УДК 541:528.342

# ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29 МАРТА 2006 ГОДА НА ФЛУКТУАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПРИЗЕМНЫЕ ПРОФИЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2022 г. Г. А. Буш<sup>*a*, \*\*</sup>, Н. Ф. Еланский<sup>*a*</sup>, Е. Н. Кадыгров<sup>*b*</sup>, С. Н. Куличков<sup>*a*, *c*, \*, И. П. Чунчузов<sup>*a*</sup>, Н. С. Прокошева<sup>*d*</sup></sup>

<sup>а</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup> "Центральная аэрологическая обсерватория" Росгидромета,

ул. Первомайская, 3, Долгопрудный, Московской обл., 141700 Россия

<sup>с</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, дом 1, строение 2, ГСП-1, Москва, 119081 Россия

<sup>d</sup> Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,

ул. Горького, 87, Владимир, 600000 Россия

\*e-mail: snk@ifaran.ru \*\*e-mail: bushgregory@yandex.ru Поступила в редакцию 12.02.2022 г. После доработки 02.03.2022 г. Принята к публикации 11.04.2022 г.

Приведены данные измерений флуктуаций атмосферного давления совместно с измерениями профилей температуры воздуха в приземном слое атмосферы во время полного солнечного затмения 29 марта 2006 года в г. Кисловодске на центральной линии тени. Полная фаза затмения началась в 15 ч 15 мин по местному времени и продолжалась 2 мин 32 с. По измерениям температурных профилей восстановлены колебания разности атмосферного давления на уровне земной поверхности и на некоторой высоте, до которой измерялись профили температуры. Восстановленные колебания сравнивались с флуктуациями атмосферного давления, записанные микробарографом, а также с флуктуациями давления в период солнечного затмения в Тынде Амурской области 31.07.1981. Впервые показано, что в пульсации атмосферного давления на уровне земли основной вклад вносят, вызванные солнечным затмением, временные изменения вертикальных профилей температуры воздуха в приземном слое атмосферы.

**Ключевые слова:** солнечное затмение, пульсации атмосферного давления, реконструированные профили температуры

**DOI:** 10.31857/S0002351522040034

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изменения температуры земной поверхности, вызванные солнечным затмением, вызывают изменения температуры приземного воздуха, которые распространяются в вышележащие слои атмосферы. Колебания температуры воздуха, в свою очередь, вызывают изменения плотности воздуха и атмосферного давления.

В настоящей работе впервые проведено сравнение результатов измерений пульсаций атмосферного давления на уровне земной поверхности и флуктуациями температуры воздуха в диапазоне высот от 0 до 600 метров. Измерения проводились на Кисловодской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН на центральной линии тени, для случая полного солнечного затмения 29 марта 2006 г. Измерение профилей температуры осуществлялось с использованием микроволнового сканирующего температурного профилемера [2]. Следует отметить, что до затмения, во время затмения и после затмения погода была благоприятной для проведения измерений. а именно, наблюдалось полное отсутствие облачности, что бывает весьма редко во время подобных экспериментов [3-5]. Например, во время полного солнечного затмения в г. Тынде 31 июля 1981 г. погодные условия были более сложными: утро в день затмения было туманное и небо было покрыто сплошной облачностью. К 11 ч 50 мин местного времени туман заметно ослабел, а к 13 ч 10 мин небо местами прояснилось. Во время полной фазы затмения, в 13 ч 31 мин, солнечный диск был виден сквозь полупрозрачные облака, а к 14 ч. 00 мин небо значительно прояснилось и до конца наблюдений сохранялась переменная облачность (3-4 балла). Таким образом, на нагрев почТемпература воздуха и сглаженные пульсации атмосферного давления.

Кисловодск. 29.03.2006 15 5 Полная фаза затмения 10 0 Т гранд Тавление Ра 5 -5 Температура n -108 10 12 14 16 18 20 22 24 Время местное. Ширина сглаживания 10 мин

Рис. 1. Изменения температуры воздуха во время солнечного затмения и сглаженные пульсации атмосферного давления 29.03.2006. Кисловодск.

вы в Тынде влияло не только солнечное затмение, но и поглощение солнечной радиации переменной облачностью, что сказывалось и на флуктуациях атмосферного давления. Подробно об этом в [6].

