

УДК 550.34(235.216)

DOI: 10.36979/1694-500X-2021-21-8-153-158

**ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ
АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В ПЕРИОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ**

Л.Г. Свердлик

Представлены результаты наземного и спутникового мониторинга параметров атмосферного аэрозоля в сопоставлении с сейсмической активностью в Северном Тянь-Шане. Эпицентры проанализированных землетрясений с магнитудами $M > 5.0$ располагались в пределах ~ 250 км от станции "Иссык-Куль" (AERONET). Показано, что наблюдались хорошо выраженные изменения тонкодисперсной компоненты аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) и отношения массовой концентрации взвешенных в воздухе частиц (PM1.0) к оптической толщине аэрозольного рассеяния (АОТС) за несколько (от 1 до 5) дней до землетрясений.

Ключевые слова: землетрясение; Тянь-Шань; AERONET; спутниковые данные; аэрозоль; оптическая толщина; массовая концентрация.

**ТҮНДҮК ТЯНЬ-ШАНДАГЫ СЕЙСМИКАЛЫК АКТИВДҮҮЛҮК
УЧУРУНДА АТМОСФЕРАЛЫК АЭРОЗОЛДУН
ПАРАМЕТРЛЕРИНИН ӨЗГӨРҮҮ ӨЗГӨЧӨЛҮКТӨРҮ**

Л.Г. Свердлик

Бул макалада атмосфералык аэрозолдун параметрлерине жер үстүнөн жана спутниктен байкоо жүргүзүүнүн жыйынтыктары Түндүк Тянь-Шандын сейсмикалык активдүүлүгүнө салыштырмалуу берилген. Күчтүүлүгү $M > 5.0$ болгон талдоого алынган жер титирөөлөрдүн эпицентрлери Ысык-Көл станциясынан (AERONET) 250 км аралыкта жайгашкан. Жер титирөөдөн бир нече күн мурун (1ден 5ке чейин) атмосферанын аэрозолдук оптикалык калыңдыгынын (АОТ) жана абадагы бөлүкчөлөрдүн массалык концентрациясынын (PM1.0) аэрозолдун чачырашынын оптикалык жоондугуна (АОТС) болгон ачык чагылдырылган өзгөрүшү байкалган.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө; Тянь-Шань; AERONET; спутниктик маалыматтар; аэрозоль; оптикалык калыңдык; массалык концентрация.

**SPECIFICS OF VARIATIONS OF ATMOSPHERIC AEROSOL
PARAMETERS IN PERIODS OF SEISMIC ACTIVITY IN THE NORTHERN TIEN-SHAN**

L.G. Sverdlik

The paper presents the results of ground-based and satellite monitoring of atmospheric aerosol parameters against seismic activity in the Northern Tien-Shan. Epicenters of the analyzed earthquakes of $M > 5.0$ were located within ~ 250 km from the "Issyk-Kul" station (AERONET). It was demonstrated that well-defined changes of the finely dispersed component of the atmospheric aerosol optical thickness (AOT) and the ratio between mass concentrations of air particulate matter (PM1.0) and optical thickness of aerosol scattering (AOTS) several (from 1 to 5) days before earthquakes.

Keywords: earthquake; Tien-Shan; AERONET; satellite data; aerosol; optical depth; particulate matter; mass concentrations.

Введение. Важным с точки зрения понимания литосферно-атмосферного взаимодействия во время сейсмической активности является исследование пространственных и временных вариаций параметров атмосферы и, в частности, ее аэрозольных характеристик [1]. Аэрозоли играют значительную роль в радиационном балансе Земли [2, 3], региональных и глобальных изменениях климата и качества воздуха. В ряде исследований оптические свойства взвешенных в атмосфере частиц использовались в качестве индикаторов предсейсмических аномалий [4]. При этом для количественной оценки содержания аэрозоля наиболее часто анализировались вариации аэрозольной оптической толщины (*AOT*) атмосферы. Так, например, изменения аэрозольной оптической толщины, происходящие за несколько дней до сильных землетрясений в Чили (2010 г.) [5], Непале (2015 г.) [6] и Иране (2017 г.) [7], показали явное увеличение (примерно на ~40 %) вблизи эпицентра. Аномалии во временных и пространственных вариациях *AOT* наблюдались перед каждым из 8 крупных землетрясений с магнитудами $M > 8.0$ [1]. Многопараметрический подход к исследованию аномальных изменений, связанных с подготовительной фазой двух крупных сейсмических событий, показал, что высокие значения *AOT* были распределены рядом с эпицентральной областью землетрясений [8].

