

УДК 541:528.342

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29 МАРТА 2006 ГОДА

© 2024 г. Г. А. Буш^{a,*}, Н. Ф. Еланский^a, Е. Н. Кадыгров^b, С. Н. Куличков^{a,с**},
И. П. Чунчузов^a, Н. С. Прокошева^d

^a Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^b Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, ул. Первомайская, 3, Долгопрудный,
Московская обл., 141700 Россия

^c МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, ГСП-1, Москва, 119081 Россия

^d Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ул. Горького, 87,
Владимир, 600000 Россия

*e-mail: bushgregory@yandex.ru

**e-mail: snk@ifaran.ru

Поступила в редакцию 06.06.2023 г.

После доработки 23.07.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Приведены данные измерений профилей температуры воздуха в атмосферном пограничном слое атмосферы (АПС) во время полного солнечного затмения 29 марта 2006 года на центральной линии тени в г. Кисловодске и на Высокогорной научной станции (ВНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Солнечное затмение длилось с 14 ч 08 мин по 16 ч 27 мин местного времени, полная фаза затмения началась в 15 ч 15 мин и продолжалась 2 мин 32 с. В развитие результатов, полученных нами в предыдущей работе, проведено сравнение данных профилей температуры воздуха в двух пунктах — Кисловодске и ВНС. Исследовано влияние местных условий. Было показано, что местные условия существенно влияют как на амплитуду пульсаций атмосферного давления, вызванных солнечным затмением, так и на их фазу, а также на характер изменения спектральной плотности температуры воздуха с высотой в диапазоне периодов, соответствующих длительности солнечного затмения

По измерениям температурных профилей восстановлены колебания разности атмосферного давления на уровне земной поверхности и на некоторой высоте, до которой измерялись профили температуры, равной 600 м. Показано, что амплитуда колебаний температуры воздуха, соответствующих периоду затмения, быстро убывает с высотой, а положение минимума температуры воздуха, вызванного солнечным затмением, в координатах: высота — время имеет разные траектории в случае г. Кисловодска и ВНС. Разница же траекторий минимумов температуры воздуха в Кисловодске и на ВНС определяет и разные задержки минимумов давления относительно начала затмения и временные задержки между колебаниями приземного давления в пунктах наблюдения в целом. Также предложена новая методика определения скорости восходящих потоков воздуха с использованием данных о высотной зависимости момента времени достижения минимума во временных вариациях температуры, вызванного солнечным затмением. Сравниваются изменения спектральной плотности воздуха, с высотой, амплитуда восстановленных пульсаций атмосферного давления в Кисловодске и на ВНС, скорости восходящих потоков воздуха.

Ключевые слова: солнечное затмение. пульсации атмосферного давления. реконструированные профили температуры

DOI: 10.31857/S0002351524020068 EDN: KQFRFQ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе в развитие результатов, полученных нами в предыдущей работе [Буш и др., 2022], проведено сравнение данных профи-

лей температуры воздуха в двух пунктах — Кисловодске и ВНС.

Солнечное затмение вызывает как охлаждение атмосферы из-за движения лунной тени,

перекрывающей световой поток к части атмосферы, которая поглощает солнечное излучение, так и колебание температуры почвы, вызванное постепенным уменьшением потока солнечного света к поверхности Земли, с последующим постепенным увеличением потока света после полной фазы затмения. Изменения температуры почвы, вызванные солнечным затмением, вызывают соответствующие изменения температуры приземного слоя воздуха с последующим их распространением в вышележащие слои. Колебания температуры воздуха, в свою очередь, вызывают изменения плотности воздуха и атмосферного давления. Таким образом, прохождение лунной тени по всему пути своего движения через атмосферу и по поверхности Земли со сверхзвуковой скоростью может вызвать генерацию акустико-гравитационных волн планетарного масштаба.

Исследованию глобальных волн посвящена работа Марти и др. [Marty et al., 2013]. В [Marty et al., 2013] оцениваются колебания приземного атмосферного давления, вызванные полным солнечным затмением 1 августа 2008 года, с использованием численной линейной спектральной модели, описанной Марти и Далоде [Marty, Dalaudier, 2010]. Эта оценка сравнивается с данными, полученными на временной сети микробарографов в Монголии и инфразвуковых станций Международной системы мониторинга (МСМ) в стороне от траектории полного солнечного затмения. В [Marty et al., 2013] было обнаружено, что тропосферное охлаждение, скорее всего, является преобладающим источником колебаний атмосферного давления в диапазоне периодов порядка 12–16 ч.

Следует отметить, что в охлаждение тропосферы также вносит свой вклад и понижение температуры почвы, вызванное затмением, которое передается турбулентным перемешиванием в вышележащие слои АПС. Охлаждение тропосферы и поверхности Земли сильно зависят от облачности и погодных условий. Кроме глобальных колебаний атмосферного давления, вызванных прохождением лунной тени вдоль всего пути, происходят и локальные колебания атмосферного давления с периодами порядка длительности солнечного затмения в точках наблюдения.

