

С. И. КРЕЧМЕР

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В АТМОСФЕРЕ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 11 III 1952)

Турбулентные пульсации температуры воздуха вызывают вертикальный перенос тепла в атмосфере, имеющий существенное значение для многих метеорологических явлений. Эти пульсации представляют интерес также и для ряда вопросов атмосферной оптики и теории распространения радиоволн^(1,2). В связи с этим за последние годы неоднократно поднимался вопрос о необходимости детального экспериментального исследования пульсаций температуры в атмосфере^(3,4). Эта задача, однако, до последнего времени оставалась неразрешенной из-за отсутствия аппаратуры, пригодной для таких исследований*.

Примерная оценка порядка величины микропульсаций температуры, произведенная А. М. Обуховым⁽³⁾ на основании представлений теории подобия и косвенных данных, показала, что для получения достаточно надежных данных о таких пульсациях нужна аппаратура, имеющая чувствительность порядка $0,01^\circ$ на 1 мм шкалы и постоянную времени порядка 0,01 сек. При этом размеры датчиков не должны превышать 1—2 см (чтобы избежать значительного пространственного осреднения, искажающего картину) и должна быть предусмотрена возможность синхронной регистрации пульсаций температуры и вертикальной компоненты скорости ветра (для определения турбулентного потока тепла).

В 1948—1949 гг. в лаборатории атмосферной турбулентности Геофизического института АН СССР автором была разработана аппаратура, удовлетворяющая всем этим условиям. В основу метода измерений был положен метод термометра сопротивлений. Датчиками служили тонкие платиновые нити (диаметра 20 μ), изменение сопротивления которых под влиянием пульсаций температуры измерялось при помощи симметричного дифференциального моста Уитстона примерно так же, как это делалось в работе М. И. Гольцмана⁽⁵⁾. Для того чтобы избежать влияния скорости ветра на температуру, а следовательно, и на сопротивление датчиков (термоанемометрический эффект), сила тока подбиралась так, чтобы перегрев нити датчика относительно окружающего

* Имеющиеся до настоящего времени данные о пульсации температуры^(5,6) были получены с помощью аппаратуры, недостаточно чувствительной (или слишком инерционной) для получения количественных данных о микроструктуре этих пульсаций. Величина турбулентного потока тепла до самого последнего времени оценивалась лишь по косвенным данным. Уже после окончания оформления настоящей работы автор познакомился с работой⁽⁷⁾, содержащей попытку непосредственного определения вертикального потока тепла по наблюдениям пульсаций T и W . Инерция аппаратуры, описанной в этой работе, значительно превышает инерцию приборов, использованных нами.

воздуха не превышал $0,01^\circ$; в таком случае влияние скорости ветра, естественно, не могло исказить результаты измерений более, чем на эту величину. Для того чтобы удовлетворить этому требованию, пришлось ограничиться силой тока порядка 1 ма, что потребовало применения усилителя для регистрации пульсаций. По предложению А. М. Обухова, через мост пропускался переменный ток звуковой частоты, и усиление производилось на этой „несущей“ звуковой частоте, „промодулированной“ пульсациями сопротивлений датчиков. Установка была сконструирована таким образом, что имела возможность регистрировать по желанию или пульсации температуры в одной точке или мгновенную разность температур в двух близких точках.