В настоящей работе представлены результаты исследования связи между наиболее крупными региональными сейсмическими событиями последних двух десятилетий (2003–2020 гг.) и вариациями параметров аэрозоля, основанные на данных наземного и спутникового дистанционного зондирования атмосферы.

Исходные данные. Для оценки содержания аэрозоля в атмосфере использовались результаты измерений спектральной аэрозольной оптической толщины (*AOT*) до и после землетрясений в Северном Тянь-Шане с магнитудой $M > 5.0$, эпицентры которых располагались в пределах ~250 км от станции “Иссык-Куль” (42.62 °N, 76.98 °E, 1650 м a.s.l.), входящей в состав глобальной сети *AERONET* [9, 10]. Используемые данные о параметрах аэрозоля представлены среднесуточными значениями *AOT* достоверного качества *Level 2.0* (разделение на сферические и несферические компоненты), а также данными

Level 1.5 (фильтрация облаков), обеспечивающими более представительную статистику измерений [11].

Дополнительно были проанализированы спутниковые измерения, содержащие важную информацию относительно отношения оптической толщины аэрозольного рассеяния (AOT_s) на длине волны $\lambda = 550$ нм к массовой концентрации взвешенных в воздухе мелкодисперсных частиц $PM_{1.0}$ (*Time Series, Area-Averaged of Dust Scattering AOT 550 nm – PM 1.0 μ m; MERRA-2 Model*) [12].

Сведения о сейсмических событиях с магнитудами $M > 5.0$ взяты из каталога землетрясений, составленного по данным сейсмологической сети *KNET* и онлайн-версии Международного сейсмологического центра *ISC* [13].

Обсуждение результатов. Сложность проблемы выделения связанных с сейсмической активностью вариаций оптических и микрофизических параметров атмосферы, заключается в многообразии источников эмиссии и процессов переноса загрязнений в исследуемом регионе. Анализ обратных траекторий движения воздушных масс, выполненный с использованием модели *HYSPLIT*, свидетельствует, что район расположения станции “Иссык-Куль” испытывает существенное влияние одной из крупнейших территорий эмиссии пылевого аэрозоля пустыни Такла-Макан, а также находится на пути переноса пыли с ближневосточного направления (пустыни северной Африки и Аравийского полуострова) [3, 9]. Повышенное содержание взвешенных в воздухе крупнодисперсных частиц минеральной пыли, которое ежегодно отмечается с февраля по май, является важным фактором аэрозольного загрязнения атмосферы [14]. Пылевые выносы могут наблюдаться на протяжении нескольких дней, что значительно осложняет выделение предсейсмических аэрозольных эффектов, особенно в весенние месяцы.

Вариации параметров аэрозоля по данным наземных измерений. Данные наземных измерений тонкодисперсной (*AOT-Fine*) и крупнодисперсной (*AOT-Coarse*) компонент *AOT-Total (Level 2.0)* в период прохождения землетрясения $M = 6.1$, зарегистрированного 28 января 2013 (рисунок 1, а) показали, что наиболее высокое значение аэрозольной оптической толщины, составляющее 0.325 на длине волны 440 нм