Эти колебания давления вызываются колебаниями температуры почвы при затмении. Андерсон и Кифер [Anderson, Keefe, 1975] сообщали, что в спектре колебаний приземного атмосферного давления во время солнечного затмения 7 марта 1970 года на центральной линии тени, во Флориде, наибольшую амплитуду – 25 Па – имеет первая гармоника с периодом 89 м.

Другие гармоники с периодами от 12 до 57 мин имели амплитуду меньше одной четверти от амплитуды первой гармоники. Следует отметить, что на результаты наблюдений в работе [Anderson, Keefe, 1975] повлияла облачная погода во время всей продолжительности солнечного затмения.

Гудвин и Хобсон сообщают о пульсациях атмосферного давления с амплитудой 0.1–0.2 Па, периодом 23 мин и скоростью 310 м/с, записанных в нескольких сотнях километров от центральной линии тени, во время солнечного затмения 23 октября 1976 года в Южной Австралии [Goodwin, Hobson, 1978].

В работе Буша и Грачёва [Буш, Грачёв, 1984] приводятся зарегистрированные колебания атмосферного давления на центральной линии тени, во время солнечного затмения 31 июля 1981 года в Тынде, в спектре которых выделяются гармоники с периодами: 2 ч 54 мин, 1 ч 27 мин, 53 мин, 30 мин и с соответствующими амплитудами 7, 6, 4 и 2.3 Па, а также более короткие периоды с меньшей амплитудой – при длительности затмения 2 ч 40 мин. Таким образом, в спектре флуктуаций атмосферного давления, записанных на временном отрезке от 12 до 16 ч в Тынде, присутствуют различные периоды и соответствующие им пространственные масштабы: начиная от турбулентных, мезомасштабов, масштабов, соответствующих длительности затмения, и вплоть до синоптических. Необходимо отметить, что во время солнечного затмения в Тынде погода была солнечная с переменной облачностью [Буш и др., 2022; Буш, Грачёв, 1984].

Во время солнечного затмения 29 марта 2006 года в Кисловодске записаны колебания атмосферного давления при безоблачной погоде, в спектре которых сильно выделяется гармони-

ка, соответствующая длительности солнечного затмения. Эти колебания давления были сравнены с восстановленными по профилям температуры воздуха колебаниями давления в пределах высот от 0 до 600 м. На основании этого сравнения сделан вывод о том, что колебания приземного атмосферного давления в диапазоне периодов, соответствующих длительности затмения, определяются в основном изменениями температуры воздуха в АПС высотой порядка одного километра, вызванными колебаниями температуры почвы, обусловленными затмением [Буш и др., 2022]. В отличие от работы [Буш и др., 2022], в которой сравнивались данные двух разных приборов — профилемера и микробарографа в одном пункте, в настоящей работе сравниваются результаты обработки данных записанных двумя профилемерами в двух пунктах — Кисловодске и ВНС, что позволяет обнаружить влияние местных условий на результаты измерений.

В [Barrie et al., 1992] сообщается о колебаниях приземного атмосферного давления с амплитудой около 15 Па и периодом, примерно равным 2 ч, во время полного солнечного затмения на юго-востоке Великобритании 22 июля 1990 года. Наблюдаемый в [Barrie et al., 1992] период колебаний приземного давления примерно соответствует длительности затмения.

Таким образом, исследователи сообщают о разных периодах колебаний приземного давления во время солнечных затмений, что может быть вызвано разной стратификацией температуры и скорости ветра атмосферного пограничного слоя; разными погодными условиями; рельефом местности в точках наблюдения, а также различием диапазонов периодов, в которых производились измерения, и разным расстоянием пунктов наблюдения от центральной линии тени. В частности, во время солнечного затмения 10 мая 1994 года с помощью радара (FM-CW radar) наблюдалось понижение интенсивности турбулентности в пограничном слое атмосферы над пустыней и развитие волновых структур Кельвина-Гельмгольца [Eaton et al., 1997].

В работе [Kadygrov et al., 2013] были представлены результаты измерений во время полного

солнечного затмения в г. Новосибирске (1 августа 2008 г.), где также использовался для измерений профилей температуры в АПС микроволновый профилемер, но одновременно с помощью СВЧ радиометра измерялись изменения общего содержания водяного пара в столбе атмосферы до, в течение и после солнечного затмения.

