08 июля 2022 года. Томск: ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. С. 300–303. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.63.66.001 EDN: DISRFF

## Метеорология

Федурин Е. Ю., Калинин Н. А.

4. Воронцов П. А. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 296 с.
5. Головина Е. Г., Абанников В. Н., Аед Мханна И. Н., Подгайский Э. В. Основы термодинамики атмосферы учеб. пособие. СПб: Изд-во «Ниц Арт», 2022. 61 с. ISBN: 978-5-907478-81-7 EDN: ZYFJZE
6. Гусейнов Н. Ш. Вертикальное распределение метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2006. № 2. С. 79–85. EDN: NDSFXH
7. Калинин Н. А. Физическая метеорология: учебное пособие. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2023. 257 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Kalinin-Fizicheskaya-meteorologiya.pdf> (дата обращения 21.11.2024) ISBN: 978-5-7944-3959-5 EDN: Y1YZKQ
8. Каллистратова М. А., Пекур М. С., Юшков В. П. Различия профилей ветра в пограничном слое над городом и сельской местностью // Вестник Московского университета. Физика. Астрономия. 2005. № 5. С. 55–59. EDN: JVIUZZ
9. Поткаев А. И., Шаманаева Л. Г., Кулагина В. В. Суточная динамика кинетической энергии в атмосферном пограничном слое по результатам минисодарных измерений // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64, № 8. С. 16–24. DOI: 10.17223/00213411/64/8/16 EDN: TLDACU
10. Руководство по эксплуатации базовой станции СР «Полюс». ШЛИГ.464344.005 РЭ. 33 с. URL: <http://www.meteo-radiy.ru/katalog/dokumentatsiya> (дата обращения: 28.11.2024)
11. Banakh V. A., Fall its A. V., Sherstobitov A. M., Smalikhov I. N., Sukharev A. A., Gordeev E. V., Zaloznaya I. V. On estimation of the turbulent mixing layer altitude from the altitude-time distributions of the richardson number // Atmospheric and Oceanic Optics. 2023. Vol. 36, No 1. P. 30–40. DOI: 10.1134/S1024856023020033 EDN: SQSGFW
12. Banta R. M., Pichugina Y. L., Newsom R. K. Relationship between Low-Level Jet Properties and Turbulence Kinetic Energy in the Nocturnal Stable Boundary Layer // Journal of the Atmospheric Sciences. 2003. Vol. 60, Iss. 20. P. 2549–2555. DOI: 10.1175/1520-0469(2003)060 EDN: GMONOZ
13. Bonin T. A., Carroll B. J., Hardesty R. M., Brewer W. A., Hajny K., Salmon O. E., Shepson P. B. Doppler lidar observation of the mixing height in Indianapolis using an automated composite fuzzy logic approach // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2018. Vol. 35, No. 3. P. 915–935. DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0159.1 EDN: YIDUCD
14. Dewan E. M. Stratospheric wave spectra resembling turbulence // Science. 1979. Vol. 204. P. 832–835.
15. Duck T. J., Whiteway J. A. The spectrum of waves and turbulence at the tropopause // Geophysical research letters. 2005. Vol. 32, Iss. 7. DOI: 10.1029/2004GL021189
16. Kurbatskii A.F., Kurbatskaya L.I. Modeling of the vertical structure of the nocturnal boundary layer over a rough surface // Atmospheric and Oceanic Optics. 2009. Vol. 22, No 2. P. 1–7. DOI: 10.1134/S1024856009020067 EDN: WRFCRB
17. Kurzeja R. J., Leclerc M. Y., Duarte H. F., Zhang G., Parker M. J., Werth D. W., Chiswell S. R., Buckley R. L. Turbulence and Diffusion on Weakly Stable and Stable Nights near a 300 m Tower in a Complex Landscape // Journal of the Atmospheric Sciences. 2023. Vol. 80, Iss. 1. P. 211–233. DOI: 10.1175/JAS-D-21-0268.1 EDN: BGXJDS