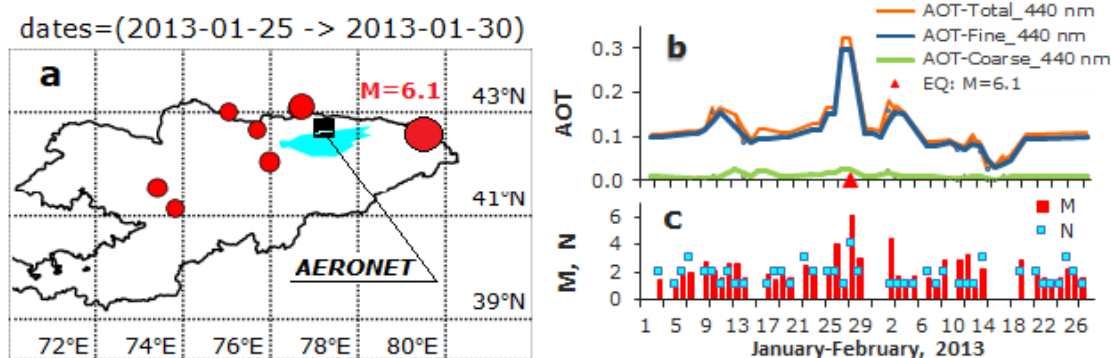


Рисунок 1 – Расположение станции “Иссык-Куль” (AERONET) и эпицентров землетрясений, произошедших 25–30 января (а); временной ход AOT_{Total} , AOT_{Fine} и AOT_{Coarse} ($Level\ 2.0$) (b) и сейсмическая активность (с) в январе–феврале 2013 г.

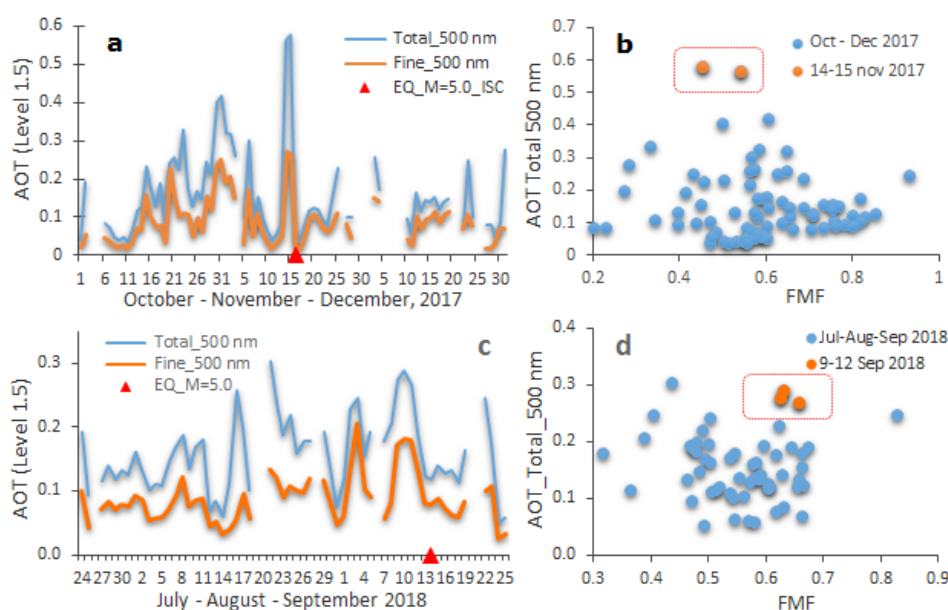


Рисунок 2 – Временные ряды среднесуточных значений AOT ($Level\ 1.5$) на длине волны 500 нм в октябре–декабре 2017 г. (а) и июле–сентябре 2018 г. (с). Маркерами показаны моменты землетрясений $M = 5.0$ (16 ноября 2017 г. и 14 сентября 2018 г.). Связь $AOT_{Total_500\ nm}$ с FMF (b и d)

(рисунок 1, b), наблюдалось за сутки до сейсмического события (рисунок 1, с). Полученные оценки вклада двух фракций аэрозоля свидетельствуют, что доминирующую роль играли мелкодисперсные частицы, которые практически определяли характер эволюции AOT_{Total} . Возможной причиной роста AOT_{Fine} является увеличение интенсивности процессов нуклеации и ионизации в приземном слое атмосферы [4, 7].

