

В. В. ШУЛЕЙКИН, член-корреспондент Академии Наук СССР

**КОЛЕБАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В АТМОСФЕРЕ И НЕБЫВА-
ЛЫЕ МОРОЗЫ 1940 ГОДА**

Несколько лет тому назад нам удалось разложить ⁽¹⁾ на две составляющие тот горизонтальный тепловой поток, который пронизывает атмосферу и уравнивает баланс лучистой энергии в каждом пункте земного шара.

Одной из этих составляющих — муссонного происхождения — был посвящен целый ряд наших статей, последовавших за цитированной. Остановимся теперь на исследовании другой из составляющих: на исследовании междушпиритного теплового потока в атмосфере.

Своего рода осредненным поток вдоль меридиана был уже давно исследован Ангстремом ⁽²⁾, отрешившимся от учета различия в поведении атмосферы над океаном и над материком и ограничившимся лишь выводом закона распределения температур дважды осредненных: средних за год и средних для данной широты. Сейчас есть возможность перейти от такой формально осредненной картины к картине, действительно существующей в природе в том или ином районе земного шара и в тот или иной месяц.

В самом деле, ведь достаточно приближенное суждение о действительном режиме междушпиритного теплового потока мы можем получить, проследив за температурными условиями в районах, заведомо достаточно изолированных от муссонных потоков; деятельный слой атмосферы в таких районах пронизывается в горизонтальном направлении только междушпиритным потоком. Проследив же за температурными условиями в таких типично-материковых районах — весьма немногочисленных, можно будет составить приближенное представление о междушпиритных тепловых потоках в любых иных районах, прибегнув к помощи интерполяционных приемов.

Итак, попытаемся определить количество тепла, которое отнимается единичной колонкой* атмосферы у междушпиритного потока в некоторой произвольной точке материка. При отсутствии муссонной составляющей именно это тепло уравнивает баланс лучистой энергии. Для последнего же применительно к любому ν -ому месяцу года можно построить, по ангстремовскому типу, следующее эмпирическое соотношение:

$$-\omega_{\nu} = m_{\nu} + n_{\nu} \cos^2 \varphi. \quad (1)$$

Здесь ω_{ν} выражается в калориях на 1 см^2 горизонтальной поверхности в месяц; m_{ν} и n_{ν} — коэффициенты, подлежащие определению. При непрерывном изменении широты φ формула (1) будет давать, очевидно, сперва положительный, а затем отрицательный баланс лучистой энергии (падающая энергия за вычетом излучаемой обратно в межпланетное пространство).

* Т. е. колонкой, опирающейся на 1 см^2 горизонтальной поверхности и простирающейся от уровня моря до верхней границы деятельного слоя воздуха.

По аналогии со случаем, рассмотренным в работе Ангстрема ⁽²⁾, можно с достаточной уверенностью ожидать, что коэффициент m_v в свою очередь связан теоретическим соотношением

$$m_v = \frac{A'H'}{R^2} a_v \quad (2)$$

с некоторой константой a_v в уравнении ангстремовского типа:

$$\vartheta_v = K - \frac{a_v}{4} \sin^2 \varphi. \quad (3)$$

Здесь $A'H'$ — некоторый условный коэффициент теплопроводности деятельного слоя атмосферы [см. ^(1,2)], R — радиус Земли, K — константа интеграции, числовое значение которой легко определить по результатам непосредственных измерений в природе. Именно, в тропической зоне, где $\sin^2 \varphi$ обращается в нуль, температура воздуха на поверхности земли, вдали от моря, должна равняться K (круглый год). Вполне подходящим для исследования районом можно считать здесь экваториальную часть центральной Африки, где круглый год температура воздуха равняется 28° .

Подобное постоянство температуры указывает на то, что постоянным является и месячный бюджет лучистой энергии для экваториальной зоны, который на основании работы Ангстрема можно считать равным

$$(w_1)_0 = (w_2)_0 = \dots = w_0 = \frac{40}{12} 10^8 = 3,3 \cdot 10^8 \text{ кал/см}^2 \text{ мес.}$$

Воспользовавшись этим обстоятельством, запишем на основании (1):

$$n_v = w_0 - m_v. \quad (4)$$

В свою очередь, на основании (2) и (3)

$$m_v = 4 \frac{A'H'}{R^2 \sin^2 \varphi} (K - \vartheta_v). \quad (5)$$

Как видим, оба коэффициента эмпирической формулы (4) могут быть определены для каждого месяца, если будет использовано значение температуры ϑ_v (средней для соответствующего месяца), наблюдаемое на широте φ в каком-то типично-материковом районе.

