

Н. С. Сидоренков, А. А. Исаев, И. А. Орлов, Б. Г. Шерстюков

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Введение

Измерения атмосферного давления производятся с шагом 3 ч. Как правило, ряды срочных наблюдений не используются, а вычисляются средние арифметические значения и среднеквадратические отклонения (СКО). Периодами осреднения обычно являются сутки, пентады, декады, месяцы и годы. Такая статистическая обработка вполне оправдана для обеспечения большого круга потребителей, которые решают всевозможные прикладные задачи. Однако для научных целей наибольший интерес представляют именно ряды срочных наблюдений.

Цель нашей статьи — использовать накопленные 40-летние ряды наблюдений для изучения тонкой структуры колебаний атмосферного давления во времени. Эти исследования проводились в первой половине XX века, когда разрабатывалась теория атмосферных приливов. Обзор их можно найти в работах [1, 5, 6]. Однако тогда не было однородных рядов наблюдений такой длительности, как сейчас.

Помимо этого, многолетние ряды наблюдений позволяют уточнить детерминированные составляющие изменений атмосферного давления, к которым относятся: его линейный тренд, годовой и суточный ход. Эти компоненты описывают значительную долю дисперсии общей изменчивости давления на станции. Знание их требуется при составлении сверхдолгосрочных прогнозов изменений атмосферного давления с суточным разрешением по методу Н. С. Сидоренкова [4].

Исходные данные наблюдений

В качестве исходных возьмем временные ряды наблюдений атмосферного давления метеорологических станций МГУ и Диксон. Метеорологическая станция или, точнее, обсерватория кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова расположена в Москве на северной окраине Воробьевых гор, на территории Ботанического сада МГУ. Ее координаты $55^{\circ} 42' \text{ с. ш.}$, $37^{\circ} 31' \text{ в. д.}$ Высота станции над уровнем моря 192,9 м.

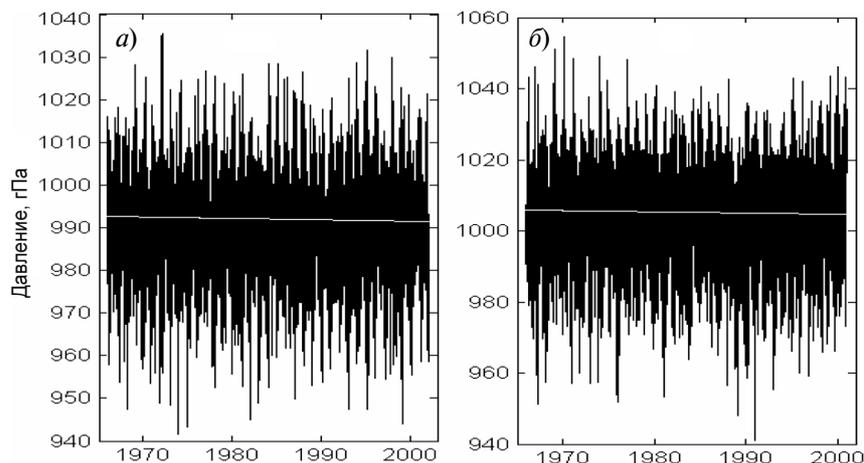


Рис.1. Вариации атмосферного давления на станциях МГУ (а) и Диксон (б).

С 1 января 1966 г. на станции МГУ регулярные наблюдения за метео-элементами, в том числе и за атмосферным давлением, производятся 8 раз в сутки через 3 ч, начиная с 0 ч московского зимнего времени или с 21 ч ВСВ. До этого наблюдения здесь были 4-разовыми. Далее использован ряд измерений атмосферного давления на уровне станции МГУ с 1 января 1966 г. по 31 декабря 2001 г. Основной прибор для измерения давления — барометр чашечный ртутный типа СР-А. В соответствии с международной системой единиц СИ давление воздуха измеряется в гектопаскалях

Метеостанция Диксон расположена на о. Диксон за полярным кругом. Ее координаты $73^{\circ} 32'$ с. ш., $80^{\circ} 17'$ в. д. Высота станции над уровнем моря 47 м. Далее использован ряд измерений атмосферного давления на уровне станции Диксон с 1 января 1966 г. по 31 декабря 2000 г.