Ранее, в работе [7] на основе численной модели было показано, что вызванное солнечным затмением нестационарное охлаждение как озоносферы, так и тропосферы (где преобладает поглощение солнечной радиации водяным паром), является возможным источником внутренних гравитационных волн (ВГВ), распространение которых в атмосфере может вызвать заметные флуктуации атмосферного давления у поверхности земли. Результаты представленных в [7] численных расчетов колебаний атмосферного давления у поверхности земли, вызванные прохождением лунной тени при полном солнечном затмении 1 августа 2008 года, сравнивались с колебаниями давления, зарегистрированными сетью микробарографов и инфразвуковыми станциями Международной системы мониторинга. При этом, поскольку ожидаемые волны давления от затмения находились в диапазоне частот, который сильно "возмущен" колебаниями давления, вызванного атмосферными приливами и метеорологическими явлениями, то эти синоптические возмущения специальным образом удалялись из записей флуктуаций атмосферного давления, генерируемых непосредственно затмением. В [7] было сделано предположение, что преобладающим источником наблюдавшихся флуктуаций приземного давления является охлаждение тропосферы.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы путем одновременных измерений флуктуаций приземного атмосферного давления и флуктуаций температуры на разных высотах нижнего слоя тропосферы оценить возможный вклад нестационарного охлаждения поверхности земли и нижнего слоя тропосферы высотой порядка 1 км в период полного солнечного затмения в возникновение флуктуаций атмосферного давления у земной поверхности.

#### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Пульсации атмосферного давления, зарегистрированные во время солнечного затмения 29 марта 2006 года с 07 ч 53 мин по 20 ч 36 мин местного времени микробарографом, имеющем постоянную времени 350 с., а также данные метеостанции Кисловодской кардиологической клиники по температуре воздуха на уровне 5 метров от поверхности земли, показаны на рис. 1.

Результаты изменений во времени температуры воздуха на высотах 0, 100, 300 и 600 м над земной поверхностью, полученные при помощи профилемера [2], показаны на рис. 2.

На рис. 3 показаны колебания разности атмосферного давления на уровне земной поверхности и высоте h = 600 м, вычисленные с использованием данных измерений временных вариаций температуры воздуха на высотах 0, 100, 300, и 600 м. На этом же рис. 3 показаны аппроксимации этих колебаний полиномом второй степени.

Разность атмосферных давлений  $p_0(t) - p(h,t)$ , на уровне земли и высоте *h* равна весу столба воздуха  $\int_0^h gp(z,t)dz$  высотой *h*, который при  $h \ll H$ , где H(z,t) = RT/g – высота однородной атмосферы, T(z,t) – абсолютная температура, *R* – газовая постоянная, отнесенная к молекулярной массе



Рис. 2. Зависимость температуры воздуха от времени для высот (0, 100, 300, 600) м.; Кисловодск. 29.03.2006.



**Рис. 3.** Колебания перепада атмосферного давления в слое атмосферы высотой h = 600 м, рассчитанные по временным изменениям температуры воздуха на высотах 0, 100, 300, 600 м, и их аппроксимация с помощью полинома второй степени. Кисловодск. 29.03.2006.

воздуха, *g* — ускорение свободного падения, можно приближенно представить в виде (см. формулу (3А) Приложения А):

$$p_{0}(t) - p(h,t) = \int_{0}^{h} g\rho(z,t)dz \approx$$

$$\approx p_{0}(t)\int_{0}^{h} dz \frac{1}{H(z,t)} = p_{0}(t)\int_{0}^{h} dz \frac{g}{RT(z,t)}.$$
(1)

Из (1) видно, что рассматриваемая разность давлений  $p_0(t) - p(h,t)$  зависит как от медленных (по сравнению с периодом Брента-Вяйсяля, имею-

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58

щем значения порядка 5 мин) вариаций во времени приземного давления  $p_0(t)$ , которые могут быть вызваны метеорологическими и крупномасштабными волновыми процессами в атмосфере, так и от временных изменений приземного профиля температуры  $\int_0^h dz \frac{g}{RT(z,t)}$ , усреднен-

ного по высоте слоя.

**№** 4

2022

Для вычисления разности давлений (1) весь слой высотой h = 600 м, для которого измерялись профили температуры T(z,t), разбивался на тонкие слои, по которым производилось суммирова-

Восстановленные пульсации атмосферного давления по профилям температуры воздуха. Кисловодск. 29.03.2006. Профилеметр



**Рис. 4.** Пульсации атмосферного давления вблизи поверхности земли, вычисленные по профилям температуры воздуха, и пульсации давления, измеренные микробарографом (29.03.2006. Кисловодск) и отфильтрованные в диапазоне периодов (1.33–5.69) ч.

