

УДК 550.3; 550.4

## ПРИЛИВНЫЕ ВОЛНЫ И ВАРИАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2017 г. В.В. Адушкин, А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, В.А. Харламов

*Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия*

Анализируются результаты инструментальных наблюдений на Геофизической обсерватории “Михнево” и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы Института динамики геосфер РАН в период 2008–2015 гг., выполненных с целью исследования влияния лунно-солнечного прилива на вариации атмосферного давления.

Вариации атмосферного давления регистрировались в частотном диапазоне  $10^{-4}$ – $10^2$  Гц. Оценка спектральных характеристик вариаций атмосферного давления проводилась на основе метода параметрической авторегрессии. С целью более качественного разделения близких по периодам приливных волн в атмосфере применялся метод выделения гармонических составляющих с помощью узкополосных адаптивных режекторных фильтров. В результате обработки данных на спектрах вариаций атмосферного давления обнаружены основные приливные волны с около- и полусуточными периодами.

Суточные и полусуточные гармоники вариаций атмосферного давления сопровождаются боковыми равноудаленными спектральными линиями, что является прямым указанием на модуляцию указанных спектральных составляющих. Периоды модуляции соответствующих приливных волн составляют около 13.6, 27.5 сут, а также 1/3, 1/2 и 1 г. Глубина модуляции приливной волны  $S_1$  годовой гармоникой около 0.9, полугодовой – примерно 0.2; для приливных волн  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $R_2$ ,  $T_2$  и  $\lambda_2$  глубина модуляции годовой гармоникой оценивается как  $\sim 0.5$ , полугодовой –  $\sim 0.15$ .

**Ключевые слова:** инструментальные наблюдения, атмосферное давление, лунно-солнечный прилив, приливные волны в атмосфере.

### Введение

Прилив как результат гравитационного взаимодействия главным образом в системе трех небесных тел – Земли, Луны и Солнца – играет весьма важную роль в геофизических явлениях и процессах, протекающих в приповерхностной зоне Земли [Авсюк, 1996; Мельхиор, 1968; Ржонсницкий, 1979; Covey *et al.*, 2014]. По разным оценкам (см., например, [Сидоренков, 2002; Каула, 1971]) мощность приливного воздействия в твердой геосфере составляет от  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  до  $10^{20}$  Дж/год. Известно также влияние, которое оказывает приливная деформация Земли практически на все известные физические процессы и поля [Авсюк, 1996; Гарецкий, Добролюбов, 2006; Адушкин, Спивак, 2012, 2014].

Наряду с морским приливом и приливом в твердой Земле нас заинтересовал атмосферный прилив, играющий значительную роль в формировании средних характеристик движения воздушных масс как в глобальном, так и локальном масштабе [Адушкин, Спивак, Харламов, 2016; Голицын, 2004; Сидоренков, 2002, 2015; Чепмен, Линдзен, 1972; Zurbenko, Portzeva, 2009]. В отличие от приливного эффекта в земной коре и литосфере атмосферный прилив является результатом действия трех факторов: гравитационного взаимодействия со стороны Луны и Солнца (гравитационная составляющая атмосферного прилива), вращения Земли и прогрева атмосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли. При этом интенсивность прогрева атмосферы определяется

поглощением солнечной энергии, а характерный период процесса составляет 1 сут, совпадая с периодом гравитационной приливной волны  $S_1$  (термическая составляющая атмосферного прилива).

Изучение атмосферного прилива представляет особый интерес и, прежде всего, для уточнения и установления новых морфологических особенностей глобальных распределений приливных вариаций атмосферного давления и векторных характеристик атмосферы (ветровое движение воздушных масс), что важно, в частности, при эксплуатации летательных аппаратов. Не последнее место занимает динамика атмосферного прилива в ряду факторов, влияющих на вариации скорости вращения Земли и ее нутацию [Сидоренков, 2002]. Здесь следует подчеркнуть важность изучения атмосферного прилива и для уточнения модели внутреннего строения Земли, в частности, процессов взаимодействия на границе ядро–мантия.

Действительно, поскольку частота и амплитуда околосуточной нутации нашей планеты в значительной мере определяется ее внутренним строением, анализ отклонения наблюдаемых и теоретически предсказанных амплитуд нутационных гармоник предоставляет хорошие возможности для уточнения модели Земли.

Сложности, связанные с изучением атмосферного прилива на основе анализа изменения абсолютной величины атмосферного давления хорошо известны и определяются сильными барическими возмущениями атмосферы – циклонами и антициклонами. Даже при использовании длинных рядов записей атмосферного давления удается выделить лишь некоторую часть приливных волн [Zurbenko, Potrzeva, 2009].

В настоящей работе выделение периодичностей, совпадающих с периодичностями лунно-солнечных приливов, осуществлялось на основе анализа огибающей колебаний атмосферного давления в диапазоне частот 0.0001–10 Гц. Такая постановка задачи – аналог задачи о модулировании высокочастотного сейсмического шума приливными возмущениями земной коры [Гордеев и др., 1995; Рыкунов, Хаврошкин, Цыплаков, 1980; Спивак, Кишкина, 2004].

Привлечение для анализа длинных рядов цифровых записей обеспечило гарантированную репрезентативность данных, обосновывающих исследуемый феномен, а высокая повторяемость результатов обработки, выполненной, в том числе по фрагментам, – достоверность и обоснованность конечных результатов.

### Исходные данные

В качестве исходных данных использовались ряды инструментальных наблюдений за атмосферным давлением, выполненных в 2008–2015 гг. на Геофизической обсерватории “Михнево” (54.9595 °с.ш., 37.7664 °в.д.) и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы<sup>1</sup> (55.7052 °с.ш., 37.5707 °в.д.) Института динамики геосфер РАН [Адушкин, Спивак, Харламов, 2016; Адушкин и др., 2016; Спивак и др., 2015]. Одновременно с атмосферным давлением  $P_0$  регистрировались его вариации  $P(t)$  в полосе частот  $10^{-4}$ – $10^2$  Гц (частота оцифровки 20 Гц), для чего использовался микробарометр МБ-03, оснащенный ветроподавляющими пространственными фильтрами [Рыбнов, Харламов, Евменов, 2005; Спивак и др., 2015]. Для снижения температурного дрейфа микробарометр был установлен в скважину глубиной 2 м.

Результаты регистрации в виде цифровых рядов  $P(t)$  накапливались на жестких носителях и выкладывались на сайте ИДГ РАН (данные Обсерватории “Михнево” в графическом виде по адресу <http://idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/>, в цифровом по адресу

<sup>1</sup> Далее для краткости будут использоваться названия Обсерватория “Михнево” и Центр мониторинга.

<http://idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/data/>; данные Центра мониторинга в графическом и цифровом виде по адресу: <http://idg-comp.chph.ras.ru/~idg/Data/>).