На рис.1 и в таблице приведены исследуемые ряды атмосферного давления и их статистические параметры. В рядах обеих станций обнаружены слабые отрицательные линейные тренды. Давление убывает со скоростью около 0,03 гПа/год. Тренды, вероятно, возникли из-за многолетних (порядка 70 лет) колебаний атмосферной циркуляции в рассматриваемом макрорайоне [3].

Статистические параметры рядов атмосферного давления

Станция	Среднее, гПа	СКО, гПа	Медиана, гПа	Максимум, гПа	Минимум, гПа	Тренд гПа/год
МГУ	992,1	10,4	992,0	1035,6	941,7	-0,035
Диксон	1005,2	12,4	1005,5	1054,6	941,1	-0,032

Спектральный анализ

Мы имели ряды из 105 192 срочных значений атмосферного давления с шагом 3 ч. При помощи программы Матлаб 6 сделано быстрое преобразование Фурье каждого из этих рядов. Полученные энергетические спектры колебаний атмосферного давления приведены на рис. 2. На них легко прослеживаются области макро-, мезо- и мелкомасштабной турбулентности, занятые сплошным спектром, в котором энергия непрерывно спадает от низких частот к высоким по известным законам макро- и микромасштабной турбулентности.

На непрерывный спектр накладываются четко выраженные полосы на периодах 1 год, 1 сут, 12, 8 и 6 ч. При большем увеличении у суточной гармоники и ее супергармоник выявляются боковые линии, которые расположены симметрично относительно центральной линии, образуя пары равноудаленных линий. Они явно указывают на то, что мы имеем дело с модулированными колебаниями.

Ясно, что атмосферное давление меняется с суточным и годовым периодами. Амплитуда суточных колебаний зависит от сезона года. В итоге возникает амплитудная модуляция суточных колебаний давления. Длительность метеорологического года варьируется в пределах нескольких процентов. Из-за этого возникает частотная модуляция суточных колебаний давления.

Амплитудно-модулированное колебание можно описать моделью [2]:

$$\begin{aligned} P &= A \left[1 + \sum_{i=1}^N m_i \cos(\Omega_i t + \Phi_i) \right] \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= A \cos(\omega t + \varphi) + \sum_{i=1}^N 0,5 A m_i \cos[(\omega + \Omega_i)t + \Phi_i] + \\ &\quad + \sum_{i=1}^N 0,5 A m_i \cos[(\omega - \Omega_i)t + \varphi + \Phi_i], \end{aligned} \quad (1)$$

где P — давление; A , ω и φ — амплитуда, круговая частота и начальная фаза несущего колебания соответственно; m — глубина модуляции; Ω и Φ — частота и фаза модуляции амплитуды несущего колебания соответственно; t — время; i — номер гармоники.

Рассмотрим подробнее структуру колебаний модели (1):

— первое слагаемое в правой части уравнения (1) является несущим колебанием;

— второе слагаемое описывает гармонические составляющие с частотами $\omega + \Omega_i$, их называют верхней боковой полосой частот;

— третье слагаемое описывает гармонические составляющие с частотами $\omega - \Omega_i$, их называют нижней боковой полосой частот.

Амплитуды боковых составляющих равны $0,5 A m_i$.