## References

1. Banakh V. A., Smalikhov I. N., Falits A. V. Wind temperature sounding in the atmospheric boundary layer in the coastal area of Lake Baikal. I. The Richardson number. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2020, vol. 33, no. 8. pp.621–630. (In Russ.) DOI 10.15372/AOO20200806
2. Banakh V. A., Smalikhov I. N., Falits A. V. Wind temperature sounding in the atmospheric boundary layer in the coastal area of Lake Baikal. II. Atmospheric waves and wind turbulence. *Optika atmosfery i okeana*, 2020, vol. 33, no. 8. pp. 631–642. (In Russ.) DOI 10.15372/AOO20200807
3. Bol'basova L. A. Stabil'nost' atmosfery nad spetsial'noi astrofizicheskoi observatorii RAN [Atmospheric stability over the special astrophysical observatory of the Russian Academy of Sciences]. *Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery : XXVIII Mezhdunarodnyi simpozium, Tomsk, 04–08 iyulya 2022 goda*. Tomsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut optiki atmosfery im. V. E. Zueva Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2022, pp. 300–303. (In Russ.) DOI 10.56820/OAOPA.2022.63.66.001
4. Vorontsov P. A. *Turbulentnost' i vertikal'nye toki v pogranchnom sloe atmosfery* [Turbulence and vertical currents in the boundary layer of the atmosphere]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966. 296 p. (In Russ.)
5. Golovina E. G., Abannikov V. N., Aed Mkhanna I. N., Podgaiskii E. V. *Osnovy termodinamiki atmosfery* [Fundamentals of Atmospheric Thermodynamics]. Sankt Peterburg: Nits Art. 2022. 61 p. (In Russ.)
6. Guseynov N.SH. Vertikal'noye raspredeleniye meteorologicheskikh parametrov v pogranchnom sloe atmosfery [Vertical distribution of meteorological parameters in the boundary layer of the atmosphere] // *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2006. No 2. Pp. 79–85. (In Russ.)
7. Kalinin N. A. *Fizicheskaya meteorologiya* [Physical Meteorology], 2023, 257 p. Perm State University, website. (In Russ.) URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Kalinin-Fizicheskaya-meteorologiya.pdf> (Accessed 21 November 2024).
8. Kallistratova M. A., Pekur M. S., Yushkov V. P. Razlichiya profilei vetra v pogranchnom sloe nad gorodom i sel'skoi mestnost'yu [Differences in wind profiles in the boundary layer over urban and rural areas]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Fizika. Astronomiya*. 2005, no. 5, pp. 55–59. (In Russ.)
9. Potkaev A. I., Shamanaeva L. G., Kulagina V. V. Diurnal dynamics of the kinetic energy in the atmospheric boundary layer retrieved from minisodar measurements. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 64, no. 8, pp. 16–24. (In Russ.) DOI 10.17223/00213411/64/8/16
10. *Rukovodstvo po ekspluatatsii bazovoy stantsii SR «Polyus»* [Operation manual of the base station SR Polyus.] SHLIG.464344.005 РЭ. 33 p. (In Russ.) URL: <http://www.meteo-radiy.ru/katalog/dokumentatsiya> (Accessed 28 November 2024).
11. Banakh V.A., Falits A.V., Sherstobitov A.M., Smalikhov I.N., Sukharev A.A., Gordeev E.V., Zaloznaya I.V. On estimation of the turbulent mixing layer altitude from the altitude-time distributions of the richardson number. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023. Vol. 36. No. 1. Pp. 30–40. DOI 10.1134/S1024856023020033

## Метеорология

Федурин Е. Ю., Калинин Н. А.

12. Banta R. M., Pichugina Y. L., Newsom R. K. Relationship between Low-Level Jet Properties and Turbulence Kinetic Energy in the Nocturnal Stable Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, vol. 60, iss. 20, pp. 2549–2555. DOI 10.1175/1520-0469(2003)060<2549:RBLJPA>2.0.CO;2
13. Bonin T. A., Carroll B. J., Hardesty R. M., Brewer W. A., Hajny K., Salmon O. E., Shepson P. B. Doppler lidar observation of the mixing height in Indianapolis using an automated composite fuzzy logic approach. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2018, vol. 35, no. 3, pp. 915–935.
14. Dewan E. M. Stratospheric wave spectra resembling turbulence. *Science*, 1979, vol. 204, pp. 832–835.
15. Duck T. J., Whiteway J. A. The spectrum of waves and turbulence at the tropopause. *Geophysical research letters*. 2005, vol. 32, iss. 7. DOI: 10.1029/2004GL021189
16. Kurbatskii A. F., Kurbatskaya L. I. Modeling of the vertical structure of the nocturnal boundary layer over a rough surface. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2009, vol. 22, no. 2. Pp. 1–7. DOI: 10.1134/S1024856009020067
17. Robert J. Kurzeja, Monique Y. Leclerc, Henrique F. Duarte, Gengsheng Zhang, Matthew J. Parker, David W. Werth, Steven R. Chiswell, And Robert L. Buckley. Turbulence and Diffusion on Weakly Stable and Stable Nights near a 300 m Tower in a Complex Landscape. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2023, vol. 80, iss. 1, pp 211–233. DOI: 10.1175/JAS-D-21-0268.1

Статья поступила в редакцию: 19.08.25, одобрена после рецензирования: 19.09.25, принята к опубликованию: 12.03.26.

The article was submitted: 19 August 2025; approved after review: 19 September 2025; accepted for publication: 12 March 2026.

## Информация об авторах

**Егор Юрьевич Федурин**

Аспирант кафедры метеорологии и охраны атмосферы,  
Пермский государственный  
национальный исследовательский университет;  
614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: egor.fedurin@gmail.com

**Николай Александрович Калинин**

Доктор географических наук, профессор, заведующий  
кафедрой метеорологии и охраны атмосферы,  
Пермский государственный национальный  
исследовательский университет;  
614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: kalinin@psu.ru

## Information about the authors

**Yegor Yu. Fedurin**

Postgraduate Student,  
Department of Meteorology and Atmospheric Protection,  
Perm State University;  
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

**Nikolay A. Kalinin**

Doctor of Geographical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Meteorology and  
Atmospheric Protection,  
Perm State University;  
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

**Вклад авторов**

Федурин Е. Ю. – сбор, систематизация и обработка материала, проведение расчетов, анализ полученных данных, подготовка рисунков, написание статьи.

Калинин Н. А. – идея статьи, постановка задачи исследования, научное редактирование текста.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors**

Yegor Yu. Fedurin – material collection, systematization, and processing; calculations; analysis of the data obtained; preparation of the figures; writing of the article.

Nikolay A. Kalinin – the idea; statement of the research problem; scientific editing.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.