

УДК622:504(622.271.3:622.012.3:622.235)

МОНИТОРИНГ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

© 2024 г. С. Ю. Рыбнов¹, А. В. Крашенинников¹, С. П. Соловьев¹, Ю. С. Рыбнов^{1, *}¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: rybnov.y@idg.ras.ru

С целью определения влияния крупных городских агломераций на среду обитания при ИДГ РАН с 2014 г. функционирует Центр геофизического мониторинга г. Москвы, в котором систематически выполняются инструментальные наблюдения за геофизическими полями и метеорологическими характеристиками приземной атмосферы. С учетом возникновения новых задач, а также необходимости расширения технических возможностей Центра в 2022 г. проведена его модернизация: расширен перечень регистрирующих средств и обновлены методики наблюдений и анализа данных. Получаемые в Центре данные позволяют оценить взаимосвязь энергетических параметров приземного слоя атмосферы с возмущениями геофизических полей природного и техногенного происхождения и уровнем загрязнения атмосферы мелкодисперсными частицами.

Ключевые слова: термодинамический режим, инструментальные наблюдения, геофизические и метеорологические поля, техногенные и природные источники.

Для цитирования: Рыбнов С.Ю., Крашенинников А.В., Соловьев С.П., Рыбнов Ю.С. Мониторинг термодинамического режима атмосферной турбулентности // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 1. С. 43–51. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_43

Введение

Контроль за экологическим состоянием окружающей среды и сокращение ее загрязнения является на сегодня одной из важнейших задач человеческого общества, напрямую связанной с возможностью его дальнейшего технологического развития и безопасностью¹.

Одним из определяющих экологических факторов территорий является состояние воздушной среды, которое определяется характеристиками атмосферного пограничного слоя (АПС), в особенности его приземной части. При этом мезомасштабная экологическая ситуация, формирующаяся на локальной территории в тот или иной период времени, определяется не только загрязнением АПС источниками выбросов, но и возмущениями геофизических полей от природных и техногенных источников. Существенную роль в этом случае играют метеорологические факторы – скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, присутствие вертикальных ветровых потоков и потоков тепла, наличие особых состояний АПС (инверсии, конвекции), другие статистические, динамические и метеорологические характеристики. Поэтому анализ и прогнозирование экологического состояния АПС требуют осуществления комплексного контроля его параметров, в том числе, не входящих в стандартный перечень величин, контролируемых гидрометеорологической службой.

Обеспечение контроля экологической и метеорологической ситуации в режиме мониторинга и реализации технологий мезомасштабного и краткосрочного прогнозирования состояния АПС требуют применения новых инструментальных средств и использования созданных на их основе программно-аппаратных систем для определения метеорологических и термодинамических параметров атмосферы.

В соответствии с Прогнозом научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 г.² в качестве приоритетных направлений научных исследований в сфере комплексной

¹ Указ Президента Российской Федерации № 7 от 5 января 2016 г.

² Утвержден Правительством РФ 03.01.2014 г.

оценки и прогнозирования состояния окружающей среды выделяется – разработка новых методов инструментального контроля экологического состояния окружающей среды, в частности, возмущений естественных физических полей и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

С целью определения влияния крупных городских агломераций на биосферу при ИДГ РАН с 2014 г. функционирует Центр геофизического мониторинга (ЦГМ) г. Москвы, в котором систематически выполняются инструментальные наблюдения за геофизическими полями и метеорологическими характеристиками приземной атмосферы [Спивак и др., 2016; 2020; Рыбнов и др., 2019; 2023а]. В настоящее время в ЦГМ используется профессиональная автоматизированная цифровая метеостанция Davis Vantage Pro2 [Спивак и др., 2016]. Метеостанция производит измерения основных параметров атмосферы: атмосферное давление, температуру и влажность воздуха, количество осадков, солнечную радиацию, ультрафиолетовое излучение, скорость и направление ветра.

Модернизация ЦГМ

В 2022 г. выполнена модернизация ЦГМ на основе расширения состава используемых средств регистрации и привлечения более совершенных методик измерений и обработки данных [Рыбнов и др., 2023б]. Модернизация ЦГМ позволяет решать новые задачи, связанные с мониторингом метеорологической ситуации, геофизических полей природного и техногенного происхождений, и повысить достоверность получаемой информации.