Совершенно очевидно, что наиболее типичным материковым районом на всем земном шаре является район г. Верхоянска. Воспользовавшись значениями ϑ_v для этого пункта, взятыми из климатологического атласа, я вычислил значения коэффициентов m_v и n_v в формуле (4):

| v | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|---------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| $-m_v \cdot 10^8 =$ | 8,5 | 8,0 | 6,65 | 4,45 | 3,1 | 1,78 | 1,22 | 1,33 | 2,69 | 4,57 | 7,05 | 8,38 |
| $n_v \cdot 10^8 =$ | 12,0 | 12,0 | 10,7 | 8,5 | 7,2 | 5,8 | 5,3 | 5,4 | 6,7 | 8,6 | 11,1 | 12,4 |

Подставив соответствующие значения m_v и n_v из этой таблицы в формулу ангстремовского типа (4), можно будет определить для любой широты и для любого месяца приближенное значение w_v — количество тепла, которое отдается здесь единичной колонке междуширотным тепловым потоком.

Посмотрим, насколько близка к действительности та картина, которую удастся нарисовать таким способом. Для примера вычислим количества тепла, которые выделяются в различные месяцы в единичной колонке атмосферы в северо-западной части нашей страны. Здесь окажется возможным сравнить теоретически-вычисленные величины с результатами непосредственных определений, проделанных Тролле на Слудской метеорологической обсерватории. Этот автор вычислил количество тепла, доставляемого прямой и диффузной солнечной радиацией, и количество тепла, излучае-

мого в межпланетное пространство. Учтя также тепловой режим подстилающей поверхности, Тролле определил тепловой дефицит, который в атмосфере покрывается за счет горизонтальных тепловых потоков.

С нашей нынешней точки зрения этот дефицит покрывается именно за счет как муссонного, так и междуширотного тепловых потоков, в чем легко будет убедиться, взглянув на фиг. 1. Здесь тонкая кривая выражает годичный ход количества тепла q_v , отнимаемого единичной колонкой в течение месяца у муссонного теплового потока [эта кривая перенесена сюда с фигуры 18 (1)]. К каждой ординате прибавим отрезок, соответствующий количеству тепла w_v , отнятого за тот же самый месяц у междуширотного

потока, вычислив это количество по формуле (1). В результате получится суммарная кривая « $q_v + w_v$ », нанесенная жирной линией на фиг. 1.

На тот же чертеж нанесены точки, соответствующие результатам непосредственных измерений Тролле. Как видим, они хорошо ложатся на нашу теоретическую кривую: отклонения не превышают тех возможных различий, которые существуют между режимом каждого отдельного года и режимом, средним для многолетнего периода (послужившим для определения приближенного условного коэффициента теплопроводности $A'H'$). Итак, несмотря на несомненное непостоянство самого коэффициента $A'H'$, несмотря на естественные недостатки всякого косвенного метода,—количественное изучение тепловых потоков, произведенное нами, приводит к результатам, достаточно близким к природной картине явлений. Тем самым еще раз подтверждается законность метода, принятого в наших работах, начиная с цитированной (1).

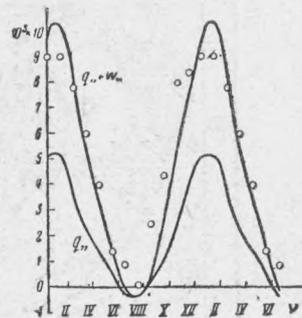
Чрезвычайно важно отметить, что количество тепла, передаваемого единичной колонке в атмосфере междуширотным потоком, оказывается того же порядка, как и количество тепла, передаваемого потоком муссонным. Но в таком случае при всяком возмущении режима междуширотного потока следует ожидать в нем зарождения термобарических волн примерно того же характера, какой был нами исследован в одной из недавних работ (3), применительно к муссонному полю.