Целью настоящей работы является изучение динамики колебаний температуры воздуха и ее стратификации в атмосферном пограничном слое, вызванных полным солнечным затмением 29 марта 2006 года, с использованием данных измерений температурных профилей в Кисловодске и на ВНС ИФА РАН при помощи микроволновых температурных профилемеров, расположенных на центральной линии движения лунной тени. Характеристики профилемеров описаны в [Кадыгров, 2009].

Измерения профилей температуры воздуха были произведены на высотах от 0 до 600 м от уровня поверхности Земли с шагом 50 м в городе Кисловодске (43.9° N, 42.7° E), расположенном на высоте 870 м и на ВНС (43.7° N, 42.7° E), находящейся на уровне 2070 м от уровня моря южнее Кисловодска. Погода во время затмения была безоблачной, что было благоприятным фактором для проведения эксперимента.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Колебания температуры воздуха, записанные при помощи профилемера во время солнечного затмения 29 марта 2006 года для высот: 0–600 м в городе Кисловодске — левая панель — и на ВНС — правая панель, — показаны на рис. 1 с шагом по высоте 100 м.

На рис. 2 показана временная зависимость спектральной плотности колебаний температуры воздуха, записанных в Кисловодске на отрезке времени 28–30.03.2006 г. на высотах от 0 до 600 м с интервалом 100 м в диапазоне периодов: 1 ч 26 мин — 4 ч 16 мин и зависимость во времени спектральной плотности колебаний температуры воздуха, записанных на ВНС ИФА РАН в диапазоне периодов: 1 ч 42 мин — 3 ч 25 мин для 4-часовых отрезков, на которые разбивались записанные реализации.

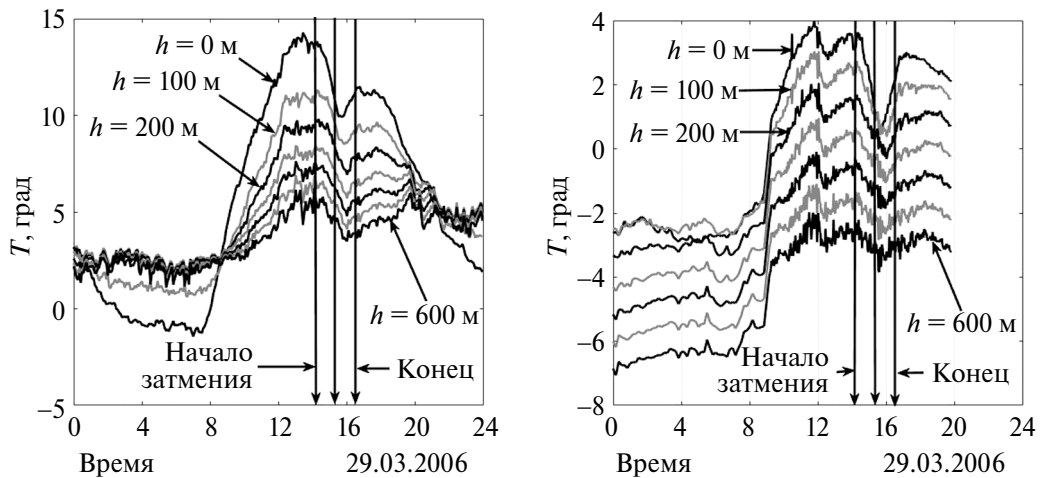


Рис. 1. Колебания температуры воздуха во время солнечного затмения 29.03.2006 г. в зависимости от высоты. Кисловодск — левая панель, ВНС — правая панель.