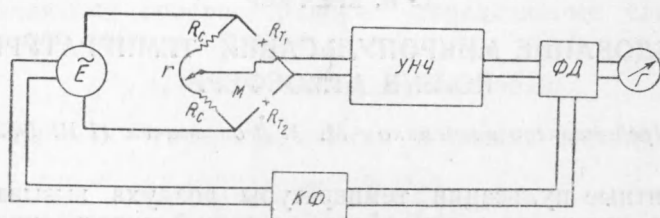


Рис. 1. Блок-схема микротермометра

Блок-схема установки изображена на рис. 1. Ток от генератора E питает мост M . Два плеча R_c представляют собой постоянные манганиновые сопротивления. Другие два плеча R_t — датчики температуры или один датчик температуры и эквивалентное (для средней температуры) постоянное сопротивление. Реохорд r служит для точной балансировки моста при равенстве температур в области обоих насадков и в то же время, в силу линейной зависимости сопротивления датчиков от температуры, автоматически уравнивает их чувствительности. При небольших отклонениях сопротивлений датчиков от балансного значения, вызванных пульсациями температуры в области нити, амплитуда тока в диагонали моста будет пропорциональна разности температур датчиков. Фаза тока в диагонали моста будет меняться на 180° , в зависимости от знака разности температур. Этот ток усиливается усилителем низкой частоты $УНЧ$ и поступает в фазовый детектор $ФД$, управляемый током звуковой частоты (через корректор фазы $КФ$) от того же генератора E , который питает мост. Как известно ⁽⁸⁾, особенностью фазового детектора является то, что при отсутствии напряжения на входе усилителя ток на выходе детектора равен нулю, а при наличии на входе усилителя напряжения той же частоты и в той же фазе, что и управляющее напряжение, выпрямленный ток будет пропорционален амплитуде поступающего сигнала (при условии линейности всех частей схемы), а направление тока будет зависеть от фазы входящего сигнала, т. е. от знака разности температур датчиков.

В этой схеме достигается стабильность усиления и устойчивость нуля. В пределах измеряемого нами диапазона разности температур удалось достигнуть практически линейной шкалы прибора. Специальным экспериментом, по методу, разработанному автором ⁽⁹⁾, было найдено, что время установления всей системы вместе с регистрирующей частью составляло $15 \cdot 10^{-3}$ сек.

Тарировка микротермометра состояла из двух этапов: 1) определение температурного коэффициента насадка, 2) градуировка электрической части схемы. Градуировка производилась непосредственным измерением отклонений записи на осциллограмме при небольших отклонениях сопротивлений измеряемых плеч от балансного значения. С этой целью вместо датчиков в плечи моста включались эквивалентные ман-

ганиновые сопротивления (24 Ω). К каждому из них по очереди подключались точно промеренные сопротивления порядка нескольких десятков тысяч ом. Таким путем исключались ошибки, вызываемые изменением контактных сопротивлений, и имелась возможность с бо-

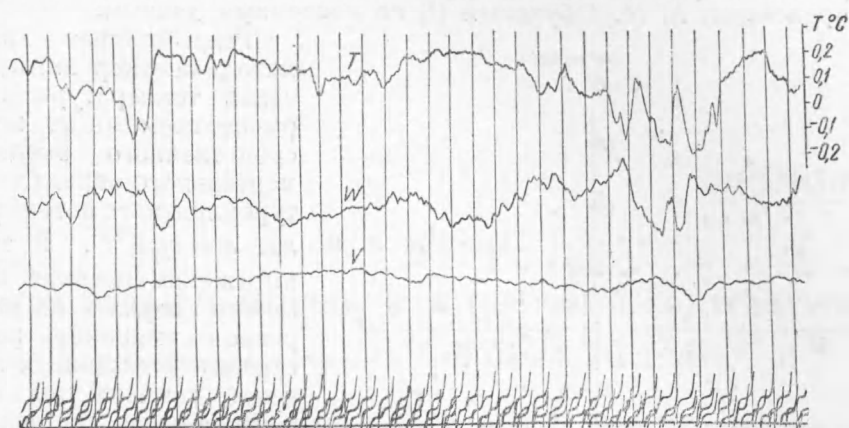


Рис. 2. Образец синхронной записи пульсаций температуры (T), вертикальной (W) и горизонтальной (V) составляющих скорости ветра

шой точностью определить изменение сопротивления на несколько тысячных ома. Градуировка электрической схемы микротермометра производилась нами при каждой серии измерений. Средняя чувствительность установки составляла $0,014^\circ$ на 1 мм отклонения записи, и уровень собственных шумов установки в эквивалентном выражении можно было оценить в $0,005^\circ$.

В полевых условиях нами производились регистрации пульсаций температуры воздуха в одной точке и пульсации разности температур в двух точках. Измерения, как правило, производились на высоте 1,5 м от земли и в некоторых случаях на высотах 3, 7 и 14 м от земли. Образец записи приведен на рис. 2. На этой осциллограмме имеются также синхронные записи горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра*.