В упомянутом случае муссонного поля оказалось возможным приближенно описать этот интересный колебательный процесс, исходя из некоторой осредненной разности температур θ между теплыми массами воздуха, несущимися с океана (в верхнем ярусе муссонного слоя), и холодными массами воздуха, приносящимися в обратном направлении. Общее уравнение волн приобрело там форму:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = m \frac{\Pi \theta}{\delta} \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right]^*,$$

где θ —отклонение температуры от стационарной. В цитированной работе (3) было показано, что подобные волны в системе Атлантика—Европа могут проявляться как волны стоячие, давая явно выраженные пучности (над восточной Европой и над районом Исландии) и узлы (над некоторыми неоднородностями в подстилающей поверхности).

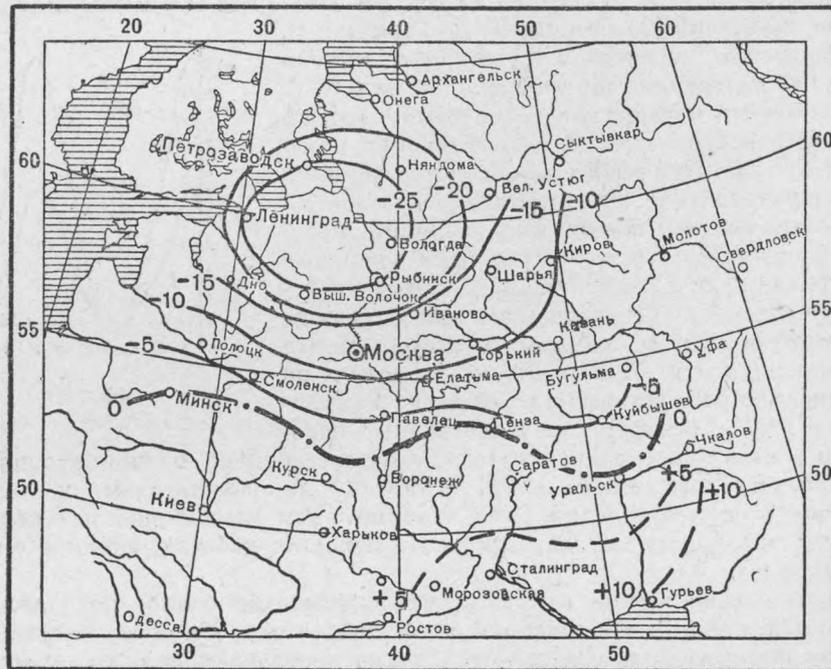
К сожалению, междуширотные тепловые потоки пока еще не поддаются подобному же приближенному анализу ввиду большей сложности самой



Фиг. 1.

* Здесь Π —коэффициент, связывающий градиенты давления и температуры в основной формуле теории муссонов, δ —плотность воздуха, m —безразмерный коэффициент.

гидродинамической картины междуширотной циркуляции. Однако уже сейчас можно доказать совершенно несомненное существование аналогичных стоячих термобарических волн в поле междуширотных потоков. Самым ярким их проявлением, несомненно, должны считаться небывалые морозы 1940 г., охватившие значительный район в северо-западной и центральной Европейской части Союза ССР (в январе). Чтобы убедиться в этом, построим для трех наиболее интересных дней января 1940 г. (15, 16 и 17) карты изоплет, показывающие, как отличалась в эти дни температура воздуха от климатологических средних, которые присущи тому или иному пункту в январе.