Центр дооснащен измерителем метеорологических величин АМК-04 (зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 36115-07) с функцией определения не только метеорологических параметров атмосферы, но также и термодинамического режима атмосферной турбулентности в приземном слое (ПС) [Богусевич и др., 2016].

На рис. 1 приведена фотография измерителя АМК-04, установленного в ЦГМ ИДГ РАН. АМК-04



Рис. 1. Фотография измерителя АМК-04, установленного в ЦГМ ИДГ РАН

регистрирует стандартные метеопараметры с частотой 80 Гц; с помощью программного обеспечения (ПО) Метео 3.0 вычисляет их средние значения. Время осреднения 1–20 мин. Перечень регистрируемых стандартных метеопараметров приведен в табл. 1.

Таблица 1.

Регистрируемые метеопараметры

Регистрируемый параметр	Диапазон измерения	Погрешность измерения
Средняя температура воздуха, T	-50–+50° С	$\pm 0.3^\circ \text{С}$ при $T < +30^\circ \text{С}$ $\pm 0.5^\circ \text{С}$ при $T > +30^\circ \text{С}$
Атмосферное давление, P	693–067 гПа	$\pm 1 \text{ гПа}$
Относительная влажность воздуха, r	10–100%	$\pm 2.5\%$ при $T > 0^\circ \text{С}$ $\pm 5\%$ при $T < 0^\circ \text{С}$
Скорость горизонтального ветра, V	0.1–40 м/с	$\pm (0.1 + 0.02V)$
Направление горизонтального ветра, D	0–360 град	$\pm 4 \text{ град}$
Скорость вертикального ветра, W	-15–+15 м/с	$\pm (0.1 + 0.02W)$

Кроме того, ПО Метео 3.0 вычисляет дополнительные параметры: e – упругость (давление) водяного пара, гПа; Ed – дефицит влажности, гПа; Td – температура точки росы, °С; $\sigma[V]$ – стандартное отклонение скорости горизонтального ветра, м/с; $\sigma[D]$ – стандартное отклонение направления ветра, м/с; $\sigma[W]$ – стандартное отклонение скорости вертикального ветра, м/с.

Мониторинг параметров турбулентности ПС

Кроме стандартных метеорологических величин АМК-04 вычисляет параметры турбулентности атмосферы в приземном слое, которые определяют термодинамический режим атмосферной турбулентности в приземном слое.

Термодинамический режим атмосферной турбулентности в ПС определяет эффекты взаимодействия атмосферы с различными геофизическими полями и в значительной степени определяется вертикальными турбулентными потоками тепла Q и вертикальным импульсом массы τ [Монин, Яглом, 1965; Бызова и др., 1989; Татарский, 1967].

Данные параметры могут быть вычислены через смешанные корреляционные моменты турбулентных флуктуаций горизонтальной V' и вертикальной W' компонент скоростей ветра и температуры T' , измеренных за конечный промежуток времени Δt , по формуле:

$$Q = \rho \cdot C_p \langle T' \cdot W' \rangle, \quad \tau = -\rho \langle V' \cdot W' \rangle,$$

где: ρ – плотность воздуха, C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $\langle \dots \rangle$ – статистически усредненная величина за время Δt .

Параметры V' и W' позволяют в свою очередь вычислить динамическую скорость

$$u^* = \langle V' \cdot W' \rangle$$

и масштаб температуры

$$T^* = - \langle T' \cdot W' \rangle / u^*,$$

которые в соответствии с теорией подобия Монина – Обухова определяют вертикальную структуру ПС и позволяют оценивать характерный высотный масштаб, называемый масштабом Монина – Обухова

$$L^* = \langle T \rangle \cdot (u^*)^2 / (\chi \cdot g \cdot T^*),$$

где: $\chi = 0.4$ – постоянная Кармана; $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\langle T \rangle$ – усредненное значение температуры воздуха в градусах Кельвина.

На практике измерения масштаба Монина – Обухова L^* проводят на какой-либо фиксированной высоте h . Поэтому для оценки параметров термодинамической устойчивости пограничного слоя атмосферы применяют безразмерный параметр $K_{si} = h/L^*$, называемый числом Монина – Обухова. В нашем случае высота установки АМК-04 – 20 м.