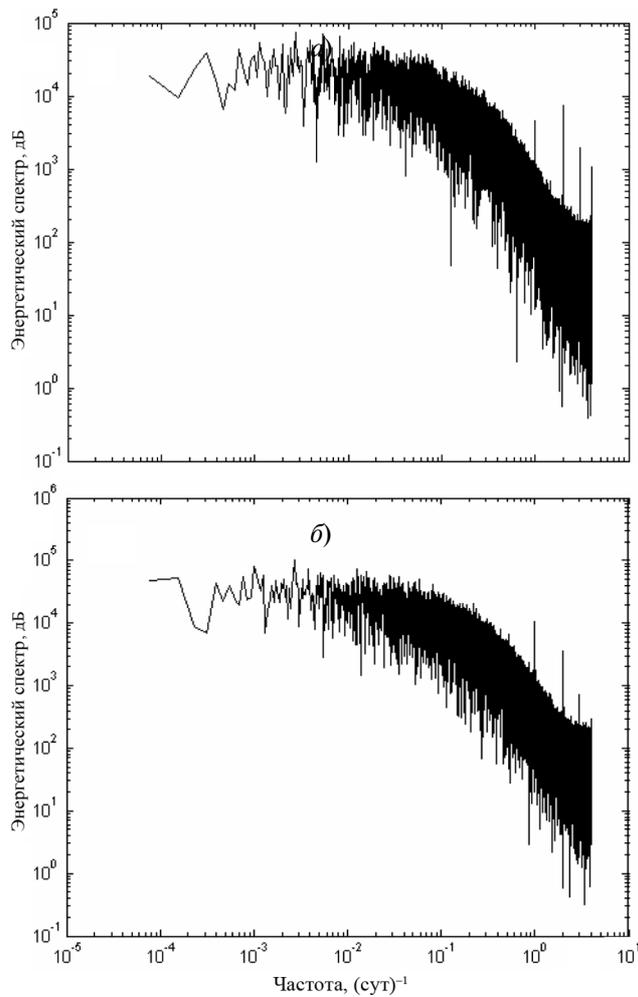


Рис. 2. Энергетический спектр S колебаний атмосферного давления на метеостанциях МГУ (а) и Диксон (б).

В случае частотной модуляции колебания можно описать моделью [2]:

$$\begin{aligned}
 P &= A[1 + m \cos(\Omega t + \Delta\Omega \sin vt)] \cos \omega t = \\
 &= A \left[1 + m J_0(\Delta\Omega) \cos \Omega t + m \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\Delta\Omega) \cos(\Omega + n v) t + \right. \\
 &\quad \left. + m \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(\Delta\Omega) \cos(\Omega - n v) t \right] \cos \omega t, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $\Delta\Omega$ и ν — амплитуда и круговая частота изменений модулирующей частоты Ω соответственно; m — глубина модуляции; $J_n(\Delta\Omega)$ — функция Бесселя n -го порядка аргумента $\Delta\Omega$; остальные обозначения такие же, как в выражении (1).

Спектр частотно-модулированного колебания даже при модуляции гармоническим сигналом состоит из бесконечного числа боковых составляющих, симметрично отстоящих от несущей частоты на расстояния, кратные частоте вариаций ν . Амплитуды боковых составляющих выражаются через функции Бесселя первого рода n -го порядка:

$$A_n = Am|J_n(\Delta\Omega)|.$$

Теперь вернемся к рассмотрению энергетического спектра колебаний атмосферного давления на метеостанциях МГУ и Диксон. Поскольку боковые полосы этих спектров аналогичны, то приведем только графики спектров метеостанции МГУ. Сначала проанализируем близсуточную область в диапазоне частот $0,97-1,03$ (сут) $^{-1}$ (рис. 3 а). Здесь центральной линией на частоте 1 (сут) $^{-1}$ является хорошо известная суточная волна термического прилива S_1 [3, 5]. Ее мощность равна 4214.