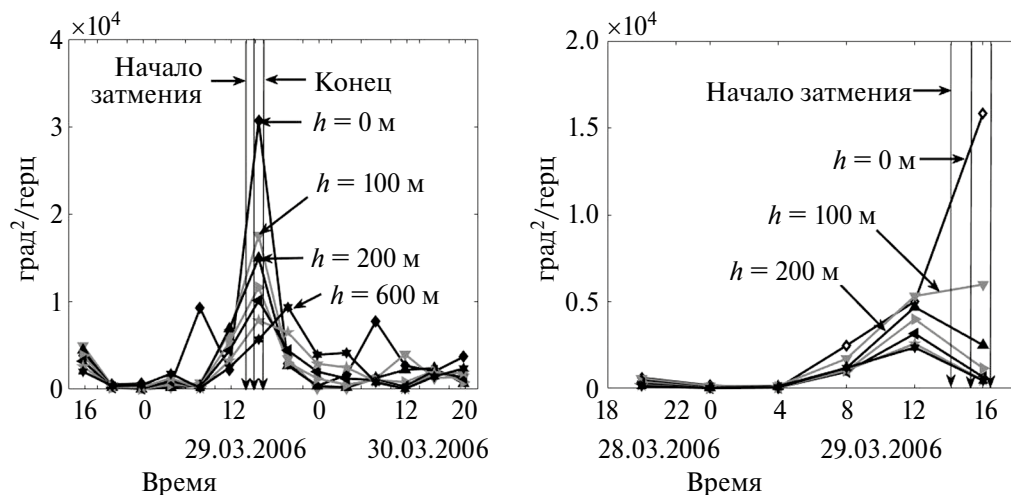


Рис. 2. Спектральная плотность колебаний температуры воздуха в диапазоне периодов 1 ч 42 мин — 4 ч 16 мин, на 4-часовых отрезках, в зависимости от времени для высот от 0 до 600 м с шагом 100 м в Кисловодске (левая панель) и спектральная плотность в диапазоне периодов 1 ч 42 мин — 3 ч 12 мин для ВНС (правая панель). Маркерами отмечены центры 4-часовых отрезков, на которые разбивались реализации колебаний температуры воздуха.

Из рис. 2 видно, что спектральная плотность колебаний температуры воздуха на временном интервале от 14 до 18 ч 29.03.2006 г., в котором произошло солнечное затмение, резко увеличивается для периодов колебаний, близких к длительности затмения, по сравнению с фоновыми значениями этих колебаний в приземном слое, а затем быстро убывает с высотой. При обработке 4-часовых отрезков колебаний температуры воздуха из них удалялись квадратичные тренды, как и в работе [Буш и др., 2022].

На рис. 3 для временного отрезка от 14 до 18 ч 29.03.2006 г., в котором произошло солнечное зат-

мение, показаны зависимости отношений спектральных плотностей колебаний температуры воздуха к спектральным плотностям на нулевой высоте (левая панель) и зависимости спектральных плотностей от высоты (правая панель), в диапазонах периодов 1 ч 42 мин — 3 ч 12 мин, для высот от 0 до 600 м с шагом 50 м над уровнем земной поверхности в Кисловодске — 1 и ВНС — 2.

Из рис. 3 видно, что выше 100 м спектральная плотность температуры воздуха для периодов, соответствующих длительности затмения, равной 2 ч 20 м, на ВНС убывает сильнее, чем в г. Кисловодске. Разная скорость убывания спек-

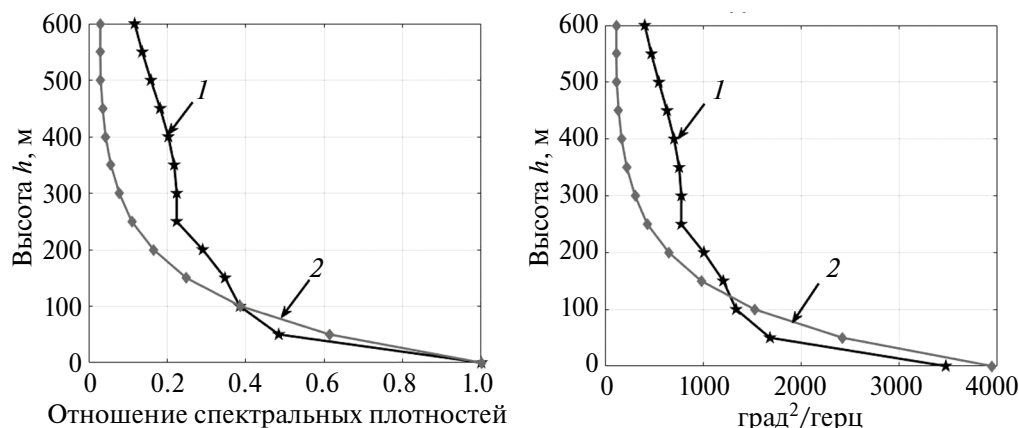


Рис. 3. Отношения $A(h)/A(0)$ спектральных плотностей температуры воздуха $A(h)$ к спектральным плотностям $A(0)$ на высоте $h = 0$ для диапазона периодов 1 ч 42 мин – 3 ч 12 мин – левая панель, и зависимости спектральных плотностей в данном диапазоне периодов от высоты – правая панель, для г. Кисловодск – 1 и ВНС – 2, на временном отрезке от 14 до 18 ч 29.03.2006 г.