### Применяемые методы обработки и анализа данных

Для анализа формировались цифровые ряды данных с дискретностью 1 мин. Таким образом, обрабатывались ряды, состоящие из более чем  $4.2 \cdot 10^6$  значений атмосферного давления  $P_0$ . Оценка спектра вариаций  $P_0$  выполнялась методом параметрической авторегрессии [Канасевич, 1985; Марпл, 1990]. Авторегрессионная модель порядка  $p$  представляла собой уравнение, предсказывающее  $k$ -й член последовательности по  $p$  предыдущим:

$$x(k) = -\sum_{n=1}^p a_n x(k-n) + \psi(k),$$

где  $a_n$  – коэффициенты авторегрессии;  $\psi(k)$  – белый шум.

Параметры  $AR(p)$ -модели оценивались по методу Левинсона–Дурбина, реализующему решение уравнений Юла–Уолкера. По вычисленным значениям параметров модели оценивался спектр процесса

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi \left| 1 + \sum_{n=1}^p a_n e^{-i\omega n} \right|^2}.$$

Для достижения максимального разрешения компонентов приливных волн параметр  $p$  выбирался равным длине анализируемого ряда данных. При этом шаг дискретизации по частоте составлял  $\Delta f = 1.426 \cdot 10^{-5}$  1/ч.

Для обеспечения более качественного разделения близких по периодам приливных волн в дополнение к параметрическому спектральному анализу в настоящей работе применялся метод выделения гармонических составляющих с помощью узкополосных адаптивных режекторных фильтров [Уидроу, Гловер, Макул, 1975; Уидроу, Стирнз, 1989]. Преимущество этих фильтров заключается в простоте перестройки полосы пропускания и практически неограниченном подавлении соседних гармоник при точном слежении за частотой. С этой целью суммарное атмосферное давление представлялось как суперпозиция нескольких ( $N$ ) независимых составляющих  $P_i(t)$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, N$ , в результате чего полученный после измерений ряд  $P(t)$  представлялся в виде векторного соотношения свертки:

$$P(t) = \sum_{i=1}^N g_i * P_i(t), \quad (1)$$

где  $g_i(t)$  – импульсная переходная характеристика, определяемая путем решения интегральных уравнений свертки (1) [Тихонов, Арсенин, 1979].

Амплитуда выделяемой гармоники с заданной частотой  $\omega$  определяется по формуле

$$P_i = C \sqrt{W_{1,i}^2 + W_{2,i}^2},$$

в которой  $C$  – амплитуда колебаний (вариаций);  $W_{1,i}$  и  $W_{2,i}$  – коэффициенты адаптивного фильтра, вычисляемые согласно выражениям

$$W_{1,i+1} = W_{1,i} + 2\mu \epsilon_i P_i,$$

$$W_{2,i+1} = W_{2,i} + 2\mu \epsilon_i P_{2i}.$$

В этих выражениях  $\mu$  – параметр, характеризующий скорость сходимости алгоритма адаптации коэффициентов фильтра;  $\varepsilon_i$  – разность между исходным  $P(t)$  и синтезированным  $P_i(t, \omega)$  сигналами; при этом

$$P_{si} = P_{1i}W_{1i} + P_{2i}W_{2i}.$$

Квадратурные составляющие  $P_{1i}$  и  $P_{2i}$  с частотами  $\omega_i$  выделяемых сигналов определяются зависимостями

$$P_{1i} = C \cos(\omega_i \Delta t + \varphi),$$

$$P_{2i} = C \sin(\omega_i \Delta t + \varphi),$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации, равный 1 ч.

Добротность  $Q$  такого фильтра определяется параметрами  $\mu$  и  $C$  по формуле

$$Q = \omega \Delta t / 2\mu C^2.$$

При выбранных  $\mu=0.02$  и  $C=0.02$  величина  $Q$  составляет  $1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^4$ , что обеспечивает разрешение по частоте  $8 \cdot 10^{-6}$  1/ч или разрешение по времени 0.0046 ч. Такое разрешение позволяет выделять даже самые близкие волны  $S_1$  и  $P_1$ , периоды которых различаются на 0.0648 ч.

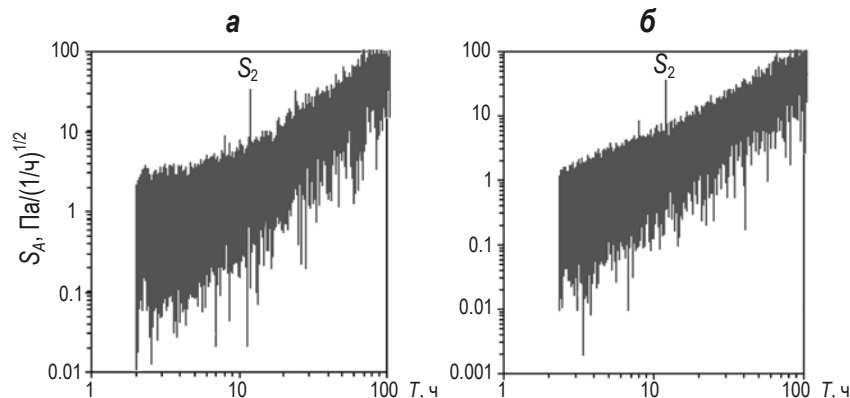
Значения  $\omega_i$  выбирались равными частотам приливного потенциала. Алгоритм вычислений давал возможность одновременно суммировать несколько синтезированных сигналов с разными  $\omega_i$ .

### Результаты анализа вариаций атмосферного давления

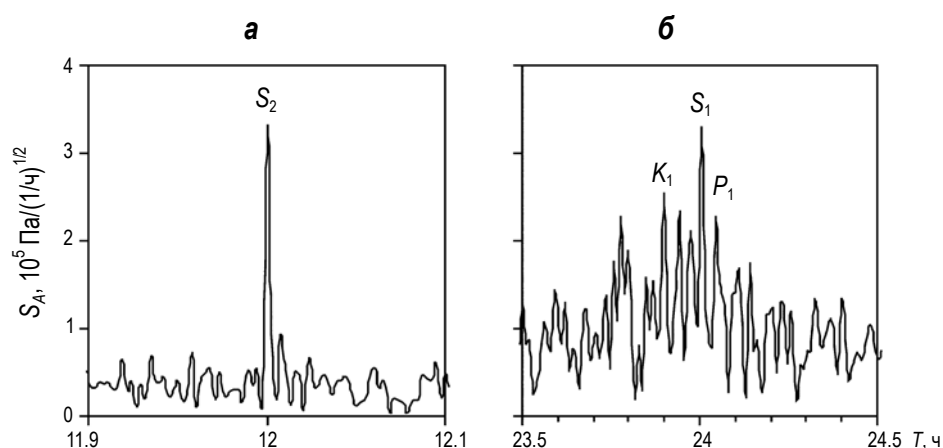
Вычисленные за весь период регистрации амплитудные спектры колебаний атмосферного давления  $P_0$  на Обсерватории “Михнево” и в Центре мониторинга представлены на рис. 1, наглядно демонстрирующем диапазоны периодов  $T$  с разномасштабной турбулентностью. Отчетливо выделяется один максимум в окрестности периода 12 ч, который можно идентифицировать как приливную волну  $S_2$ .