Другими показательными примерами фотометрических измерений могут служить вариации среднесуточных значений AOT ($Level\ 1.5$) на длине волны 500 нм, и соответствующие изменения относительного вклада мелкодисперсной фракции в оптическую толщину аэрозоля (FMF) в октябре–декабре 2017 г. (рисунок 2, а) и в июле–сентябре 2018 г. (рисунок 2, с), охватывающие периоды подготовки и прохождения землетрясений магнитудой $M = 5.0$ (01:42:56

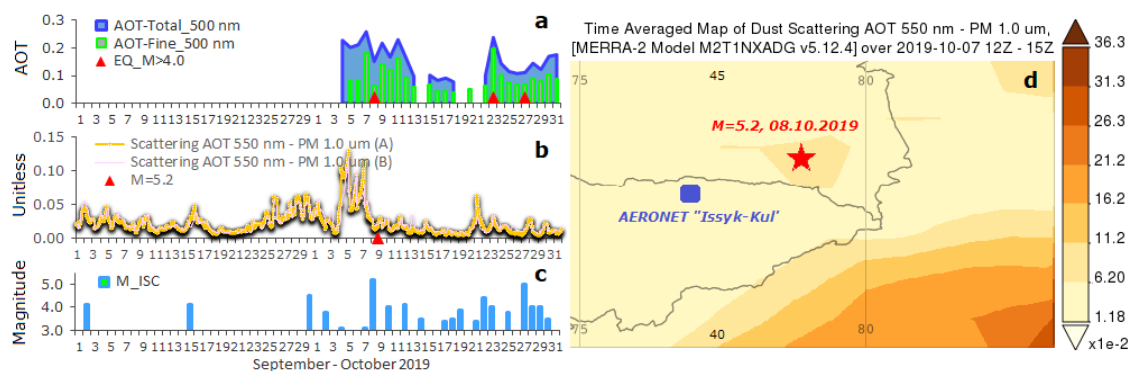


Рисунок 3 – Данные наземных измерений AOT и AOT-Fine (500 нм) (a); вариации $AOT_s / PM_{1.0}$ над станцией AERONET и эпицентром землетрясения с магнитудой $M = 5.2$ (b); сейсмическая активность (c) в сентябре–октябре 2019 г.; пространственное распределение $AOT_s / PM_{1.0}$ за сутки до землетрясения $M = 5.2$, произошедшего 08 октября 2019 (d)

UTC; 16 ноября 2017 г.; 41.90 °N; 77.37 °E) и $M = 5.0$ (22:15:03 UTC; 14 сентября 2018 г.; 41.88 °N; 77.15 °E). Данные дистанционного зондирования показали явное увеличение AOT за 1–3 суток до землетрясений (14–15 ноября 2017 г. и 09–12 сентября 2018 г.). При этом в обоих случаях (рисунок 2, b, d) повышенные значения AOT-Total (~0.570 и ~0.280–0.290, соответственно) в значительной степени определялись мелкодисперсными частицами атмосферного аэрозоля ($FMF = 0.55–0.70$).

Результаты спутниковых измерений параметров аэрозоля. Особенности предсейсмических вариаций спектров размеров частиц были также обнаружены с использованием параметра $\mu = AOT_s / PM_{1.0}$, характеризующего связь между массовой концентрацией и оптической толщиной аэрозольного рассеяния [4]. На рисунке 3 показаны вариации AOT-Total и AOT-Fine на длине волны 500 нм (рисунок 3, a) и $AOT_s / PM_{1.0}$ (рисунок 3, b) в сентябре–октябре 2019 г., когда вблизи пункта AERONET были зарегистрированы несколько землетрясений с магнитудами $M > 4.0$ (рисунок 3, c), включая события: $M = 5.2$ (08.10.2019); $M = 4.5$ (22.10.2019) и $M = 5.1$ (27.10.2019). На рисунке 3, b показаны согласованные изменения $AOT_s / PM_{1.0}$ над станцией AERONET и эпицентральной областью землетрясения с магнитудой $M > 5.2$ (кривые A и B, соответственно).

Характерная изменчивость оптических характеристик аэрозольной атмосферы, предшествующая землетрясению, может быть связана

с развитием сейсмического процесса, который сопровождался генерацией мелкодисперсного аэрозоля. Область локального изменения дисперсного состава аэрозоля вблизи эпицентра землетрясения $M = 5.2$ явно выделяется на карте пространственного распределения $AOT_s / PM_{1.0}$ (рисунок 3, d). Такая картина наблюдалась 07 октября 2019 г. и ограничивалась достаточно непродолжительным периодом времени с 12:00 до 15:00 UTC, примерно за 32 часа до сейсмического события.