Регистрации пульсаций разности температур воздуха в двух точках производились на базах 0,5, 2, 4, 8, 16 и 32 см. На основе этих измерений была построена кривая, определяющая зависимость среднего абсолютного значения разности температур $|\Delta T|$, от расстояния l между точками измерений — эмпирическая структурная функция температурного поля⁽¹⁰⁾. На рис. 3 изображена одна из таких структурных функций. Сплошная линия представляет кривую $|\Delta T| = Bl^{2/3}$, отвечающую теоретическому закону^{2/3}, полученному в работах А. М. Обухова⁽³⁾ и А. М. Яглома⁽¹¹⁾. Точками отмечены эмпирически

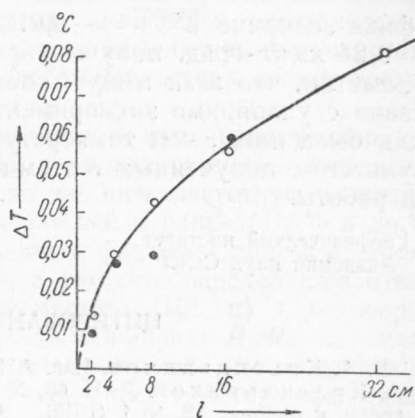


Рис. 3. Структурная функция температурного поля. $\Delta T = Bl^{2/3}$;
 $B = 3 \cdot 10^{-20} \cdot \text{см}^{-2/3}$

* Метод измерения пульсаций вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра описан в статье А. М. Обухова⁽¹⁰⁾.

найденные значения $|\Delta T|$ для разных l . Как видно, получается удовлетворительное согласие теории с опытом. Структурная постоянная в данном случае составляет $B = 3 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ \cdot \text{см}^{-1/2}$. Порядок величины этого эмпирически определенного коэффициента B совпадает с тем, который был предсказан А. М. Обузовым ⁽³⁾ по косвенным данным.

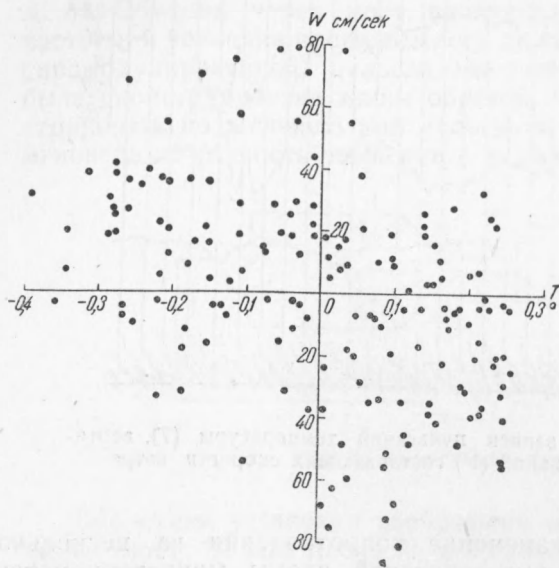


Рис. 4. Корреляционный график W' и T'

графика значение $\overline{W'T'} = -0,0167$. Принимая $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ и $c_p = 0,24 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$, получаем $q = -3,1 \cdot 10^{-2} \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$.

Заметим, что знак минус соответствует переносу тепла вниз, что связано с условиями эксперимента в осеннее время, когда температура земли была ниже, чем температура воздуха. Подробное обсуждение результатов, полученных в этом направлении, выходит за рамки настоящей работы.

Геофизический институт
Академии наук СССР

Поступило
25 I 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. А. Красильников, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 13, № 1 (1949).
- ² В. А. Красильников, ДАН, 65, № 3 (1949). ³ А. М. Обузов, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 13, № 1 (1949).
- ⁴ Р. А. Sheppard, Weather, 6, No. 2 (1951).
- ⁵ М. И. Гольцман и А. А. Знаменский, Метеорология и гидрология, № 1 (1936).
- ⁶ E. S. Richardson, Proc. Roy. Soc., 203, № 1075 (1950).
- ⁷ W. C. Swinbank, Journ. Meteorology, 8, № 3 (1951).
- ⁸ М. Е. Темников и Р. Р. Харченко, Электрические измерения неэлектрических величин, 1948.
- ⁹ С. И. Кречмер, ДАН, 61, № 6 (1948).
- ¹⁰ А. М. Обузов, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., № 3 (1951).
- ¹¹ А. М. Яглом, ДАН, 69, № 6 (1949).