На рис. 2 в более крупном масштабе приведен пример спектра в окрестности периодов 12 ч (а) и 24 ч (б), где проявляются (хотя и не вполне отчетливо) спектральные составляющие приливных волн  $K_1$  с периодом 24.064 ч и  $P_1$  с периодом 23.935 ч.

Приведенные на рис. 1, 2 данные свидетельствуют о том, что использование даже достаточно длинных рядов данных, полученных при измерении атмосферного давления  $P_0$ ,



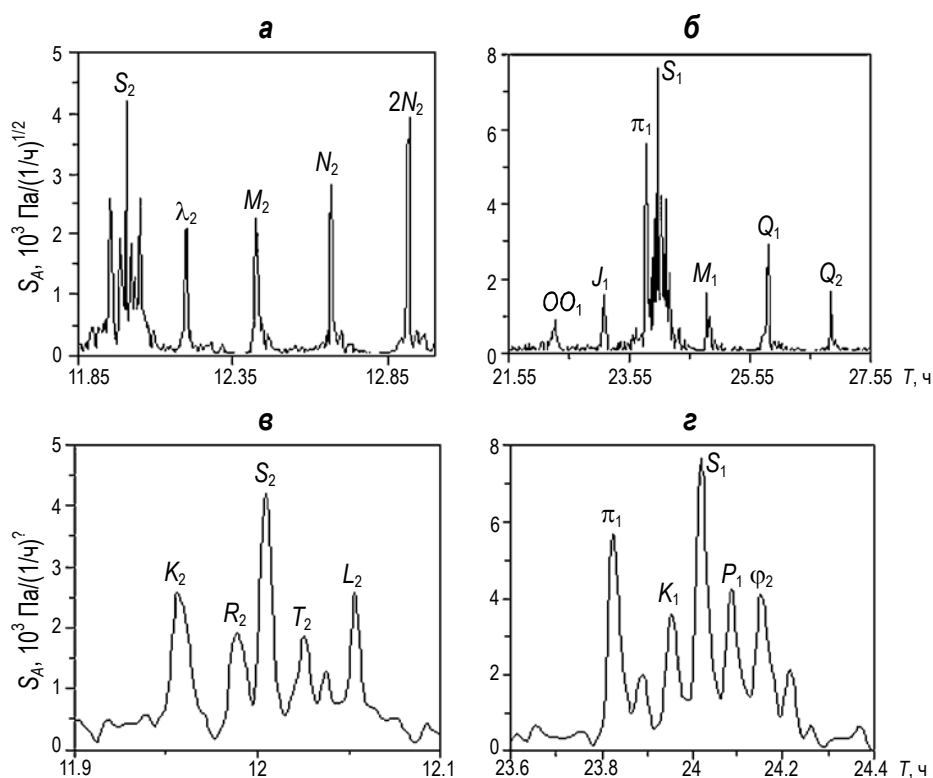
**Рис. 1.** Спектральная амплитуда колебаний атмосферного давления  $S_A$  на Геофизической обсерватории “Михнево” (а) и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы (б);  $S_2$  – пиковая частота, соответствующая главной солнечной приливной волне



**Рис. 2.** Геофизическая обсерватория “Михнево”. Полусуточная (а) и околосуточная (б) области спектра колебаний атмосферного давления. Здесь и далее в поле рисунков приведены обозначения приливных волн

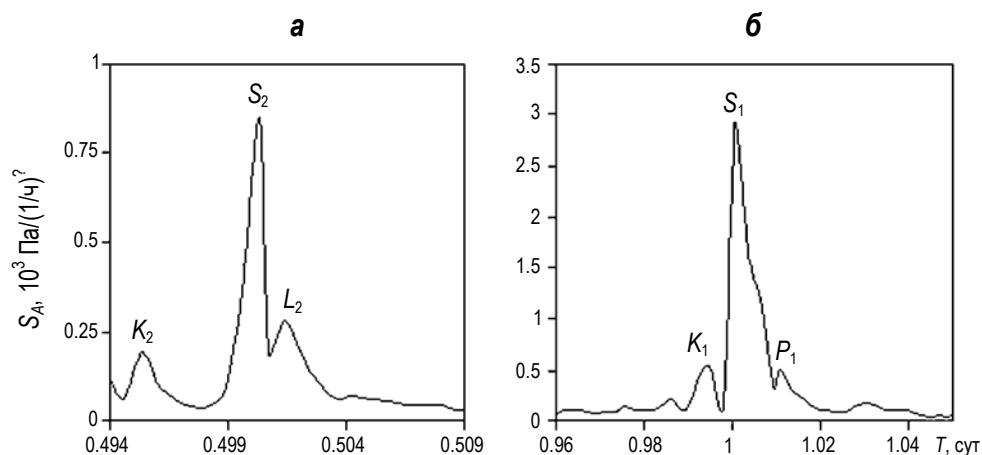
не позволяет регистрировать и выделять весь спектр приливных волн, что, по всей видимости, связано с сильным влиянием циклонических процессов, протекающих на средних широтах.

Значительного эффекта, связанного с выделением приливных волн, можно добиться, анализируя не абсолютную величину атмосферного давления  $P_0$ , а его вариации  $P(t)$ . Действительно, как показывает обработка результатов инструментальных наблюдений, на спектрах  $P(t)$  отчетливо выделяются практически все известные приливные волны. В качестве примера на рис. 3 приведены спектры вариаций атмосферного давления в окрестности полусуточных и околосуточных периодов в г. Москве.



**Рис. 3.** Центр геофизического мониторинга г. Москвы. Полусуточные (а, в) и околосуточные (б, з) области спектра вариаций атмосферного давления

Подход, основанный на использовании адаптивных режекторных фильтров, позволяет также выделять близкие по значению периоды приливных волн. В качестве примера на рис. 4 приведены участки спектра вариаций атмосферного давления вблизи полусуточных (а) и суточных (б) периодов на Обсерватории “Михнево”. Наряду с солнечными приливными волнами  $S_1$  и  $S_2$  отчетливо выделяются близкие к ним по периодам приливные волны  $P_1$ ,  $K_1$  (рис. 4, б) и  $L_2$ ,  $K_2$  (рис. 4, а).