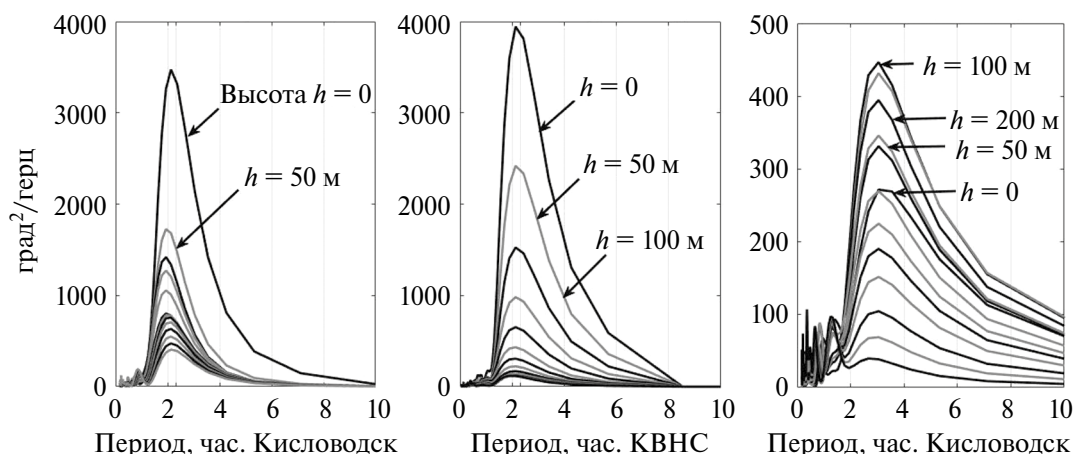


Рис. 4. Спектральная плотность колебаний температуры воздуха 29.03.2006 г. на временном отрезке от 14 до 18 ч, для высот от 0 до 600 м с шагом 50 м. Левая панель – Кисловодск, средняя панель – ВНС, правая панель – Кисловодск 28.03.2006 г.

тральной плотности колебаний температуры воздуха с высотой определяется разным влиянием турбулентного перемешивания воздушных масс в пограничных слоях г. Кисловодска и высокогорной станции ВНС. Так, спектральная плотность колебаний температуры воздуха на высоте 600 м на ВНС уменьшилась в 33.8 раз, а в городе Кисловодске – в 8.5 раз по сравнению со значениями на уровнях земной поверхности.

Спектральные плотности колебаний температуры воздуха на этом отрезке для Кисловодска и ВНС показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что во время солнечного затмения в Кисловодске и на ВНС ИФА

им. А.М. Обухова РАН в спектре колебаний температуры воздуха заметно преобладает гармоника с периодом, соответствующим длительности затмения, что обусловлено отсутствием облачности во время проведения измерений в день произошедшего полного солнечного затмения. Спектральная плотность температуры воздуха в Кисловодске для 28.03.2006, предшествующего дню затмения, на таком же временном отрезке от 14 до 18 ч, как и в день затмения 29.03.2006, значительно меньше, чем во время затмения для периодов, соответствующих длительности солнечного затмения. При этом в день затмения величины спектральных плотностей воздуха убывают с высотой, не нарушая порядка (большей высоте соответствует меньшая плотность). А для

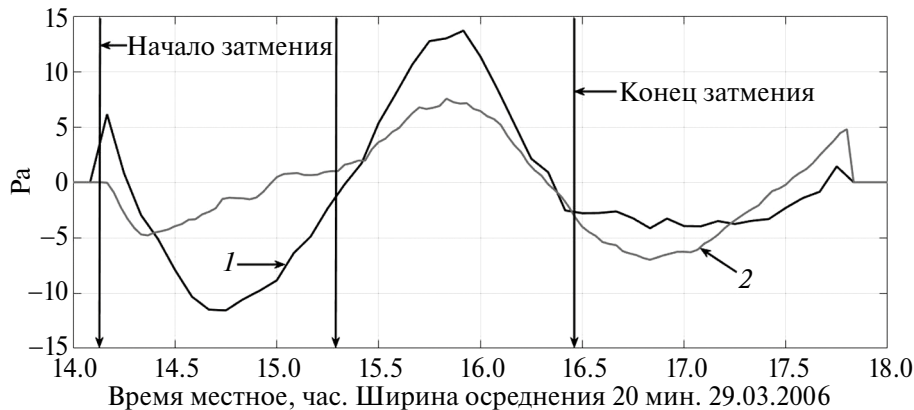


Рис. 5. Осредненные колебания атмосферного давления, за вычетом полиномов 2-й степени, восстановленные по профилям температуры воздуха в Кисловодске – 1 и на ВНС – 2. Ширина осреднения 20 мин.

28.03.2006 такой порядок нарушен, и большим высотам могут соответствовать большие величины спектральной плотности.

На рис. 5 показаны восстановленные по профилям температуры воздуха в пределах высот 0–600 м, колебания атмосферного давления, за вычетом полиномов 2-й степени, в Кисловодске-1 и на ВНС-2, с шириной осреднения 20 мин.

Восстановление пульсаций атмосферного давления на уровне земли по измеренным профилям температуры воздуха $T(z, t)$ производилось по алгоритму, изложенному ниже.