Значение и знак величины L^* или K_{si} характеризует термодинамическую устойчивость атмосферы в ПС. При ее неустойчивом состоянии $L^* < 0$, а при устойчивом – $L^* > 0$. Знак L^* определяется исключительно знаками T^* , Q и τ . При неустойчивой стратификации $T^* < 0$, $Q > 0$, $\tau < 0$ (поток тепла направлен вверх от земной поверхности – наблюдается конвекция), а при устойчивой – $T^* > 0$, $Q < 0$, $\tau < 0$ (нисходящий поток тепла обычно имеет место в случае приземной инверсии). При этом, в средне неустойчивой атмосфере ПС могут наблюдаться кратковременные нисходящие потоки воздуха и, наоборот, в средне устойчивой атмосфере могут наблюдаться кратковременные восходящие потоки. Вследствие чего время усреднения Δt при вычислении Q , T^* и τ для оценки представительного (статистически значимого) значения L^* должно быть достаточно большим (порядка 10–20 минут) [Браун, 1978; Атмосфера, 1991; Кригель, 2016].

Параметры атмосферной турбулентности, вычисленные с помощью ПО Метео 3.0, приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Вычисленные параметры турбулентности

Параметр турбулентности	Значение
$Ev = (\sigma V^2 + \sigma W^2)/2$ – полная энергия турбулентности (σV^2 , σW^2 – дисперсия турбулентных пульсаций скорости ветра)	(м/с) ²
$E_T = \sigma T^2/2$ – энергия температурных флуктуаций (σT^2 – дисперсия турбулентных пульсаций температуры T)	° К ²
$\langle T \cdot W \rangle$ – момент потока тепла	° К·м/с
$Q = \rho \cdot C_p \langle T \cdot W \rangle$ – вертикальный поток тепла	Дж/м ² ·с
$\tau = -\rho \langle V \cdot W \rangle$ – вертикальный импульс массы	кг/м·с ²
$u^* = \langle V \cdot W \rangle$ – динамическая скорость	м/с ²
$T^* = -\langle T \cdot W \rangle / u^*$ – масштаб температуры	° К
$L^* = \langle T \rangle \cdot (u^*)^2 / (\chi \cdot g \cdot T^*)$ – масштаб Монина – Обухова	м
$K_{si} = h/L^*$ – число Монина – Обухова	

Таблица 3.

Стратификация ПС и направление потока тепла атмосферы в зависимости от числа Монина – Обухова

Масштаб Монина – Обухова, L^*	Число Монина – Обухова, K_{si}	Стратификация пограничного слоя	Направление потока тепла
1÷10	20÷2	Устойчивая	Нисходящий поток тепла (инверсия)
10÷100	2÷0.2	Слабоустойчивая	
-1÷-10	-20÷-2	Очень неустойчивая	Восходящий поток тепла (конвекция)
-10÷-40	-2÷-0.5	Умеренно неустойчивая	
-40÷-100	-0.5÷-0.2	Слабо неустойчивая	
Более -100 Менее 100	Более -0.2 Менее 0.2	Нейтральная	

В табл. 3 приведены термодинамические параметры атмосферы (стратификация ПС и направление потока тепла) в зависимости от числа Монины – Обухова. На рис. 2 представлена схема, отражающая термодинамическое состояние ПС атмосферы в зависимости от числа Монины – Обухова.