**Рис. 4.** Геофизическая обсерватория “Михнево”. Пример выделения близких по периодам приливных волн. Участки спектра вариаций за период с апреля по сентябрь 2011 г. в диапазоне полусуточных (а) и суточных (б) периодов

Полученные данные свидетельствуют, что с учетом неопределенности спектральных оценок периоды выделенных квазигармонических составляющих соответствуют периодам основных приливных волн (таблица), а фазы выделенных приливных волн и приливного сигнала практически совпадают.

#### Основные характеристики приливных волн

Волна	Период приливного сигнала ( $T_0$ )	Период, вычисленный по спектру ( $T_S$ )	$(T_0 - T_S)/T_0$ , %
$Q_1$	26.868	26.831	0.138
$O_1$	25.819	25.811	0.031
$M_1$	24.833	24.809	0.096
$\pi_1$	24.132	24.151	-0.079
$P_1$	24.066	24.085	-0.079
$S_1$	24.00	24.020	-0.083
$K_1$	23.934	23.954	-0.083
$\Phi_1$	23.804	23.825	-0.088
$J_1$	23.098	23.118	-0.086
$OO_1$	22.306	22.319	-0.058
$2N_2$	12.904	12.899	0.039
$N_2$	12.658	12.653	0.039
$M_2$	12.420	12.415	0.040
$\lambda_2$	12.220	12.192	0.229
$L_2$	12.191	12.043	1.216
$T_2$	12.017	12.015	0.013
$S_2$	12.00	11.993	0.058
$R_2$	11.984	11.977	0.058
$K_2$	11.967	11.945	0.184

В отличие от земных приливов спектральные амплитуды солнечных приливов в целом превышают амплитуду лунных. Этот известный факт связан с дополнительным влиянием терминатора – термического солнечного прилива [Чепмен, Линдзен, 1972].

Здесь уместно отметить, что формирование приливных волн в атмосфере – существенно более сложный процесс по сравнению с формированием прилива в твердой Земле. Это связано не только с прогревом атмосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли, но и с сильными вариациями атмосферного давления в результате циклонической деятельности и значительными разнонаправленными пространственными переносами воздушных масс. Особенности атмосферного прилива еще не в полной мере изучены инструментально. Это касается, в частности, соотношения между амплитудами разных приливных волн. Например, если в случае прилива в твердой Земле амплитуда приливной волны  $M_2$  на средних широтах практически в 35 раз превышает амплитуду волны  $L_2$ , то в атмосфере, как это видно из рис. 3, эти амплитуды сопоставимы.

Анализ полученных данных показывает, что амплитуды приливных волн  $A$  значительно варьируют во времени. В качестве примера на рис. 5 приведены вариации относительных спектральных амплитуд основных приливных волн, рассчитанные по данным настоящей работы. Отчетливо видны периодичности в изменениях рассматриваемых величин. Например, амплитуда приливной волны  $K_2$  меняется со временем с периодом ~4.8 мес. Однако больший интерес вызывает поведение амплитуды солнечной эллиптической волны  $S_1$ , амплитуда которой то периодически достигает максимальных значений, сравнимых, а временами даже превышающих амплитуду таких стабильно регистрируемых волн, как  $K_2$ ,  $L_2$ ,  $M_2$  и др., то настолько мала, что ее невозможно выделить используемыми в настоящей работе методами.

Поскольку волна  $S_1$  является одной из основных при рассмотрении термической составляющей атмосферного прилива, можно предполагать, что рост и падение ее амплитуды определяется степенью нагрева атмосферы, т.е. величиной температурных вариаций. Результаты анализа свидетельствуют о том, что действительно максимальные значения амплитуды солнечной приливной волны  $S_1$  наблюдаются в периоды повышенных относительных значений температуры воздуха  $T$ .

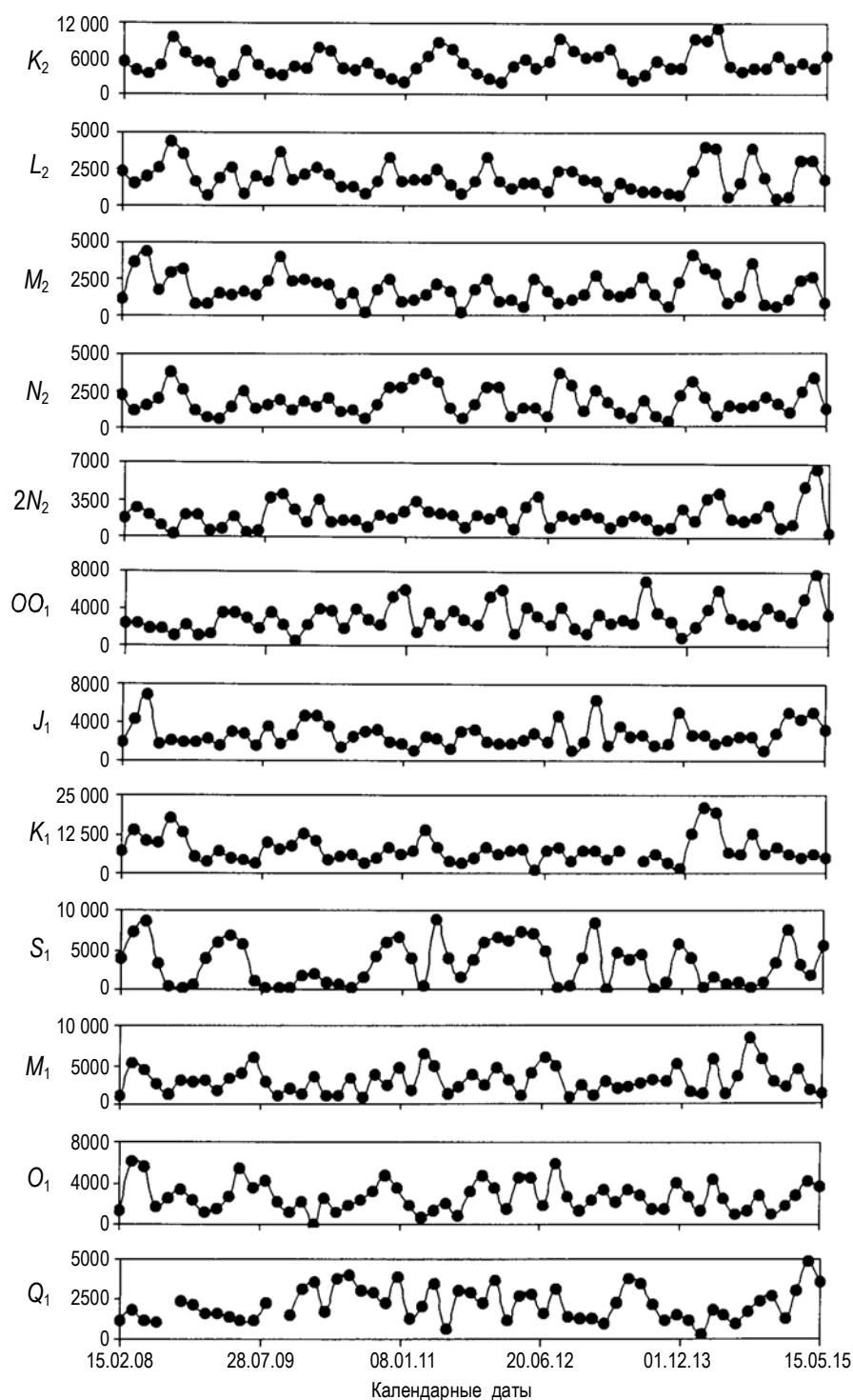
### Модуляция вариаций атмосферного давления приливными волнами