Разность атмосферного давления на уровне земли и высоте h равна весу столба воздуха $\int_0^h g \rho(z, t) dz$ высотой h , который при $h \ll H$, можно приближенно представить в виде:

$$p(0, t) - p(h, t) \approx p(0, t) \int_0^h dz \frac{g}{RT(z, t)}, \quad (1)$$

где $H(z, t) = RT/g$ – высота однородной атмосферы, $T(z, t)$ – абсолютная температура, $\rho(z, t)$ – плотность воздуха, R – газовая постоянная, отнесенная к молекулярной массе воздуха, g – ускорение свободного падения, t – время, z – высота.

При этом в (1) приземное давление представлялось в виде $p(0, t) = \bar{p}_0 + \Delta p(t)$, где $\bar{p}_0$ – среднее давление на поверхности земли за период измерений, а $\Delta p(t)$ – его малые флуктуации

$\Delta p(t)/\bar{p}_0 \ll 1$, что позволяет приближенно считать вклад $\bar{p}_0 \int_0^h \frac{g}{RT(z, t)} dz$ от временных изменений профилей температуры воздуха в атмосферном пограничном слое атмосферы и разность давлений (1).

Вследствие уменьшения плотности воздуха с высотой амплитуда восстановленных по профилям температуры пульсаций атмосферного давления на ВНС была меньше, чем в Кисловодске. Так, при перепаде температуры воздуха, равном 2.9°C на уровне земли, вызванном солнечным затмением, амплитуда пульсаций приземного атмосферного давления на ВНС, восстановленных по профилям температуры воздуха, составляет 6 Па, тогда как, в Кисловодске при перепаде температуры воздуха на уровне земли равном 3.8°C , амплитуда восстановленных пульсаций атмосферного давления составляет 12.5 Па (рис. 5).

При этом минимум температуры воздуха в Кисловодске, вызванный солнечным затмением, поднимается вверх со скоростью 0.17 м/с в координатах высота–время до высоты 100 м, а далее, ускоряясь, поднимается до высоты 600 м. В среднем скорость подъема минимума температуры воздуха от земной поверхности до высоты 600 м составляет 0.5 м/с.

На рис. 6 показаны колебания температуры воздуха на временном отрезке 14–18 ч 29.03.2006, после вычета трендов с помощью полиномов 2-й степени и фильтрации в пределах диапазона пе-

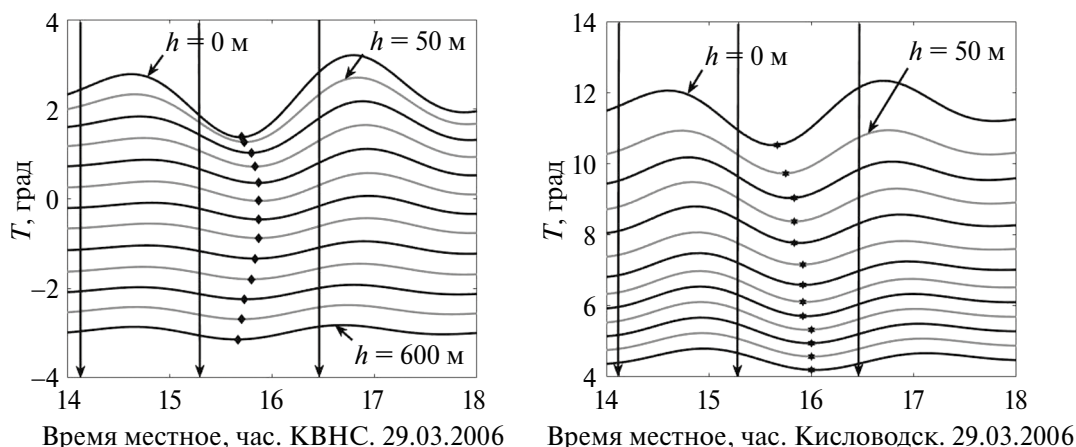


Рис. 6. Колебания температуры воздуха, отфильтрованные в диапазоне периодов 1 ч 25 мин – 4 ч 16 мин в зависимости от высоты, а также минимумы температуры воздуха, вызванные солнечным затмением (отмечены ромбами), записанные на ВНС (левая панель) и в Кисловодске (правая панель). Вертикальными линиями отмечены начало, полная фаза и конец солнечного затмения.

риодов 1 ч 26 мин – 4 ч 16 мин. Маркерами отмечены положения минимумов температуры воздуха, вызванных солнечным затмением, в зависимости от высоты и времени для профилей температуры, полученных на ВНС (левая панель) и в Кисловодске (правая панель), для высот 0–600, шаг 50 м.