ние в (1). При этом в (1) приземное давление представлялось в виде  $p_0(t) = \overline{p}_0 + \Delta p(t)$ , где  $\overline{p}_0$  – среднее давление на поверхности земли за период измерений, а  $\Delta p(t)$  – его малые флуктуации,  $|\Delta p|/\overline{p}_0 \ll 1$ , что позволяло приближенно рассчитать вклад  $\overline{p}_0 \int_0^h dz \frac{g}{RT(z,t)}$  от временных изменений приземного профиля температуры в разность давлений (1). Полученные временные изменения разности давлений аппроксимировались полиномом, как

Из полученных с помощью профилемера колебаний разности давлений (1) вычиталось их приближение полиномом второй степени для сравнения результатов измерений в период затмения температуры T(z,t), по данным профилемера и флуктуаций атмосферного давления p(z == 0, t), измеренных микробарографом. Полученные таким образом значения вычисленных пульсаций атмосферного давления сравнивались с пульсациями атмосферного давления, зарегистрированных микробарографом в Кисловодске и отфильтрованных в диапазоне периодов (1.33-5.69) ч. Результаты сравнения показаны на рис. 4. На рис. 5 показаны пульсации атмосферного давления совместно с температурой воздуха на уровне 5 м от поверхности земли по данным метеостанции кисловодской кардиологической клиники.

Видно, что медленные колебания давления, восстановленные по временным изменениям температурных профилей в течение всего интервала времени затмения (рис. 4, верхняя панель), хорошо повторяют колебания в диапазоне периодов (1.33— 5.69) ч, полученные по данным микробарографа (рис. 4, нижняя панель), за исключением небольшой разницы во времени в достижении максимумов этих колебаний (порядка 15 мин). Это свидетельствует о том, что существенный вклад в эти колебания вносит нестационарное охлаждение поверхности земли и приземного слоя атмосферы в период затмения.

На рис. 5 видно отставание минимума давления от максимума температуры воздуха примерно на 15 мин. Такое отставание вызвано тем, что минимум температуры воздуха, вызванный охлаждением почвы в период солнечного затмения, постепенно, с течением времени, распространяется в вышележащие слои воздуха (см. рис. 2), а восстановленное приземное давление формируется соответствующим столбом воздуха высотой 600 м.

На рис. 6 показаны спектральные плотности пульсаций атмосферного давления, для интервалов времени 14 ч 00 м—18 ч 00 м 29 марта 2006 года, восстановленных по профилям температуры воздуха, измеренных профилемером и записанных микробарографом в Кисловодске, а также в Тынде 31.07.1981. на временном интервале 12—16 ч.

На рис. 7 приводятся спектральные плотности фоновых записей пульсаций атмосферного давления от 28.03.2006 на временном интервале 14— 18 ч, а также, аналогичные значения, полученные 30.03.2006 на интервале времени 8—14 ч когда солнечного затмения уже не было. Для этих дней спектральные плотности пульсаций атмосферного давления сравниваются со спектральной плотностью пульсаций атмосферного давления, записанных 29.03.2006. во время солнечного затмения на интервале времени 14—18 ч.

показано на рис. 3.

406



**Рис. 5.** Температура воздуха на высоте 5 м от поверхности земли по данным метеостанции кисловодской кардиологической клиники и пульсации атмосферного давления, восстановленные по профилям температуры воздуха измеренных температурным профилемером.



**Рис. 6.** Верхняя панель – спектральная плотность пульсаций атмосферного давления, восстановленных по профилям температуры воздуха на временном интервале 14–18 ч, Кисловодск. 29.03.2006. Средняя панель – спектральная плотность пульсаций давления, зарегистрированных микробарографом на интервале времени 14–18 ч, имеющем постоянную времени 350 сек., Кисловодск. 29.03.2006. Нижняя панель – спектральная плотность пульсаций атмосферного давления, зарегистрированных микробарографом на интервале времени 14–18 ч, имеющем постоянную времени 350 сек., Кисловодск. 29.03.2006. Нижняя панель – спектральная плотность пульсаций атмосферного давления, зарегистрированных микробарографом на интервале времени 12–16 ч, имеющем постоянную времени 1150 сек. во время затмения в г. Тында. 31.07.1981.

Из рис. 7 видно, что в спектральной плотности пульсаций атмосферного давления, соответствующей интервалу времени проявления солнечного затмения, амплитуда максимума таких флуктуаций с периодом примерно равным длительности затмения (около 2.3 ч), намного больше соответствующих величин спектральных плотностей, полученных в дни фоновых измерений в отсутствии затмения для аналогичного интервала времени. Это говорит о существенном вкладе нестационарного охлаждения земли и нижнего слоя атмосферы в возникновение колебаний атмосферного давления с периодом 2, 3 ч на протяжении характерного интервала времени существования солнечного затмения, также имеющего значения порядка 2, 3 ч.