Несущую волну S_1 окружают симметрично расположенные боковые линии. Линия, расположенная слева на частоте $0,9973$ (сут) $^{-1}$, отождествляется с главной солнечной волной P_1 , а линия, находящаяся справа на частоте $1,0027$ (сут) $^{-1}$, соответствует лунно-солнечной деклинационной волне K_1 [3, 5]. Мощности волн P_1 и K_1 равны соответственно 4608 и 3874. Сложение волны S_1 с волнами P_1 и K_1 обуславливает модуляцию (медленное изменение) амплитуды суточных колебаний давления с годовым периодом.

Модуляция суточных колебаний давления полугодовым периодом должна порождать пару линий на частотах $0,9945$ (сут) $^{-1}$ (волна π_1) и $1,0055$ (сут) $^{-1}$ (волна ψ_1). В полученном спектре надежно выделяется только волна ψ_1 . Ее мощность равна 1621. Волна исчезла, вероятно, из-за взаимодействия с третьесуточными волнами. На рис. 4 а, где приведен спектр третьесуточной области, аналогичные боковые пики расположены противоположным образом, чем на рис. 3 а.

В полусуточной области, в диапазоне частот $1,98 < f < 2,02$ (сут) $^{-1}$, центральной является линия на частоте 2 (сут) $^{-1}$ (рис. 3 б). Это хорошо известная полусуточная волна термического прилива S_2 [3, 5]. Ее мощность равна 7435, т. е. почти в 2 раза больше мощности суточной волны S_1 . Несущую волну S_2 окружают симметрично расположенные две пары боковых линий. Первую пару образуют:

— слева линия на частоте $1,9973$ (сут) $^{-1}$, совпадающая с большой эллиптической солнечной волной T_2 ;