На ВНС минимум температуры воздуха, вызванный затмением, поднимается со скоростью 0.4 м/с в координатах высота–время сначала до высоты 250 м, затем траектория подъема минимума по оси времени разворачивается в обратную сторону. Другими словами, минимум температуры воздуха оказывается одновременно, например, на высоте 50 м и высоте 550 м – рис. 6. Такая ситуация может быть обусловлена движением воздушных масс в горных условиях. Здесь необходимо учитывать то обстоятельство, что измерения профиля температуры воздуха производятся с определенным периодом: в случае ВНС период был равен 2 мин, в случае города Кисловодска – 5 мин, при этом профиломеры производят измерения в тех объемах воздуха, которые были перемещены движением воздушных масс с некоторых расстояний, определяемых скоростью ветра, за время паузы между измерениями.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитие результатов, полученных нами в предыдущей работе [Буш и др., 2022], проведено

сравнение данных профилей температуры воздуха в двух пунктах – Кисловодске и на ВНС. Было показано, что местные условия существенно влияют как на амплитуду пульсаций атмосферного давления, вызванных солнечным затмением, так и на их фазу, а также на характер изменения спектральной плотности температуры воздуха с высотой в диапазоне периодов соответствующих длительности солнечного затмения.

Предложена новая методика определения скорости восходящих потоков воздуха с использованием данных о высотной зависимости момента времени достижения минимума во временных вариациях температуры, вызванного солнечным затмением.

Показано, что изменение температуры земной поверхности во время солнечного затмения вызывает соответствующее изменение температуры воздуха, которое распространяется вверх с заметным уменьшением амплитуды (рис. 1–4). При этом возмущение спектральной плотности температуры воздуха, вызванное солнечным затмением, хорошо выделяется на временном отрезке 14–18 ч, 29.03.2006, по сравнению с фоновыми временными участками (рис. 2).

Значения спектральной плотности в диапазоне периодов от 1.7 до 3.2 ч для Кисловодска и для Высокогорной научной станции (ВНС) уменьшаются с высотой сходным образом. Зависимо-

сти убывания спектральной плотности температуры воздуха от высоты на временном отрезке от 14 до 18 ч, во время затмения, для Кисловодска и ВНС показаны на рис. 3.

Установлено, что выше 100 м спектральная плотность температуры воздуха для периодов, соответствующих длительности затмения, равной 2 ч 20 м, на ВНС убывает сильнее, чем в городе Кисловодске.

Разная скорость убывания спектральной плотности колебаний температуры воздуха с высотой определяется разным влиянием турбулентного перемешивания воздушных масс в пограничных слоях г. Кисловодска и высокогорной станции ВНС. Так, спектральная плотность колебаний температуры воздуха на высоте 600 м на ВНС уменьшилась в 33.8 раз, а в городе Кисловодске — в 8.5 раз, по сравнению со значениями на уровнях земной поверхности.

Вследствие уменьшения плотности воздуха с высотой амплитуда восстановленных по профилям температуры пульсаций атмосферного давления на ВНС была меньше, чем в Кисловодске. Так, при перепаде температуры воздуха, равном 2.9°C на уровне земли, вызванном солнечным затмением, амплитуда пульсаций приземного атмосферного давления на ВНС, восстановленных по профилям температуры воздуха, составляет 6 Па, тогда как в Кисловодске при перепаде температуры воздуха на уровне земли, равном 3.8°C , амплитуда восстановленных пульсаций атмосферного давления составляет 12.5 Па (рис. 5).

Измеренная микробарографом в Кисловодске амплитуда пульсаций атмосферного давления, вызванных солнечным затмением, составляла 9.5 Па, что согласуется с амплитудой восстановленных по профилям температуры пульсаций давления, принимая во внимание, что в измеренных микробарографом пульсациях давления присутствуют пульсации, обусловленные слоями атмосферы, которые расположены выше 600 м — верхнего предела измерений по высоте при помощи профилемера.

При этом минимум температуры воздуха в Кисловодске, вызванный солнечным затмением,

поднимается вверх до высоты 100 м со скоростью 0.17 м/с в координатах высота—время, а далее, ускоряясь, поднимается до высоты 600 м. В среднем скорость подъема минимума температуры воздуха от земной поверхности до высоты 600 м составляет 0.5 м/с.

Таким образом, наблюдая при помощи профилемера перемещение температурного возмущения в координатах высота—время, можно определять скорость восходящих воздушных потоков в зависимости от высоты (рис. 6).

В отличие от пункта наблюдений в г. Кисловодске, на ВНС минимум температуры воздуха, вызванный затмением, поднимается до высоты 250 м со скоростью 0.4 м/с в координатах высота—время, затем траектория минимума по оси времени разворачивается в обратную сторону. Другими словами, минимум температуры воздуха оказывается одновременно, например, на высоте 50 м и высоте 550 м — рис. 6. Такая ситуация может быть обусловлена движением воздушных масс в горных условиях. Здесь необходимо учитывать то обстоятельство, что измерения профиля температуры воздуха производятся с разными интервалами времени: в случае ВНС этот интервал был равен 2 мин, в случае города Кисловодска — 5 мин.