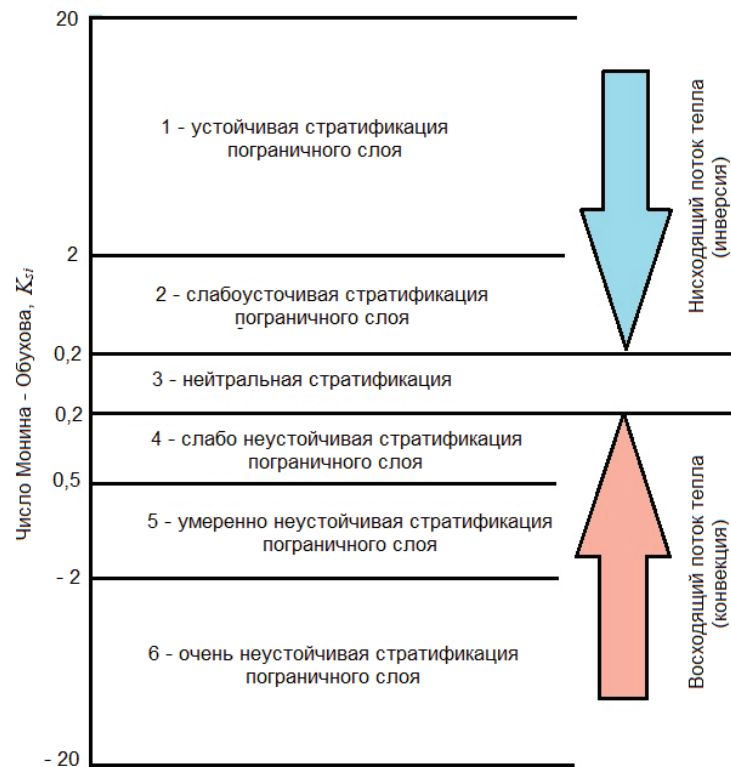


Рис. 2. Термодинамическое состояние ПС атмосферы в зависимости от числа Монины –Обухова K_{si}

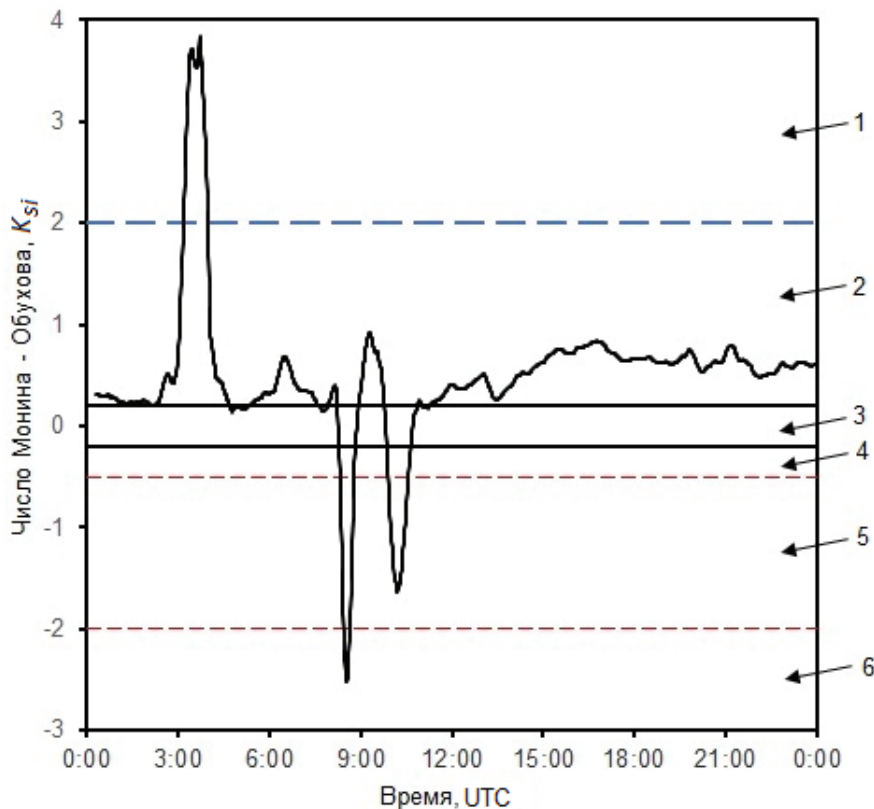


Рис. 3. Вариации числа Монины – Обухова в ЦГМ ИДГ РАН. Цифрами 1–6 обозначены зоны стратификации ПС атмосферы (см. рис. 2)

В качестве примера на рис. 3 приведен график вариаций числа Монины – Обухова в ЦГМ ИДГ РАН 18 августа 2023 г. Видно, что с 02:45 до 08:12 UTC наблюдалась устойчивая и слабоустойчивая стратификация ПС. С 08:12 по 08:40 UTC и с 09:40 по 10:30 UTC состояние ПС было слабо и умеренно неустойчивое и наблюдалась конвекция. После 10:30 UTC, как и в период с 02:45 до 08:12 UTC, наблюдались слабоустойчивая стратификация ПС и нисходящий поток тепла (инверсия).

Это хорошо видно на рис. 4, где приведены вариации метеопараметров ПС 18 августа 2023 г., зарегистрированные в ИДГ РАН. Времена вариаций температуры и атмосферного давления удовлетворительно совпадают с вариациями числа Монины – Обухова при инверсии.