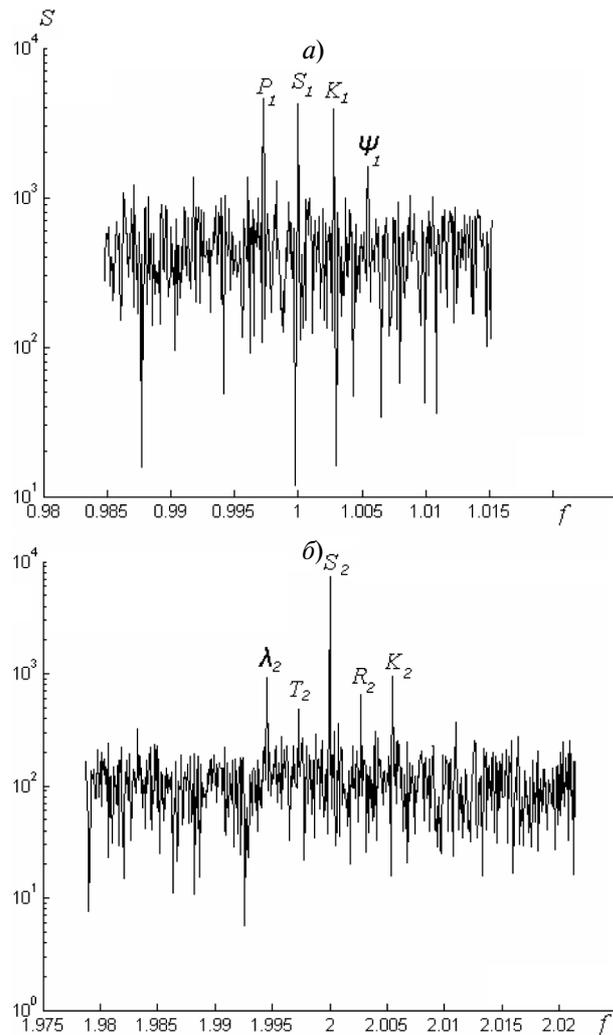
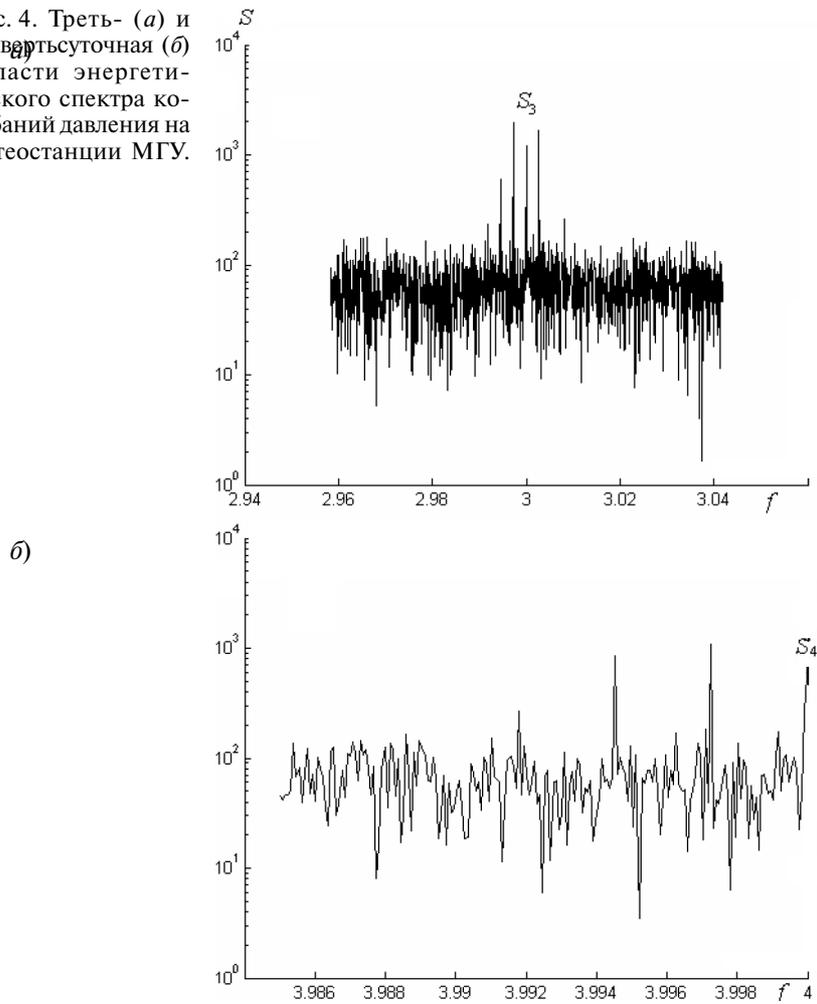


Рис. 3. Близуточная (а) и полусуточная (б) области энергетического спектра колебаний давления на метеостанции МГУ.

— справа линия на частоте $2,0027 \text{ (сут)}^{-1}$, соответствующая малой эллиптической солнечной волне R_2 [3, 5].

Мощности волн T_2 и R_2 равны соответственно 479 и 644. Сложение волны S_2 с волнами T_2 и R_2 обуславливает модуляцию амплитуды полусуточных колебаний давления с годовым периодом.

Рис. 4. Треть- (а) и четвертьсуточная (б) области энергетического спектра колебаний давления на метеостанции МГУ.



Вторую пару образуют:
 — слева линия на частоте $1,9945 \text{ (сут)}^{-1}$ (волна λ_2),
 — справа линия на частоте $2,0055 \text{ (сут)}^{-1}$ (волна K_2).
 Мощности этих волн равны соответственно 929 и 938. Сложение волны S_2 со второй парой волн обуславливает амплитудную модуляцию полусуточных колебаний давления с периодом 1/2 года.

В третьесуточной области, в диапазоне частот $2,92 < f < 3,08$ (сут)⁻¹, центральной является линия на частоте 3 (сут)⁻¹ (рис. 4 а). Она имеет мощность 1193. Ее можно назвать третьесуточной волной термического прилива S_3 . Несущую волну S_3 окружают две симметрично расположенные боковые линии. Это волны с частотами $2,9973$ и $3,0027$ (сут)⁻¹, имеющие мощности соответственно 1981 и 1683. Они ответственны за модуляцию амплитуды третьесуточных колебаний давления с периодом 1 год.