Таким образом, измерение температуры воздуха в определенный момент времени производится в тех объемах воздуха, которые переместились в точку наблюдения из мест, в которых указанные объемы находились по оси времени раньше на время паузы между измерениями за счет горизонтального ветра и восходящих потоков воздушных масс.

Скорость же ветра зависит от высоты, а скорость восходящих потоков воздуха зависит от рельефа окружающей местности и неравномерного прогрева подстилающей поверхности. Это обстоятельство и определяет траекторию переноса температурного возмущения в координатах: высота—время. В рассматриваемом случае — траекторию движения минимума температуры воздуха, вызванного солнечным затмением (рис. 6).

В свою очередь, траектория движения минимума температуры воздуха в координатах вы-

сота—время определяет задержку регистрации максимума пульсаций атмосферного давления относительно полной фазы солнечного затмения, а также задержку регистрации минимума давления относительно начала затмения. Разные траектории движения минимумов температуры, зависящие от местных условий, дают разные задержки, так как пульсации давления на уровне земли определяются суммированием вкладов тонких слоев воздуха в результирующие пульсации давления.

Отсюда следует, что развитие процессов, происходящих во время солнечного затмения в АПС, определяется скоростью турбулентного перемешивания воздушных масс, а также рельефом местности, неравномерным прогревом подстилающей поверхности и местными воздушными потоками, как горизонтальными, так и вертикальными, — в местах наблюдения.

Работа была выполнена в соответствии с Госзаданием ИФА им. А.М. Обухова РАН: разделы 1–2 — FMWR-2022-0017; раздел 3 — Тема 17.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. 49–650.
- Буш Г.А., Еланский Н.Ф., Кадыгров Е.Н., Куличков С.Н., Чунгузов И.П., Прокошева Н.С. Влияние солнечного затмения 29 марта 2006 года на флуктуации атмосферного давления и приземные профили температуры // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 1–8.
- Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя: метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 697–704.
- 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.
- Goodwin G.L., Hobson G.J. Atmospheric gravity waves generated during a solar eclipse // Nature. 1978. V. 275. P. 109–111.
- Jones B.W., Miseldine G.J., Lambourne R.J.A. 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.
- Eaton F.D., Hines, J.R., Hatch W.H. et al. Solar eclipse effects observed in the planetary boundary layer over a desert // Boundary-Layer Meteorology 1997. V. 83. P. 331–346.
- 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.
- Marty J.F., Daladier D. Linear spectral numerical model for internal gravity wave propagation // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67. P. 1632–1642.
- 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.

Dynamics of Air Temperature Changes in the Atmospheric Boundary Layer during the Solar Eclipse of March 29, 2006

G. A. Bush^{1, *}, N. F. Elansky¹, E. N. Kadyrov², S. N. Kulichkov^{1, 3, **},
I. P. Chunchuzov¹, and N. S. Prokosheva⁴

¹ *Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences,
Pyzhevsky lane, 3, Moscow, 119017 Russia*

² *“Central Aerological Observatory” of Roshydromet, Pervomayskaya str., 3, Dolgoprudny, Moscow region, 141700 Russia*

³ *Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, building 1, building 2, GSP-1, Moscow, 119081 Russia*

⁴ *Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
Gorky str., 87, Vladimir, 600000 Russia*

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

***e-mail: snk@ifaran.ru*

The data of measurements of air temperature profiles in the atmospheric boundary layer (ABL) during the total solar eclipse on March 29, 2006 in Kislovodsk and at the Kislovodsk High-Mountain Scientific Station (KVNS) on the central shadow line are presented. The solar eclipse lasted from 14:08 to 16:27 local time, the total phase of the eclipse began at 15:15 and lasted 2:32. In development of the results obtained by us in our previous work, we compared the data on air temperature profiles at two points, Kislovodsk and KVNS. The influence of local conditions has been studied. It was shown that local conditions significantly affect both the amplitude of atmospheric pressure pulsations caused by a solar eclipse and their phase, as well as the nature of the change in the spectral density of air temperature with height in the range of periods corresponding to the duration of the solar eclipse. Based on 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, up to which the temperature profiles were measured equal to 600 m, were reconstructed, caused by a solar eclipse, in coordinates: height – time has different trajectories in the case of Kislovodsk and KVNS. The difference in the trajectories of air temperature minima in Kislovodsk and at the KVNS determines both different delays in pressure minima relative to the beginning of the eclipse and time delays between surface pressure fluctuations at observation points as a whole. Also, a new method is proposed for determining the speed of ascending air currents using data on the altitude dependence of the time of reaching a minimum in temporal temperature variations caused by a solar eclipse. The changes in the spectral density of air are compared with height, the amplitude of the reconstructed atmospheric pressure pulsations in Kislovodsk and at the KVNS, and the speed of ascending air currents.

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