Вследствие нелинейности происходящих в атмосфере процессов суперпозиция длиннопериодных и короткопериодных вариаций атмосферного давления  $P$  приводит к появлению дополнительных периодов на спектрах вариаций  $P$ . Так как длительность метеорологического года меняется слабо (не более чем на несколько процентов) можно ожидать, что по крайней мере суточные вариации давления модулируются годовыми.

Амплитудно-модулированное колебание записывается в виде следующей модели [Зернов, Карпов, 1972; Сидоренков, 2008]:

$$P = V \cos(\omega t + \varphi) + \sum_{i=1}^N 0.5Vm_i \cos[(\omega + \Omega_i)t + \Phi_i] + \sum_{i=1}^N 0.5Vm_i \cos[(\omega - \Omega_i)t + \varphi + \Phi_i],$$

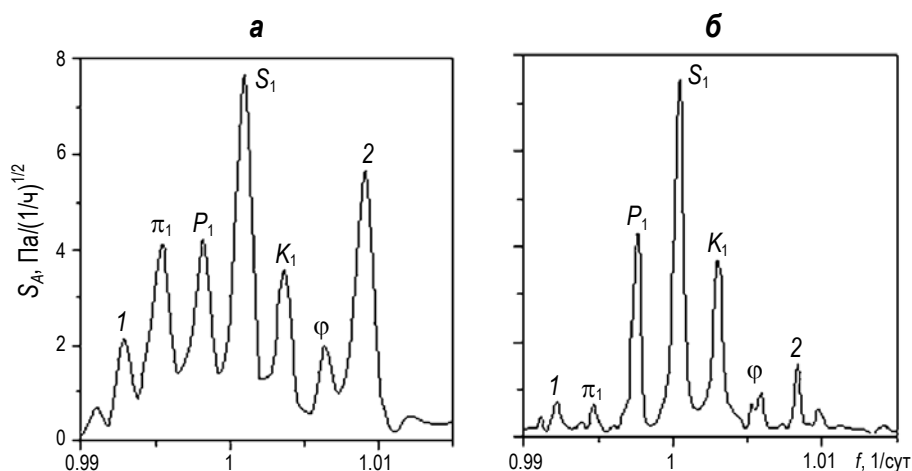
где  $V$ ,  $\omega$  и  $\varphi$  – соответственно амплитуда, круговая частота и начальная фаза несущего колебания;  $m$  – глубина модуляции;  $\Omega$  и  $\Phi$  – соответственно частота и фаза модуляции амплитуды несущего колебания;  $t$  – время;  $i$  – номер гармоники. Это выражение отражает характер амплитудно-модулированного колебания, включающего несущее колебание (первое слагаемое), гармонические составляющие с частотами  $\omega + \Omega_i$  (верхняя боковая частота) и  $\omega - \Omega_i$  (нижняя боковая частота). При этом амплитуды боковых составляющих определяются величиной  $0.5Vm_i$ .



**Рис. 5.** Геофизическая обсерватория “Михнево”. Вариации амплитуд основных приливных волн в период с февраля 2008 г. по май 2015 г. На осях ординат  $A$ , отн. ед.; рядом с осями – обозначения соответствующих приливных волн

В качестве примера проанализируем вычисленный с применением адаптивных режекторных фильтров спектр околосуточных вариаций микропульсаций атмосферного давления, зарегистрированных в Центре мониторинга и на Обсерватории “Михнево” (рис. 6). При этом отметим, что модуляцию этих микропульсаций более корректно рассматривать на примере спектров.



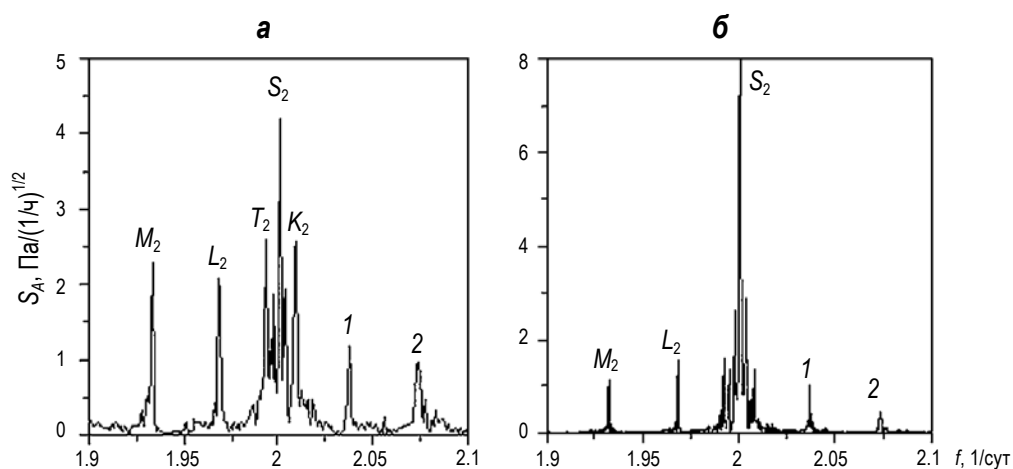


**Рис. 6.** Выделение центрального и боковых колебаний в случае амплитудной модуляции приливной волны  $S_1$ , в условиях Москвы (а) и Геофизической обсерватории “Михнево” (б). Комментарии к обозначению волн см. в тексте

Выделенные в спектре микропульсаций атмосферного давления пики с частотами  $\sim 0.997$  и  $\sim 1.027$  1/сут, которые отождествляются соответственно с главной солнечной приливной волной  $P_1$  (период 1.0027 сут) и лунно-солнечной деклинационной волной  $K_1$  (период 0.997 сут), равноотстоят от пика суточной волны термического прилива  $S_1$  на  $\sim 0.0027$  1/сут. Суперпозиция центрального и двух боковых колебаний характеризует модуляцию амплитуды суточных колебаний с периодом около 1 г.