В случае модуляции третьесуточных колебаний давления с полугодовым периодом можно ожидать боковые линии на частотах $2,9945$ и $3,0055$ (сут)⁻¹. Однако в полученном спектре (вероятно, из-за взаимодействия с суточными волнами) выделяется только волна с частотой $2,9945$ (сут)⁻¹, мощность которой равна 596. Отметим еще симметрично расположенную на равном удалении от несущей волны S_3 пару боковых линий на частотах $2,9918$ и $3,0082$ (сут)⁻¹, имеющих мощности соответственно 234 и 258. Эта пара линий указывает на существование амплитудной модуляции третьесуточных колебаний давления с периодом $1/3$ года.

В четвертьсуточной области, в диапазоне частот $3,89 < f < 4,04$ (сут)⁻¹, достоверны только боковые линии, расположенные слева от центральной линии S_4 , расположенной на частоте 4 (сут)⁻¹ и имеющей мощность 829 (см. рис. 4 б). Здесь также выделяются боковые линии на частотах $3,9973$; $3,9945$ и $3,9918$ (сут)⁻¹, имеющие мощности соответственно 1094, 849, и 267. Они обуславливают амплитудную модуляцию четвертьсуточных колебаний давления с периодами 1, $1/2$ и $1/3$ года.

Из-за сложения всех гармоник суточный ход давления оказывается сложным. Пользуясь пакетом Матлаб 6, мы вычислили средние за 36 лет значения давления в каждый из восьми сроков наблюдения в сутках. Каждое срочное значение вычислено как среднее из 13 149 измерений. Результаты приведены на рис. 5.

Для данных обсерватории МГУ преобладает полусуточная гармоника, а кривая суточного хода имеет два максимума в 12 и 24 ч и два минимума в 6 и 18 ч московского времени (см. рис. 5 а). Общий размах суточной вариации давления составляет 0,38 гПа, что хорошо согласуется с данными работы [5]. Для данных метеостанции Диксон преобладает суточная гармоника, поэтому в суточном ходе имеется один максимум (в 12 ч) и один минимум (в 3 ч местного поясного времени) (рис. 5 б). Здесь общий размах суточной вариации составляет 0,50 гПа.

Чтобы выявить годовой ход давления, аналогично расчету срочных значений, вычислены среднесуточные значения давления. Так как анализировались 36-летние ряды наблюдений, поэтому каждое среднесуточное значение вычислено путем усреднения

Рис. 5. Суточный ход атмосферного давления на метеостанциях МГУ (а) и Диксон (б).