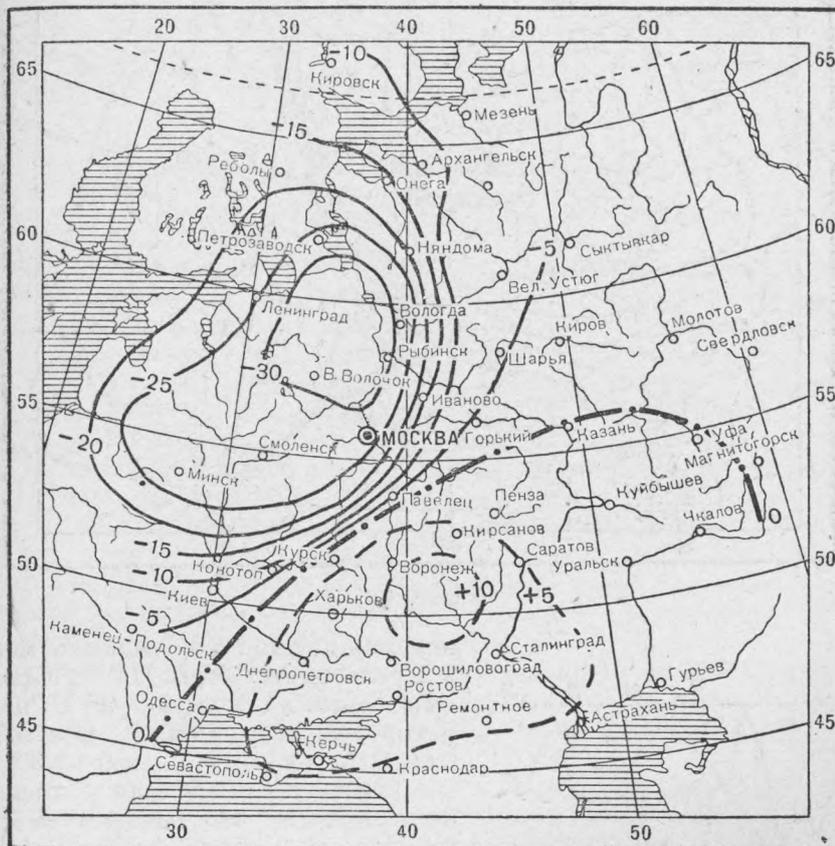


Фиг. 2.

Такие карты воспроизведены на фиг. 2, 3 и 4. Изоплеты, вычерченные сплошными линиями, проходят через точки с отрицательными отклонениями от нормы. Изоплеты же, нанесенные пунктиром, проходят через точки с положительными отклонениями. Как видим, одновременно с сильным похолоданием в одних районах проявлялось почти столь же резко выраженное потепление в других районах. Линия раздела между этими контрастирующими районами нанесена кривой, состоящей из черточек и точек, и отмечена цифрой «0». Она чрезвычайно близко напоминает узловую линию теоретической схемы, вычерченной в цитированной работе (3). Так же очевидно сходство между всеми изоплетами фиг. 2, 3 и 4, с одной стороны, и изоплетами упомянутой теоретической схемы, — с другой. И сходство здесь не внешнее, не случайное: несомненно, в основе явления, описываемого изоплетами фиг. 2—4, лежат те же тепловые процессы, которые привели в теории к соответствующему интегралу в бесселевых функциях (3). Фиг. 2—4 явно выражают тенденцию всей системы изоплет к непрерывному вращению против стрелки часов, что является совершенно естественным для колебательных процессов с очень большим периодом, протекающих на вращающемся земном шаре*.

* Этому процессу поворота системы будет посвящено особое исследование.

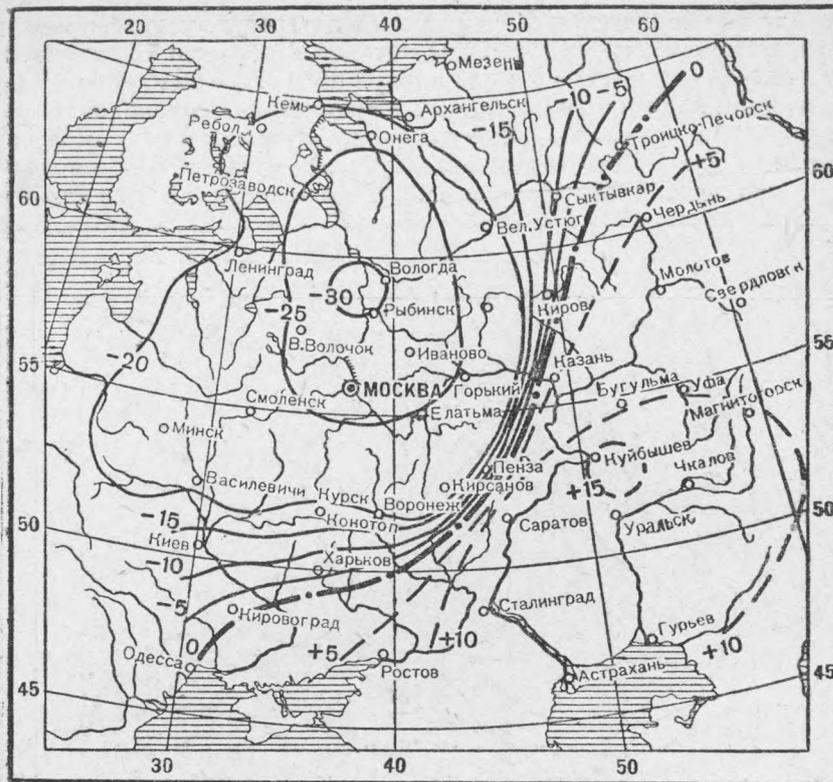
в наличии термобарических стоячих волн в интересующем нас промежутке времени, взглянем еще на фиг. 5, на которой изображен ход температуры воздуха (на уровне моря) с 1 по 31 января 1940 г. Здесь кривая 1 соответствует району, в котором наблюдалось самое сильное похолодание (по картам фиг. 2—4), а кривая 2—району, в котором наблюдалось самое сильное потепление в те же дни. Как видно на фиг. 3, прямая, соединяющая эти пункты, проходит примерно с северо-северо-запада на юго-юго-восток.