Одновременно с этим в спектрах существуют пики с частотой  $\sim 0.994$  1/сут (период  $\sim 1.005$  сут) и  $\sim 1.0054$  1/сут (период  $\sim 0.994$  сут). Это приливные волны  $\phi_1$  и  $\pi_1$ , которые возникают в результате модуляции суточных колебаний атмосферного давления полугодовым периодом (182 сут). В результате модуляции суточных колебаний атмосферного давления третьгодовым периодом имеются также пики с частотами  $\sim 0.9918$  1/сут (пик 1 на рис. 6) и  $\sim 1.0082$  1/сут (пик 2 на рис. 6), которые равноотстоят от волны  $S_1$  на 0.0082 1/сут, что соответствует периоду модуляции 122 сут.

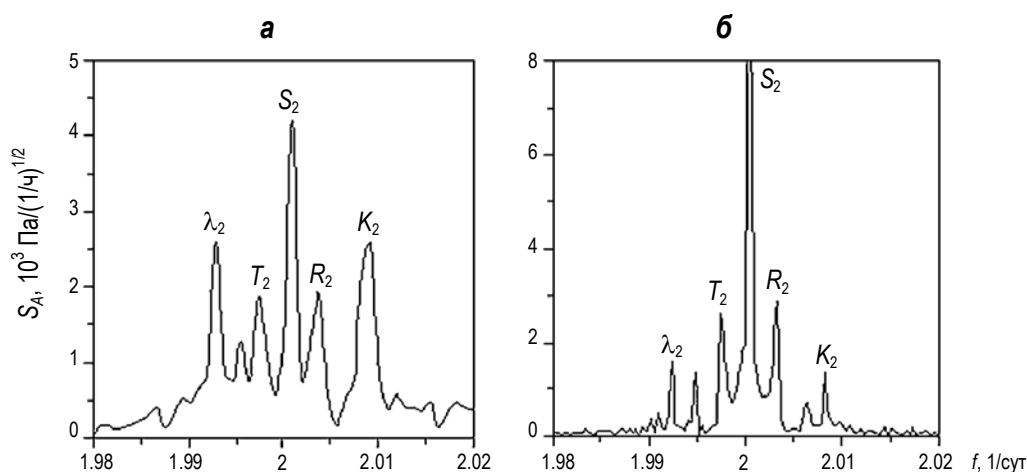
Проанализируем спектры полусуточных вариаций микропульсаций атмосферного давления, приведенные на рис. 7. На спектрах отчетливо выделяются пять основных пиков – центральный с частотой 2 1/сут (волна  $S_2$  с периодом 0.5 сут) и две пары боковых



**Рис. 7.** Выделение центрального и боковых колебаний в случае амплитудной модуляции приливной волны  $S_2$ , в условиях Москвы (а) и Обсерватории “Михнево” (б)

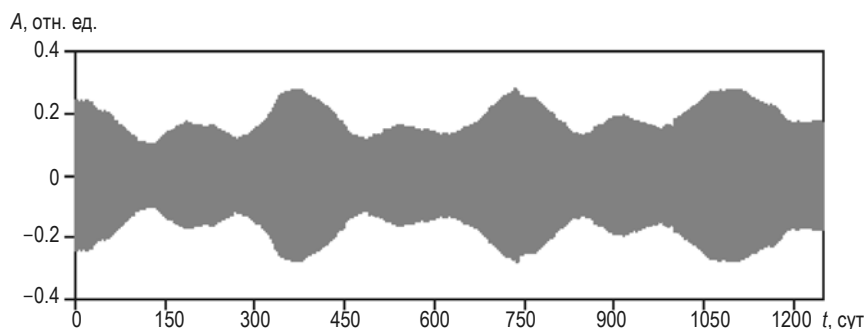
пиков. Первая пара – пик, соответствующий волне  $L_2$  (период  $\sim 0.508$  сут; частота  $\sim 1.968$  1/сут), и пик  $I$  (период  $\sim 0.492$  сут; частота  $\sim 2.03$  1/сут), которые равноудалены от центрального пика  $S_2$  на  $\sim 0.03$  1/сут. Вторая пара – пик, соответствующий волне  $M_2$  (период  $\sim 0.5175$  сут; частота  $\sim 1.932$  1/сут) и пик  $2$  (период  $\sim 0.482$  сут; частота  $\sim 2.069$  1/сут), удаленные от центрального пика примерно на  $0.068$  1/сут. Первая пара соответствует модуляции с периодом  $\sim 27.55$  сут, вторая – с периодом  $\sim 13.66$  сут.

Группа вблизи центрального пика на рис. 7 включает пять основных пиков, которые отчетливо прослеживаются одновременно на Обсерватории “Михнево” и в Москве (рис. 8). В центре находится пик, соответствующий приливной волне  $S_2$ ; две пары боковых пиков отстоят от  $S_2$  на  $\sim 0.0028$  1/сут (волны  $R_2$  и  $T_2$ ) и на  $0.0055$  1/сут (волны  $K_2$  и  $\lambda_2$ ). Можно считать, что приливные волны  $R_2$  и  $T_2$  являются следствием модуляции  $S_2$  с периодом около 1 года, а приливные волны  $K_2$  и  $\lambda_2$  соответствуют полугодовому периоду модуляции.



**Рис. 8.** Выделение центрального и боковых колебаний в случае амплитудной модуляции приливной волны  $S_2$  длиннопериодными колебаниями по данным Центра мониторинга (а) и Обсерватории “Михнево” (б)

Пример амплитудно-модулированного колебания, образованного волнами  $S_1$ ,  $P_1$ ,  $K_1$ ,  $\pi_1$  и  $\varphi_1$ , приведен на рис. 9. Из соотношения амплитуд названных волн следует, что глубина модуляции  $S_1$  годовым периодом равна  $m \sim 0.9$ , а полугодовым –  $m \sim 0.2$ . Для волн  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $R_2$ ,  $T_2$  и  $\lambda_2$  соответствующие величины модуляции оцениваются как  $\sim 0.5$  и  $\sim 0.15$ .