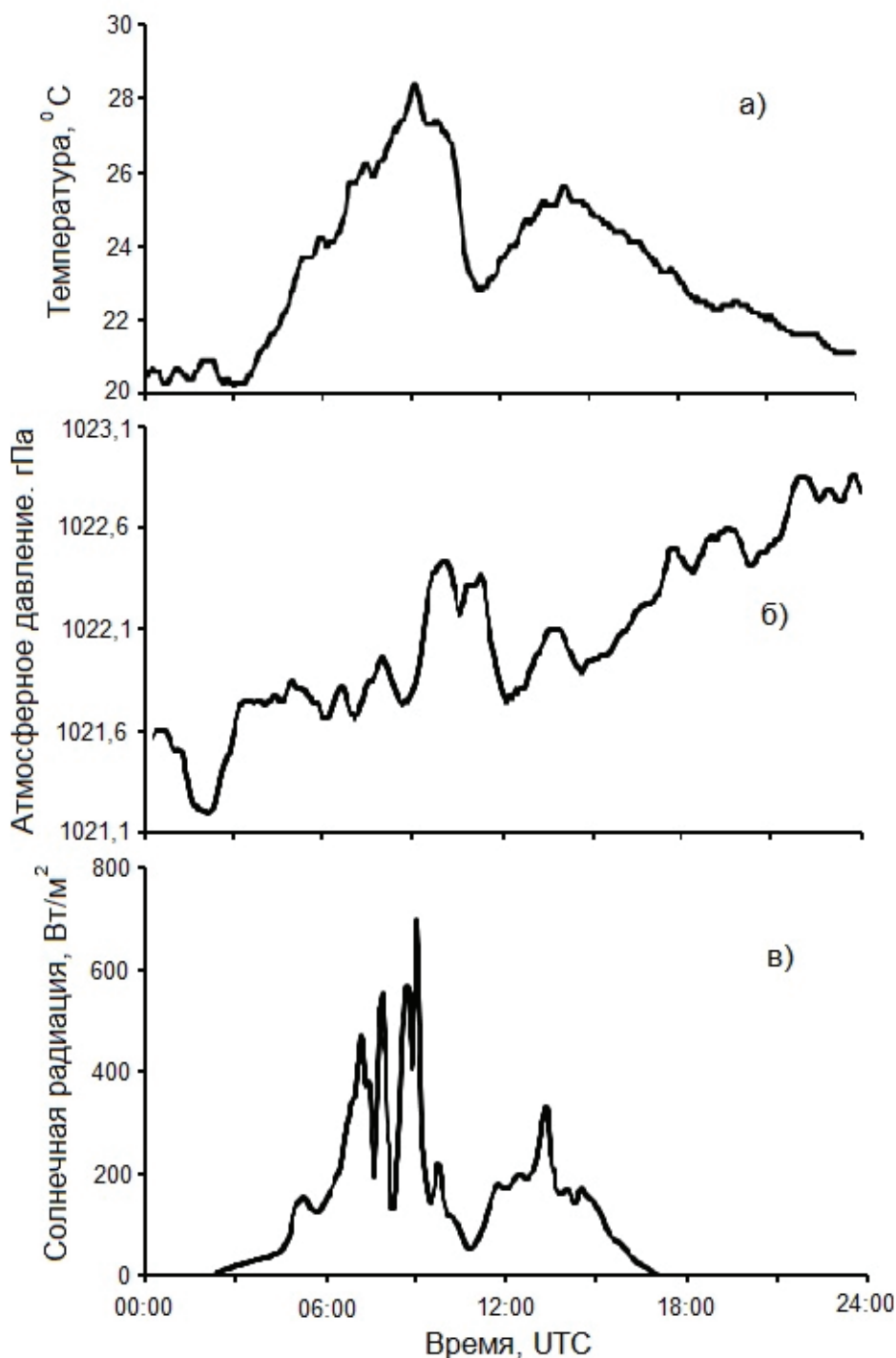


Рис. 4. Вариации метеопараметров ПС 18 августа 2023 г. в ИДГ РАН: а) – температура воздуха, б) – атмосферное давление, в) – уровень солнечной радиации

Интенсивные колебания уровня солнечной радиации, резкое падение температуры и сильные вариации атмосферного давления совпадают по времени с вариациями числа Монины – Обухова при конвекции. Необходимо отметить, что в течение дня наблюдались перисто-кучевые облака на высотах до 2.5 км. Однако приблизительно с 09 до 15 UTC наблюдались слоисто-кучевые облака на высотах 1–1.5 км и были зафиксированы осадки.

