

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ**Периодические колебания погоды и климата****В.В. Иванов**

Значительная доля вариаций метеорологических параметров обусловлена периодическими процессами и может быть предсказана на несколько лет вперед. Многие из процессов связаны с астрономическими факторами, гравитационным действием Луны и Солнца и модуляцией излучения Солнца действием Луны и планет. Наибольшее влияние оказывают Луна, Юпитер и Венера. Следствием является линейчатая структура спектров. Линии спектра появляются на комбинациях обертонов частот вращения планет, Земли и Луны вокруг Солнца и Луны вокруг Земли. Из-за различий частот вращательных и радиальных движений появляется тонкая структура линий, которая сводится к трем эффектам: расщеплению линий, усложнению контура линий, связанной с радиальными колебаниями, появлению дополнительных линий на комбинациях частоты радиальных колебаний и обертонов частоты возмущения.

PACS numbers: 92.10.Hm, 92.60.We, 92.70.Gt

Содержание

1. Введение (777).
2. Критерий существования линии спектра (778).
 - 2.1. Критерий когерентности.
 - 2.2. Апробация критерия на надежно интерпретированных максимумах.
 - 2.3. Линии спектров вариаций уровня моря на частоте вращения Луны.
3. Сопоставление линий спектров вариаций различных метеорологических параметров (782).
 - 3.1. Линии спектров атмосферного давления, температуры воздуха и уровня моря в диапазоне периодов от 63 до 20 дней.
 - 3.2. Сопоставление спектральных амплитуд различных метеорологических параметров.
4. Происхождение периодических вариаций уровня моря, атмосферного давления и температуры в диапазоне периодов 10–60 дней (786).
 - 4.1. Введение.
 - 4.2. Генерация приливных волн в океане на характерных частотах движения Луны.
 - 4.3. Спектр модуляций солнечного излучения при затмениях.
 - 4.4. Сопоставление наблюдаемых линий и линий спектра затмений.
5. Влияние когерентных колебаний давления на формирование погоды (797).
 - 5.1. Прогноз развития вариаций.
 - 5.2. Тонкая структура спектрального максимума колебаний температуры атмосферы на периоде 1 сутки.
 - 5.3. Синоптическая изменчивость атмосферного давления и суточных вариаций температуры.
6. Периодические колебания климата (800).
 - 6.1. Водные замечания.
 - 6.2. Спектры вариаций уровня моря в диапазоне периодов от нескольких месяцев до нескольких лет.

В.В. Иванов. Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
693002 Южно-Сахалинск, ул. Науки 5, Российская Федерация
Тел. (2422) 79-61-54
E-mail: VL-Ivanov@mail.ru

Статья поступила 29 января 2001 г.,
после доработки 20 октября 2001 г.

- 6.3. Спектры вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет.
 - 6.4. Спектральные пики приливных потенциалов планет Венера, Юпитер, Марс.
 - 6.5. Теория изменения потока солнечной энергии на Землю под действием движения планет.
 - 6.6. Модуляция частоты радиальных колебаний Земли.
 - 6.7. Анализ наблюдавшихся линий спектра вариаций уровня моря.
7. Заключение (810).
- Список литературы (811).

1. Введение

При исследовании эмпирических спектров на основе вычисления периодограмм по долговременным рядам температуры и давления атмосферы наблюдается чрезвычайная изрезанность кривых. Наблюдаемые максимумы принято считать ложными, связанными со специфическим свойством спектров. Исключением являются вариации уровня моря, многие элементы которых описываются как колебательный процесс [1]. Такой подход ограничивает использование наблюдений и является основанием известного предубеждения, что наблюдавшиеся вариации случайны, и это закон природы, а не естественное следствие неумения разобраться в сложных закономерностях [2]. Это предубеждение является основанием для представления результатов вычислений спектров с оценкой доверительных интервалов и сильным сглаживанием результатов вычисления [3]. Однако представление посредством модели случайного процесса малоинформативно. В физических измерениях спектры в подавляющем большинстве случаев содержат линейчатые структуры. Реально интерпретируемой величиной являются положения максимумов (спектры свечения) и минимумов (спектры поглощения). Интерпретация этих величин иногда является наиболее достоверным средством распознавания природы наблюданного явления.