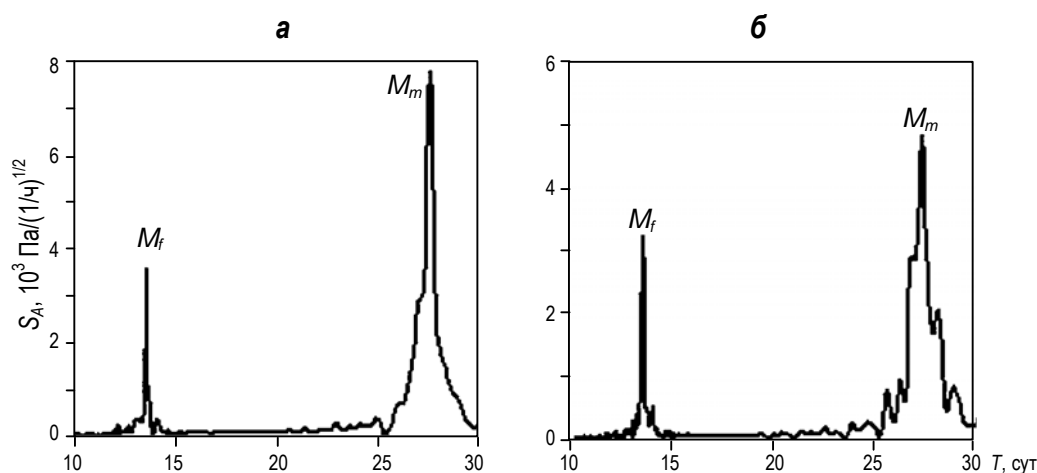


**Рис. 9.** Геофизическая обсерватория “Михнево”. Пример амплитудно-модулированного колебания, образованного волнами  $S_2$ ,  $P_1$ ,  $K_1$ ,  $\pi_1$  и  $\varphi_1$

С точки зрения возможной модуляции приливных колебаний в атмосфере представляет интерес рассмотрение других групп спектральных пиков. В частности, анализ спектра суточных вариаций свидетельствует о наличии двух пар боковых пиков. Первая пара – пики с периодами 1.0342 сут и 0.9624 сут, которые удалены от центрального пика  $S_1$  соответственно на 0.0342 сут (волна  $M_1$ ) и 0.0376 сут (волна  $J_1$ ). Вторая пара – пики с периодами 1.0759 сут (волна  $O_1$ ) и 0.9294 сут (волна  $OO_1$ ), удаленные от центрального пика  $S_1$  на 0.0758 и 0.0706 сут.

Таким образом, с учетом неопределенности оценки спектров волны  $M_1$  и  $J_1$  могут с приемлемой для практики точностью рассматриваться в качестве боковых частот амплитудно-модулированного колебания с периодом модуляции 27.554 сут, а волны  $O_1$  и  $OO_1$  – боковых частот амплитудно-модулированного колебания с периодом модуляции 13.66 сут.

Анализ результатов регистрации показывает, что в спектрах вариаций атмосферного давления присутствуют хорошо выделяемые приливные волны больших периодов  $M_m$  ( $T=27.55$  сут) и  $M_f$  ( $T=13.66$  сут). Результаты спектральных оценок в виде периодограммы для  $T=10$ –30 сут представлены на рис. 10.



**Рис. 10.** Периодограмма вариаций атмосферного давления в области периодов 13 и 27 сут на Обсерватории “Михнево” (а) и в Москве (б)

### Заключение

Приводимые данные свидетельствуют о сложности полномасштабного выделения около- и полусуточных групп приливных волн в атмосфере на основе анализа вариаций атмосферного давления, несмотря на достаточно длинный ряд наблюдений.

Предложенный подход, основанный на анализе вариаций атмосферного давления с помощью адаптивных режекторных фильтров, позволяет выделять практически все известные приливные волны.

Оценка спектральных характеристик вариаций атмосферного давления за длительный период наблюдений с помощью адаптивных режекторных фильтров показывает, что суточные и полусуточные гармоники вариаций атмосферного давления сопровождаются боковыми равноудаленными спектральными линиями, что является прямым указанием на модуляцию указанных спектральных составляющих. Периоды модуляции соответствующих приливных волн составляют около 14 сут, 27 сут, треть года, полгода и год.

Глубина модуляции приливной волны  $S_1$  годовым периодом составляет около 0.9, полугодовым –  $\sim 0.2$ . Для приливных волн  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $R_2$ ,  $T_2$  и  $\lambda_2$  соответствующие величины модуляции оцениваются как  $\sim 0.5$  и  $\sim 0.15$ .

Результаты настоящей работы, по мнению авторов, могут быть востребованы при построении общей модели атмосферы Земли и установлении основных закономерностей атмосферных движений.

Исследования выполнены в соответствии с Государственным заданием (тема 0146-2015-0015) при поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН IV.8 “Комплексные исследования по актуальным проблемам наук о Земле” (проект 0146-2015-0011) в части обработки данных инструментальных наблюдений.

### Литература

- Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ, 1996. 188 с.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // Физика Земли. 2012. № 2. С.14–26.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Инструментальные наблюдения приливных волн в атмосфере // Докл. РАН. 2016. Т. 469, № 3. С.343–346.
- Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С.108–120.
- Гарецкий Р.Г., Добролюбов А.И. Приливные дискретно-волновые движения и дрейф континентов // Геотектоника. 2006. № 1. С.3–13.
- Голицын Г.С. Природные процессы и явления: волны, планеты, конвекция, климат, статистика. М.: Физматлит, 2004. 344 с.
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами // Докл. РАН. 1995. Т. 340, № 3. С.386–388.
- Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972. 816 с.
- Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. М.: Недра, 1985. 400 с.
- Каула К. Введение в физику планет земной группы. Пер. с англ. под ред. Н.П. Грушинского и В.Н. Жаркова. М.: Мир, 1971. 536 с.
- Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
- Ржонсницкий В.Б. Приливные движения. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 244 с.
- Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Евменов В.Ф. Инфразвуковая система регистрации акустико-гравитационных волн // Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2005. С.29–33.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.В., Цыплаков В.В. Лунно-солнечные приливные периодичности в линиях спектров временных вариаций высокочастотных микросейсм // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252, № 2. С.577–579.
- Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука. 2002. 384 с.
- Сидоренков Н.С. Тонкая структура временных вариаций атмосферного давления // Труды Гидрометцентра России. 2008. Вып. 342. С.177–186.
- Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменения погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14, № 3. С.5–26.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. 2004. № 7. С.35–49.
- Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рябова С.А., Харламов В.А. Синхронизм вариаций геофизических полей в приповерхностной зоне Земли // Триггерные эффекты в геосистемах. Вып. III. М.: ГЕОС, 2015. С.310–317.

- Тихонов Н.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
- Уидроу Б., Гловер Д.Р., Макул Д.М. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1975. Т. 63, № 12. С.69–98.
- Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
- Чепмен С., Линдзен Р. Атмосферные приливы. М.: Мир, 1972. 295 с.
- Covey C., Dai A., Lindzen S., March D.R. Atmospheric tides in the latest generation of climate models // J. Atm. Sci. 2014. V. 71. P.1905–1913.
- Zurbenko I.G., Potrzeva A.L. Tidal waves in the atmosphere and their effects // Acta geophysica. 2009. V. 58, N 2. P.356–373.