Результаты вычисления нормированных отношений $1/\mu$, приведенных к одному моменту землетрясения для событий с магнитудой $M \geq 5.0$, зарегистрированных в 2003–2020 гг., показаны на рисунке 4. Представленные случаи демонстрируют примеры очевидной связи между параметрами аэрозоля и сейсмичностью. Аномальные изменения $1/\mu$, наблюдаемые за 1–5 дней до землетрясений, можно, вероятно, объяснить присутствием в атмосфере преимущественно тонкодисперсных частиц, которые оказывали существенное влияние на AOT, но незначительно изменяли массовую концентрацию $PM_{1.0}$.

Пространственное распределение отношения $AOT_s / PM_{1.0}$ по данным спутникового зондирования за сутки до сильных землетрясений, произошедших 17 ноября 2015 г. ($M = 5.6$) и 19 июля 2016 г. ($M = 5.1$), представлено на рисунке 5. Области повышенных значений отношения оптической толщины к массовой концентрации наблюдались вблизи эпицентров за сутки до землетрясений.

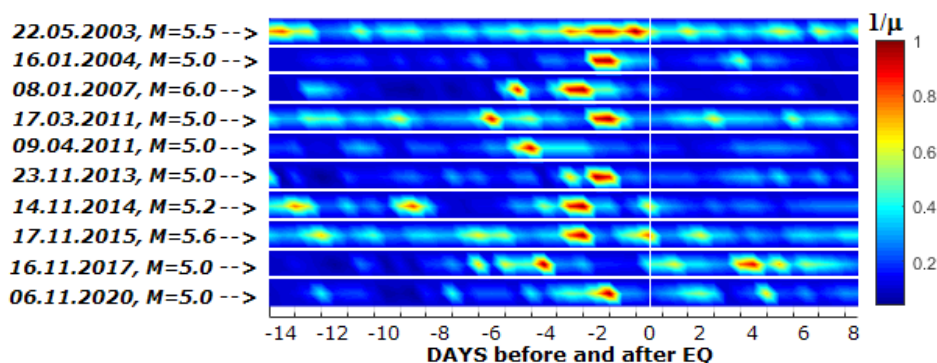


Рисунок 4 – Распределение нормированных отношений $1/\mu$ в периоды времени, начиная с 14 дней до, и заканчивая 7 днями после каждого события $M > 5.0$ в Северном Тянь-Шане

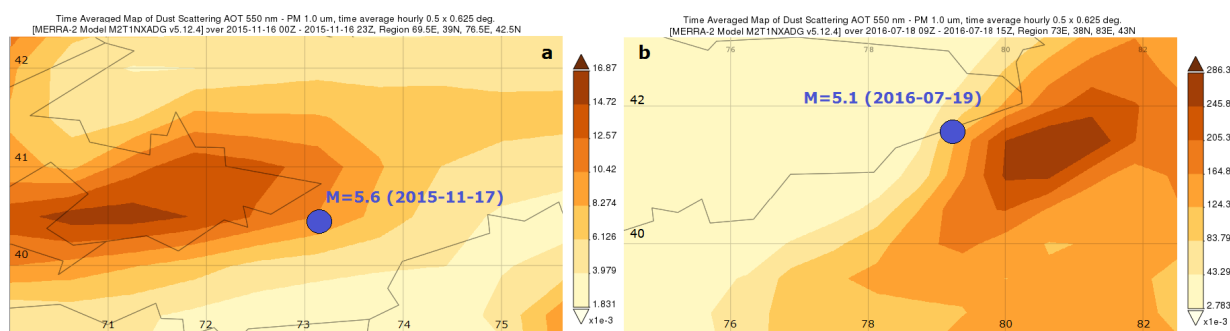


Рисунок 5 – Пространственное распределение параметра μ ($Scattering AOT_{550 nm} - PM_{1.0 \mu m}$) за сутки до сильных землетрясений магнитудой $M > 5.0$: 17 ноября 2015 г. (а) и 19 июля 2016 г. (б)