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 4 2022



**Рис.** 7. *1* – спектральная плотность пульсаций атмосферного давления записанных во время солнечного затмения 29.03.2006. на интервале времени 14–18 ч, *2* – аналогичные значения, полученные 28.03.2006 на интервале времени 14–18 ч ; *3* – 30.03.2006. на интервале времени 8–14 ч. На горизонтальной оси стрелкой отмечен период, соответствующий длительности солнечного затмения 2.33 ч.

#### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые показано, что сравнение колебаний атмосферного давления в диапазоне периодов 1.33-5.69 часа, измеренных в день затмения микробарографом, с колебаниями давления, восстановленными по измеренным профилям температуры воздуха, показывает определенное сходство этих колебаний во времени и сравнимость по величине их двойных амплитуд, 19 и 26 Па, соответственно. Такие амплитулы колебаний сравнимы также с размахом колебаний давления (около 30 Па) на периоде в 2 ч, наблюдавшихся при солнечном затмении 22 июля 1990 года на юго-востоке Великобритании [8]. Следует отметить, что максимум спектральной плотности пульсаций атмосферного давления, измеренных микробарографом в Кисловодске, наблюдается для периода 2.84 ч, а для профилемера- для периода 2.29 ч, что примерно соответствует длительности солнечного затмения – 2.328 ч. Это говорит о существенном вкладе нестационарного охлаждения земли и нижнего слоя атмосферы в течение характерного интервала времени затмения порядка 2.3 ч в возникновение колебаний приземного атмосферного давления с периодом, близким по величине к этому временному интервалу. Полученный здесь результат, по-видимому, впервые указывает на важность учета процесса охлаждения земли и нижнего слоя атмосферы при затмении, как источника возникновения колебаний в атмосфере, наряду с другими источниками этих колебаний, вызванных резкими изменениями при затмениях поглощения солнечной радиации в стратосфере (озоном) и тропосфере (водяной пар).

Был установлен максимум ~294000 Па<sup>2</sup>/Гц в спектре пульсаций давления на периоде в 2.33 ч. полученном из записи микробарографа в период затмения. Для пульсаций атмосферного давления, вычисленных из данных профилемера, этот максимум составляет примерно 327000 Па<sup>2</sup>/Гц, а для затмения, наблюдаемого нами ранее в Тынде максимум спектра приходится на период 3.556 часа и равен 256000 Па<sup>2</sup>/Гц. Такие различия могут происходить от того, что пульсации давления на земле, измеряемые микробарографом, вызваны изменениями во времени веса всего атмосферного столба, тогда как измерения температурных профилей профилемером ограничены высотой 600 м и не учитывают вклада изменений со временем температурных профилей в слоях атмосферы, лежащих выше 600 м. Кроме того, на спектр пульсаций атмосферного давления при солнечном затмении 31.07.1981. в Тынде повлияла переменная облачность во время затмения.

Из сравнения измерений микробарографа и профилемера следует также, что существенный вклад в пульсации атмосферного давления на уровне земли вносят изменения температуры воздуха, вызванные солнечным затмением в нижнем слое атмосферы высотой порядка одного километра. Полученные данные являются уникальными в связи с исключительно благоприятными метеорологическими условиями во время полного солнечного затмения и наличием современных приборов в одной точке измерений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00021

#### 409

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Связь перепада приземного давления в слое нижней атмосферы с приземным профилем температуры

В состоянии атмосферы, близком к квазистатическому равновесию, давление p(z, x, y, t) и плотность атмосферы  $\rho(z, x, y, t)$  связаны между собой уравнением статики

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho,\tag{1}$$

для произвольной вертикали с горизонтальными координатами x, y. В последнем уравнении плотность можно выразить через давление и температуру T(z, x, y, t) с помощью уравнения состояния  $\rho = p/(RT)$ . Тогда, разделив обе части уравнения (1) на p и проинтегрировав по z от поверхности земли z = 0, где давление  $p(z = 0, t) \equiv p_0(t)$ , до некоторой высоты z = h, на которой давление  $p(z = h, t) \equiv p(h, t)$ , получим барометрическую формулу для давления

$$p(h,t) = p_0(t) \exp\left(-\int_0^h dz / H(z,t)\right), \qquad (2)$$

где H(z,t) = RT/g — высота однородной атмосферы (мы опустили всюду зависимость от *x*, *y*, подразумевая ее).