Заключение

Данные, получаемые с помощью АМК-04, позволяют оценивать такие термодинамические параметры приземного слоя атмосферы как: полную энергию турбулентных движений; относительную интенсивность флуктуаций скорости ветра; энергию температурных флуктуаций; момент потока импульса; момент потока тепла; вертикальный поток импульса; вертикальный поток тепла; структурную постоянную температурных и ветровых флуктуаций; масштаб и число Монины – Обухова; устойчивость (движение потоков тепла).

В процессе дальнейших исследований, на базе полученных данных, предполагается разработать новые алгоритмы контроля атмосферного ПС. Это также позволит найти корреляционные связи между энергетическими параметрами ПС атмосферы и геофизическими полями от природных или техногенных источников – акустическими, электрическими, магнитными и уровнем загрязнения атмосферы мелкодисперсными частицами.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (тема № 122032900185-5).

Список литературы

- Атмосфера. Справочник / Под ред. Ю.С. Седунова. Л. : Гидрометеиздат. 1991. – 508 с.
- Богущевич А.Я., Корольков В.А., Тельминов А.Е., Тихомиров А.А. Информационно-вычислительная система для непрерывного эколого-метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя. В сб.: Методические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. ВУНЦ ВВС «ВВА». Воронеж. 2016. С. 136–140.
- Браун Р.А. Аналитические методы моделирования планетарного пограничного слоя (пер. с англ.) / под ред. Д. В. Чаликова. Л. : Гидрометеиздат. 1978. – 150 с.
- Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л. : Гидрометеиздат. 1989. – 227 с.
- Кригель А.М. Вопросы термодинамики турбулентной конвекции // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 11. С. 136–139
- Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М. : Наука. 1965, ч. 1. – 226 с.
- Рыбнов Ю.С., Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Рыбнов С.Ю., Соловьев С.П., Спивак А.А. Развитие системы комплексных инструментальных наблюдений за геофизическими полями в центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2023б. Т. 59. № 1. С. 33–47.
- Рыбнов Ю.С., Соловьев С.А., Крашенинников А.В., Рыбнов С.Ю. Вариации геофизических полей при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. // Динамические процессы в геосферах. 2023а. Т. 15. № 1. С. 63–72. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_63
- Рыбнов Ю.С., Спивак А.А., Харламов В.А. Акустические эффекты аварийных взрывов // Динамические процессы в геосферах. 2019. Т. Вып. 10. С. 118–124. <https://doi.org/10.26006/IDG.2019.11.38622>
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Аппаратура и методика для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
- Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Особенности акустического шума в атмосфере г. Москвы в условиях снижения производственной активности во время карантина по covid-19 в 2020 г.

// Динамические процессы в геосферах. 2020. Вып. 12. С. 130–137. <https://doi.org/10.26006/IDG.2020.36.66.016>
Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М. : Наука. 1967. – 548 с.

MONITORING THERMODYNAMIC REGIME OF ATMOSPHERIC TURBULENCE

© 2024 S. Yu. Rybnov¹, S. P. Soloviev¹, A. V. Krasheninnikov¹, Yu. S. Rybnov^{1, *}

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: rybnov.y@idg.ras.ru*

In order to determine the impact of large urban agglomerations on the habitat, the Moscow Geophysical Monitoring Center has been operating at the IDG RAS since 2014, where instrumental observations of geophysical fields and meteorological characteristics of the surface atmosphere are systematically carried out. Taking into account the emergence of new tasks, as well as the need to expand the technical capabilities of the Center in 2022, its modernization was carried out: the list of recording tools was expanded and the methods of observation and data analysis were updated. The data obtained at the Center allow us to assess the relationship between the energy parameters of the surface layer of the atmosphere with disturbances of geophysical fields of natural and man-made origin and the level of atmospheric pollution by fine particles.

Keywords: thermodynamic regime, instrumental observations, geophysical and meteorological fields, technogenic and natural sources.