### Сведения об авторах

**АДУШКИН Виталий Васильевич** – академик РАН, научный руководитель, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7 (495) 939-79-78. E-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru

**СПИВАК Александр Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией приповерхностной геофизики, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-91. E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru

**РЫБНОВ Юрий Сергеевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-91. E-mail: rybnov@idg.chph.ras.ru

**ХАРЛАМОВ Владимир Александрович** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-91. E-mail: kharlamov@idg.chph.ras.ru

## TIDAL WAVES AND PRESSURE VARIATIONS IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

V.V. Adushkin, A.A. Spivak, Yu.S. Rybnov, V.A. Kharlamov

*Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The results of instrumental observations carried out at the geophysical observatory “Mikhnevo” and in the Center of geophysical monitoring, Institute of Geosphere Dynamics, RAS, Moscow during 2008–2015 are analyzed. The purpose of observations was to investigate the influence of the lunar-solar tide on the atmospheric pressure variations.

Atmospheric pressure variations were recorded at the frequency range of  $10^{-4}$ – $10^2$  Hz. Their spectral characteristics were estimated on the basis of the parametric autoregression method. The narrowband adaptive band-stop filters were applied for more qualitative separation of tidal waves with close periods. As a result of data processing, the basic tidal waves with diurnal and semi-diurnal periods were distinguished.

Diurnal and semi-diurnal harmonics of atmospheric pressure variations are accompanied by side equidistant spectrum lines, which directly confirm the modulation of these spectral components. The modulation periods of corresponding tidal waves are about 13.6 and 27.5 days, as well as 1/3, 1/2, and 1 year. The modulation depth of the tidal wave  $S_1$  by the annual harmonic is about 0.9 and by the semi-annual is about 0.2. For the tidal waves  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $R_2$ ,  $T_2$ , and  $\lambda_2$ , it can be estimated as  $\sim 0.5$  and  $\sim 0.15$  accordingly.

**Keywords:** instrumental observations, atmospheric pressure, lunar-solar tide, tidal waves in atmosphere.

## References

- Adushkin V.V. and Spivak A.A. Effects of lunar-solar tides in the variations of geophysical fields at the boundary between the Earth's crust and the atmosphere, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2012, vol. 48, no. 2, pp.104-116.
- Adushkin V.V. and Spivak A.A. *Fizicheskie polya v pripoverkhnostnoi geofizike* (Physical fields in the near-surface geophysics), Moscow: GEOS, 2014.
- Adushkin V.V., Ovtchinnikov V.M., Sanina I.A., and Riznichenko O. Yu. Mikhnevo: from seismic station N 1 to a modern geophysical observatory, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 105-116.
- Adushkin V.V., Spivak A.A., and Kharlamov V.A. Results of instrumental observations of tidal wave propagation in the atmosphere, *Doklady Earth Science*, 2016. vol. 469, part 1, pp. 758-761.
- Avsuk Yu.N. *Prilivnye sily i prirodnye protsessy* (Tide forces and natural processes), Moscow: OIFZ, 1996.
- Chapman S., Lindzen R.S. *Atmospheric tides*, Gordon and Breach, New-York, 1970.
- Covey C., Dai A., Lindzen S., and March D.R. Atmospheric tides in the latest generation of climate models, *J. Atm. Sci.*, 2014, vol. 71, pp. 1905-1913.
- Garetskiy R.G. and Dobrolubov A.I. Tidal discrete-wave motions and continental drift, *Geotectonics*, 2006, vol. 40, no. 1, pp. 1-10.
- Golitsyn G.S. *Prirodnye protsessy i yavleniya: volny, planety, konvektsiya, klimat, statistika* (Natural processes and phenomena: waves, planets, convection, climate, statistics), Moscow: FIZMATGIZ, 2004.
- Gordeev E.I., Saltykov V.A., Sinitsin V.I., and Chebrov V.N. On the question concerning relation between high-frequency seismic noise and lunar-solar tides, *Doklady Earth Science*, 1995. vol. 340, part 3, pp. 386-388.
- Kanasevich E.R. *Analiz vremennykh posledovatel'nostei v geofizike* (Analysis of the temporal consecutions in the geophysics), Moscow: Nedra, 1985.
- Kaula W. *An introduction to planetary physics. The terrestrial planets*, New York: Wiley, 1968.
- Marple S. L. *Digital spectral analysis: with applications*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.
- Melchior P. *The Earth tides*, Oxford: Pergamon Press, 1966.
- Rzhonsnitskii V.B. *Prilivnue dvizheniya* (Tidal motion), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979.
- Rybnov Yu.S. and Kharlamov V.A. Infrasonic system for acoustic-gravitation waves recording. *Dinamicheskie processy v sisteme vnutrennih i vneshnih vzaimodeystvuyuschih geosfer* (Dynamic processes in the system of external and internal interacting geospheres), Moscow, GEOS, 2005. str. 29-33.
- Rykunov L.N., Khavroshkin O.V., and Tsyplakov V.V. Periodicity in the time-spectral variations of high-frequency microseisms caused by solar-lunar tides, *Doklady Acad. Nauk SSSR*, 1982, vol. 252, pp. 577-580.
- Sidorenkov N.S. *Fizika nestabilnostey vrascheniya Zemli* (Physics of instabilities of Earth rotation), Moscow: Nauka, 2002.
- Sidorenkov N.S. Fine structure of variations in the atmospheric pressure, *Trudy Gidromettsentra Rossii* (Proc., Hydrometeorological Centre of Russia), 2008, no. 342, pp. 177-186.
- Sidorenkov N.S. Celestial-mechanical factors of the weather and climate change, *Geofizicheskie processy i biosfera* (Geophysical processes and biosphere), 2015, vol. 14, no. 3, pp. 5-26.
- Spivak A.A. and Kishkina S.B. The use of microseismic background for the identification of active geotectonic structures and determination of geodynamic characteristics, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2004, vol. 40, no. 7, pp. 573-586.
- Spivak A.A., Koktev D.N., Riabova S.A., and Kharlamov V.A. Synchronous variations in geophysical fields in near-surface zone of the Earth, *Trigernye efekty v geosistemakh* (Trigger effects in geosystems), Moscow: GEOS, 2015, pp. 310-317.
- Tihonov N.N. and Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* (Solutions of ill-posed problems), Moscow: Nauka, 1979.
- Widrow B, Glover D.R., and Makul D.M. Adaptive noise compensators. Principles of construction and application, *TIHER* (Proc. Inst. Eng. Electrotech. Radioelectron.), 1975, vol. 63, no. 12, pp. 69-98.
- Widrow B. and Stearns S. *Adaptive signal processing*, Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1985.
- Zernov N.V. and Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepei* (Theory of the radiotechnical circuits), Leningrad: Energiya, 1972.
- Zurbenko I.G. and Potrzeva A.L. Tidal waves in the atmosphere and their effects, *Acta geophysica*, 2009, vol. 58, no. 2, pp. 356-373.