Основу настоящего обзора составляет концепция [4, 5], связанная с периодичностью метеорологических параметров. Используя ее, мы выделяем особые свойства

спектра чисто периодического процесса и проверяем эти свойства на конкретных примерах. Наличие таких свойств естественно назвать *критерием существования линии спектра*.

Далее сопоставляются положения линий для спектров вариаций различных физических характеристик, например максимумы спектров вариаций атмосферного давления и уровня моря. Факт обнаружения линий на одних и тех же частотах служит свидетельством того, что они имеют одинаковое происхождение.

Следующим этапом является исследование индуцированных колебаниями явлений. Например, чисто периодические колебания атмосферного давления с периодом в несколько недель должны приводить к появлению тонкой структуры суточного пика колебаний температуры. Эта тонкая структура — линия на комбинационной частоте, равной сумме частоты суточных колебаний и частоты обнаруженного колебания атмосферного давления. Обнаружение такой линии является свидетельством в пользу реальности существования самого колебания.

Концепция периодичности метеорологических параметров подтверждается конкретными примерами. В обзоре использованы три таких примера. Первый — это исследование вариаций атмосферной температуры вследствие затмения Солнца Луной. Затмение — сложный колебательный процесс. Спектр затмений носит линейчатый характер. Совпадение обнаруженных линий с линиями спектра затмений и качественное совпадение оценок интенсивности линий также свидетельствует в пользу реальности обнаруженных ниже периодических процессов. Второй пример — это исследование тонкой структуры спектральных линий колебаний уровня моря на периодах вращения Луны. Тонкая структура возникает как следствие частотной модуляции колебаний расстояния от Луны до Земли, обусловленной гравитационным действием Солнца. Она приводит к характерному расщеплению самой линии и к появлению дополнительных интенсивных линий на комбинациях частоты радиальных колебаний и частоты вращения Земли вокруг Солнца. Третий пример — это модуляция потока солнечного свечения колебаниями положения Земли относительно эллиптической орбиты, связанными с действием Юпитера и Венеры. Последние явления ранее не были обнаружены вследствие недостаточного частотного разрешения при вычислении спектров метеорологических параметров [6]. Обратим внимание на аналогию развивающейся здесь концепции с теорией приливов [7].

С нашей точки зрения, суммы приведенных аргументов достаточно, чтобы считать достоверным фактом обнаруженную линейчатую структуру спектров вариаций атмосферной температуры и атмосферного давления и использовать это свойство для решения важной задачи долговременного прогноза погоды и климата. Дело в том, что линейчатая структура с очень узкими спектральными линиями содержит значительную долю "математической" энергии реальных колебаний, и прогноз, основанный на предварительном вычислении параметров линий, не дает существенных сбоев в течение примерно 4-х лет при прогнозе погоды и в течение 20-ти лет при прогнозе вариаций климата. Такой прогноз представляет определенную ценность, что определяет практическую значимость результата. Ретроспективные иллюстрации таких прогнозов показаны в работе.

Работа опирается на построение спектров Фурье по дискретному набору данных (периодограмм). Численные методы и программное обеспечение вычислений хорошо развиты [8, 9]. В литературе [10] подробно проанализированы возможные ошибки и опубликованы тексты программ. Сами программы включены в известные пакеты обработки информации MAPLE 6 [11], MATHLAB [12], МАТЕМАТИКА 4 [13].

2. Критерий существования линии спектра

2.1. Критерий когерентности

В настоящем разделе представлено обсуждение возможности обнаружения линейчатой структуры спектра при обработке временных рядов, заданных в дискретной последовательности точек. При поиске спектральных максимумов и минимумов существующие методы оценки спектров не являются оптимальными. Если следовать основной идеи интерпретации информации в записях временных последовательностей $y(t)$ [14], то в случае периодического процесса оцениваемыми величинами являются частота и фаза колебаний, оптимальной статистикой наблюдения, содержащей всю информацию записи, является величина спектра

$$Sy(\omega) = \left| \int_0^T y(t) \exp(i\omega t) dt \right|^2 \quad (1)$$

(T — полная длительность наблюдения), оценками частоты ω и фазы являются положение максимума и фаза спектра в максимуме [14].