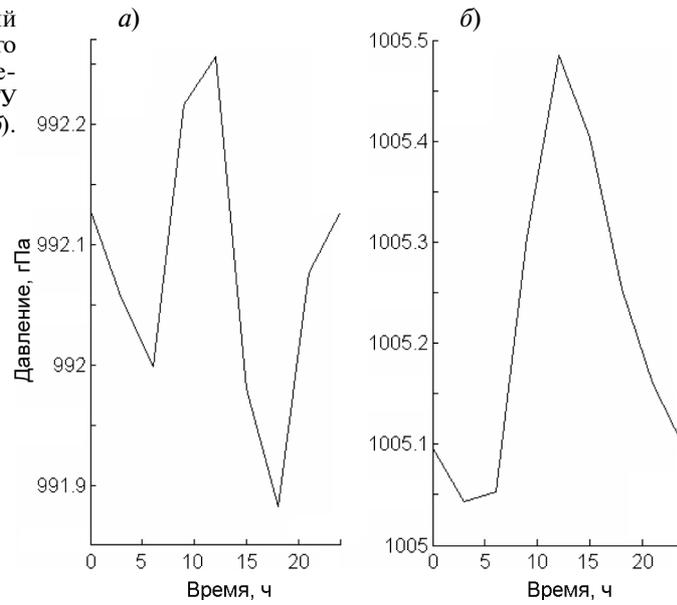
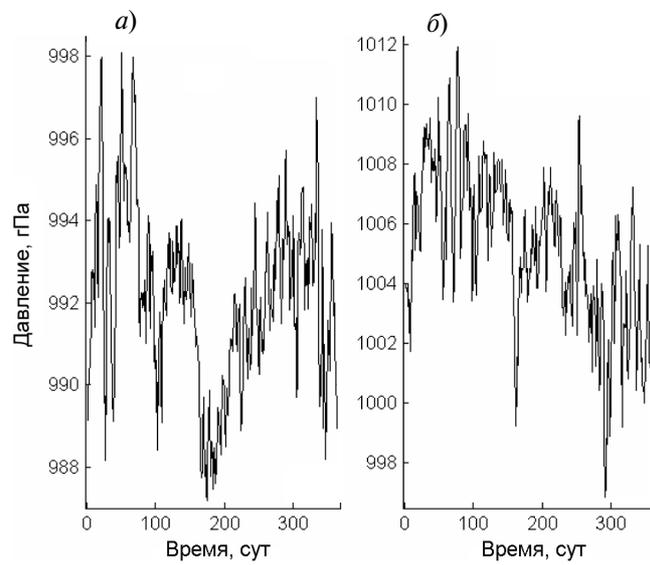


Рис. 6. Годовой ход атмосферного давления на метеостанциях МГУ (а) и Диксон (б).



всего 36 значений давления за соответствующие календарные сутки. Результаты вычислений приведены на рис. 6.

Для обсерватории МГУ кривая годового хода имеет давления два максимума (в конце февраля и конце октября) и два минимума (в конце июня — основной и в декабре) (рис. 6 *а*). То есть здесь сезонный ход атмосферного давления обусловлен не только сезонным перераспределением массы воздуха между океанами и материками, но и эффектом циркуляции воздуха между летним и зимним полушариями (см. п. 7.6 в работе [3]). Разность давления между февральским максимумом и июньским минимумом равна 11 гПа.

На метеостанции Диксон в годовом ходе атмосферное давление достигает максимума в марте, затем медленно спадает до минимума в октябре и быстро нарастает до максимума в марте (рис. 6 *б*). Перепад давления между максимумом и минимумом составляет 15 гПа.

Выводы

Энергетические спектры колебаний атмосферного давления имеют занятые сплошным спектром области макро-, мезо- и мелкомасштабной турбулентности. Энергия колебаний непрерывно возрастает от высоких к низким частотам по известным законам мелко- и макромасштабной турбулентности. На фоне непрерывного спектра выделяются пики на периодах 1 год, 1 сут, а также 12, 8 и 6 ч. Суточная гармоника и ее субгармоники модулированы гармониками и субгармониками годовой частоты, и поэтому имеют семейства приливных составляющих. Средний размах суточного хода атмосферного давления составляет около 0,5 гПа, а у годового хода достигает 15 гПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диккий Л. А. Теория колебаний земной атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 196 с.
2. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. — Л.: Энергия, 1972. — 816 с.
3. Сидоренков Н. С., Атмосферные процессы и вращение Земли. — СПб.: Гидрометеиздат, 2002. — 366 с.
4. Сидоренков Н. С. Приливы дирижируют погодой // Земля и Вселенная. — 2003. — № 5. — С. 3—9.
5. Чепмен С., Линдзен З. Атмосферные приливы: термические и гравитационные. — М.: Мир, 1972. — 295 с.
6. Hamilton K., Garcia R. R. Theory and observations of the short-period normal mode oscillations of the atmosphere // J. Geophys. Res. — 1986. — Vol. 91, N D11. — P. 11867—11875.