Заключение. Проанализированы результаты наземных (*AERONET*) и спутниковых (*MERRA-2*) измерений параметров атмосферного аэрозоля в сопоставлении с несколькими случаями сейсмической активности на территории Тянь-Шаня в 2003–2020 гг. Рассмотрены периоды, предшествующие землетрясениям $M > 5.0$, эпицентры которых располагались в пределах ~ 250 км от станции *AERONET*. Данные наземного дистанционного зондирования показали выраженные аномальные изменения аэрозольной оптической толщины (*AOT*) за 1–5 суток до землетрясений. При этом доминирующий вклад в повышенные значения аэрозольной оптической толщины вносили тонкодисперсные частицы, которые практически определяли характер эволюции *AOT*. Подобные изменения аэрозольных характеристик, вероятно, были связаны с сейсмическим процессом.

Важным с точки зрения понимания литосферно-атмосферного взаимодействия во время

сейсмической активности является исследование не только временных вариаций, но и пространственное распределение аэрозольных характеристик. Продемонстрированы атмосферные эффекты, сопровождающие процессы подготовки сильных землетрясений и характеризующиеся аномальным изменением соотношения между рассеивающими свойствами и массовой концентрацией взвешенных в воздухе частиц с аэродинамическим диаметром менее $1.0 \mu m$ ($PM_{1.0}$). Пространственное распределение этого параметра характеризовалось наличием локальных максимумов, наблюдаемых вблизи эпицентров землетрясений магнитудой $M > 5.0$ и предшествующих событиям.

Приведенные примеры совместного анализа результатов фотометрических измерений и спутниковых данных подтверждают наличие характерных особенностей во временной динамике параметров атмосферного аэрозоля в предсейсмический период. Однако полученные результаты

являются предварительными и необходимо проведение дополнительных исследований.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC и руководителю проекта AERONET доктору Б. Холбену за обеспечение свободного доступа к данным дистанционного зондирования атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкек (тема № АААА-А19-119020190064-9).

Литература

1. Liu Q. Aerosol anomalies associated with occurrence of recent strong earthquakes ($>M8.0$) / Q. Liu, X. Shen, J. Zhang, J. Cui, S. Zhao // Geophysical Research Abstracts. 2019. Vol. 21. P. 3938.
2. Свердлик Л.Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2014. № 4. С. 26–31.
3. Свердлик Л.Г. Радиационные свойства атмосферного аэрозоля в регионе Северного Тянь-Шаня / Л.Г. Свердлик // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 12. С. 156–163.
4. Sverdlik L. Variations of atmospheric aerosol parameters in periods of seismic activity in Tien-Shan / L. Sverdlik // E3S Web of Conferences. 2020. 149. 03007. RPERS 2019. doi: 10.1051/e3sconf/202014903007.
5. Jiao Z-H. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review / Z-H. Jiao, J. Zhao, X. Shan // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018. № 4. Pp. 1013–1036.
6. Ganguly N.D. Atmospheric changes observed during April 2015 Nepal earthquake / N.D. Ganguly // Atmos. Sol. Terr. Phys. 2016. V. 140. Pp. 16–22.
7. Akhoondzadeh M. Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 Mw = 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS-TEC and climatological data / M. Akhoondzadeh, A. De Santis, D. Marchetti, A. Piscini, S. Jin // Advances in Space Research. 2019. V. 64. Pp. 143–158.
8. Liu Q. Multi-Parametric Climatological Analysis Reveals the Involvement of Fluids in the Preparation Phase of the 2008 Ms 8.0 Wenchuan and 2013 Ms 7.0 Lushan Earthquakes / Q. Liu, A. De Santis, A. Piscini, G. Cianchini, G. Ventura, X. Shen // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 1663–1686. doi: 10.3390/rs12101663.
9. Свердлик Л.Г. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над северным Тянь-Шанем / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 3. С. 3–9.
10. Свердлик Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET) / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2013. № 3. С. 3–7.
11. The AERONET (AErosol RObotic NETwork). URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 20.05.2021).
12. The Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 28.05.2021).
13. The International Seismological Centre (ISC). URL: <http://www.isc.ac.uk> (дата обращения: 15.05.2021).
14. Sverdlik L.G. Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia / L.G. Sverdlik, B.B. Chen, Y.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner, S.V. Samoilova // В сб.: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 20, Atmospheric Physics. 2014. С. 92923J.