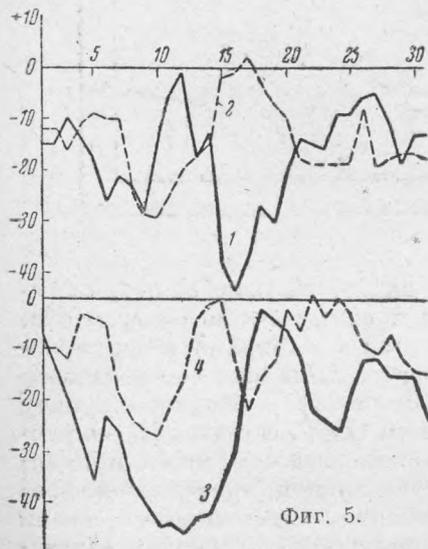
Фиг. 3.

На диаграмме фиг. 5 совершенно отчетливо видно, что колебания температуры воздуха в упомянутых двух пунктах происходили со сдвигом фаз, равным половине периода, — в полном согласии с теорией стоячих термобарических волн. Столь же убедительные результаты дает сопоставление кривой 3 с кривой 4 на той же фиг. 5. Из них одна (3) соответствует пункту в северо-восточном районе Европейской части СССР, а другая (4) — в районе юго-западном. Оба пункта выбраны с таким расчетом, чтобы прямая, проходящая через них, была перпендикулярна прямой, проведенной через первые два пункта. Как легко видеть, колебания, описываемые кривыми 3 и 4, как правило, находятся в противоположных фазах. Легко также заметить, что, вообще говоря, одна и та же фаза на всех четырех кривых наступает в последовательности: 1—4—2—3—1... со сдвигом в четверть периода между каждыми соседними фазами, т. е. снова в полном согласии с теорией «сейш» на вращающейся системе.

Итак, диаграммы фиг. 2—5 описывают настоящие термобарические стоячие волны («сейши») на территории, окаймленной естественными гра-



Фиг. 4:



Фиг. 5.

ницами: нашими внутренними морями и Уральским хребтом. Простой расчет, основанный на формуле (19) из первой цитированной работы (1), показывает, что похолодание 16 января на 30° против нормы могло наступить лишь при недополучении 165 калорий за сутки в единичной колонке воздуха, т. е. примерно половины всего теплового бюджета, осредненный ход которого изображен суммарной кривой на фиг. 1 (жирная кривая, отнесенная к месяцу). По всей вероятности это резкое уменьшение теплового бюджета вызвано не только ослаблением междуширотного теплового потока, но и одновременным ослаблением муссонного теплового потока с Атлантики. Повидимому, в исследуемый период времени обе колебательные системы попали в резонанс, что и привело к необычайно резкому обострению картины термобарических сейш.

Институт теоретической геофизики
Академии Наук СССР

Поступило
29 V 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. В. Шулейкин, Изв. ОМЭН, стр. 997 (1935). ² В. В. Шулейкин, ДАН, XXII, № 7 (1939).