Рассмотрим нижний слой атмосферы высотой  $h \ll H$ . Это условие всегда выполняется для h менее 1 км, т.к. высота однородной атмосферы H порядка 8 км. Тогда экспонента в (2) близка к 1, поэтому ее можно разложить в ряд по малому параметру  $h/H \ll 1$  и с точностью до первого члена разложения представить (2) в виде  $p(h, t) \approx p_0(t) \left(1 - \int_0^h dz/H(z,t)\right)$ , откуда получим выражение для веса столба воздуха  $\int_0^h g\rho(z,t)dz$  высотой h:

$$p_{0}(t) - p(h,t) = \int_{0}^{h} g\rho(z,t)dz \approx$$

$$\approx p_{0}(t)\int_{0}^{h} dz \frac{1}{H(z,t)} = p_{0}(t)\int_{0}^{h} dz \frac{g}{RT(z,t)}.$$
(3)

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бовшеверов В.М., Грачёв А.И., Ломадзе С.О., Матвеев А.К. Жидкостный микробарограф // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15. № 11. С. 1215–1217.
- 2. *Kadygrov E.N., Pick D.R.* The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparison with in situ observation // Oxford Press. Meteorological Applications. 1998. V. 5. № 4. P. 393–404.
- 3. *Kadygrov E.N., Miller E.A., Troitsky A.V.* Study of Atmospheric Boundary Layer Thermodynamics During Total Solar Eclipses // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. № 9. P. 4672–4677.
- 4. Eckermann S.D., Broutman D., Stollberg M.T., Ma J., Cormack J.P.Mc, Hogan T.F. Atmospheric effects of a total solar eclipse of 4 December 2002 simulated with a high-altitude global model // Journal of Geoph. Res. 2007. V. 112. № D14. P. 1–3.
- 5. Anderson R.C., Keefer D.R. Observation of the temperature and pressure changes during the 30 June 1973 solar eclipse // Journal Atmos. Sci. 1975. V. 32. № 1. P. 228– 231.
- 6. *Буш Г.А., Грачёв А.И.* Флуктуации атмосферного давления во время солнечного затмения 31 июля 1981 г. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 7. С. 649–650.
- Marty J.F., Daladier D., Ponceau E., Blank U., Munkhuu. Surface Pressure Fluctuations Produced by the Total Solar Eclipse of 1 August 2008 // J. Atm. Sci. 2013.V. 70. P. 809–823.
- Barrie W. Jones, Gerald J. Miseldine and Robert J. A. Lambourne. A possible atmospheric pressure wave from the total solar eclipse of 22 July 1990 // J. of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1992. V. 54. № 2. P. 113–115.

## The Effect of The Solar Eclipse of March 29 2006 on Atmospheric Pressure Fluctuations and Surface Temperature Profiles

G. A. Bush<sup>1, \*\*</sup>, N. F. Elansky<sup>1</sup>, E. N. Kadyrov<sup>2</sup>, S. N. Kulichkov<sup>1, 3, \*</sup>, I. P. Chunchuzov<sup>1</sup>, and N. S. Prokosheva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky Lane, 3, Moscow, 119017 Russia

<sup>2</sup> "Central Aerological Observatory" of Roshydromet, Pervomayskaya str., 3, Dolgoprudny, Moscow region, 141700 Russia

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, building 1, building 2, GSP-1, Moscow, 119081 Russia

<sup>4</sup> Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, Gorky Str., 87, Vladimir, 600000 Russia

\*e-mail: snk@ifaran.ru

\*\*e-mail: bushgregory@yandex.ru

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 4 2022

#### БУШ и др.

The data of measurements of atmospheric pressure fluctuations together with measurements of air temperature profiles in the surface layer of the atmosphere during the total solar eclipse on March 29, 2006 in Kislovodsk on the central line of the shadow are presented. The total phase of the eclipse began at 15 h 15 min local time and lasted 2 min 32 s. According to the measurements of temperature profiles, the fluctuations of the atmospheric pressure difference at the level of the Earth's surface and at a certain height to which the temperature profiles were measured were restored. The recovered fluctuations were compared with atmospheric pressure fluctuations recorded by a microbarograph, as well as with pressure fluctuations during the solar eclipse in Tynda, Amur region, on 31.07.1981. It is shown for the first time that temporary changes in vertical profiles of air temperature in the surface layer of the atmosphere caused by a solar eclipse make the main contribution to the pulsation of atmospheric pressure at ground level.

Keywords: solar eclipse atmospheric, pressure pulsations, reconstructed temperatures profiles

410