В случае оценки спектральной плотности случайного процесса [15] для оптимальной оценки процесс разбивается на несколько (N) независимых реализаций длительностью T_1 (T/N), для каждой из которых строится величина квадрата спектра

$$Si(\omega) = \left| \int_{(i-1)T_1}^{iT_1} y(t) \exp(i\omega t) dt \right|^2.$$

Оптимальной оценкой является величина

$$A = \frac{1}{T} \sum Si. \quad (2)$$

Точность оценки определяется количеством N независимых реализаций и увеличивается с ростом N . Удовлетворительная точность получается при значениях $N > 10$. При этом величина разрешения по частоте $\delta\omega$ становится значительно хуже:

$$\delta\omega = \frac{\pi}{T_1} = \frac{\pi N}{T}.$$

В метеорологических работах используется оценка спектральной мощности, которая обычно называется спектром. В настоящей работе вычисляется спектр, который рассматривается как статистика обнаружения периодичности, и для его оценки используется (1). Величина спектра существенно зависит от длительности интервала наблюдения T . Если процесс чисто периодический, то амплитуда квадрата при больших значениях T растет с увеличением длительности интервала наблюдения как T^2 . Если процесс случайный, то величина спектра

также растет с увеличением T , однако этот рост значительно медленнее $\sim T$. Анализ зависимости от длительности величины максимума может позволить отличить периодические компоненты от максимумов спектральной плотности случайного сигнала. Он используется ниже как критерий проверки на периодичность (когерентность).

Ниже данный критерий иллюстрируется на материалах наблюдения сезонных вариаций метеорологических характеристик (когерентные колебания с периодом 1 год и на высших гармониках этого периода). Этот критерий используется для проверки когерентности колебаний метеорологических характеристик на периодах, связанных с вращением Луны. Такие колебания известны в случае колебаний уровня моря [16], однако они не были обнаружены при исследовании вариаций атмосферного давления и температуры.

В качестве материала наблюдения использованы записи вариаций атмосферного давления и температуры воздуха в точке Терней ($45,1^{\circ}\text{N}$, $136,5^{\circ}\text{E}$) и измерения вариаций уровня в точке Холмск ($47,0^{\circ}\text{N}$, $142,0^{\circ}\text{E}$).

2.2. Апробация критерия

на надежно интерпретированных максимумах

Для иллюстрации возможности использовать оценку зависимости амплитуды спектральной линии от длительности интервала наблюдения как критерий, различающий когерентные и некогерентные максимумы спектра, мы рассматриваем вариации атмосферного давления с периодом 1 год. Этот максимум описывает известные когерентные сезонные вариации атмосферного давления.

В качестве примера использованы наблюдения в точке Терней с 1966 г. по 1984 г. Наблюдения представляются как ряд последовательных значений с интервалом в 3 ч. При вычислении спектра в окрестности периода 1 год по этим данным построены суточные значения, и для устранения эффекта обрывания ряда из суточных значений предварительно вычитался результат сглаживания по интервалу в 700 дней. Спектры вычислялись по интервалу в 1 год (1966 г.), 2 года (1966–1967 гг.), 4 года (1966–1969 гг.), 6 лет (1966–1971 гг.), 8 лет (1966–1973 гг.), 10 лет (1966–1976 гг.), 12 лет (1966–1977 гг.), 14 лет, 16 лет и 18 лет. Данные выводились с различными интервалами по частоте. На рисунке 1а показаны результаты вычислений с интервалом по частоте $\pi/500$ день $^{-1}$.

В окрестности периода 1 год наблюдается отчетливый максимум, амплитуда которого существенно зависит от длительности T участка наблюдения. Зависимость показана на рис. 1в (линия 2). Случай когерентного и некогерентного происхождения линии различаются наклоном линии, для некогерентного случая наклон показан линией R , для когерентного — линией C . Видно, что линия 2 далека от теоретических ожиданий для обоих случаев. При увеличении длительности ряда наблюдений происходит изменение положения максимума и скачок амплитуды при длительности в 8 лет. Эта особенность вычислений — немонотонная зависимость амплитуды спектра от интервала наблюдения — встречается достаточно часто и служит основанием рассматривать максимум как случайный элемент. Фактически это — непосредственное следствие недостаточной подробности вывода данных. Истинный период попадает в промежуточную точку. Для иллюстрации этого положе-

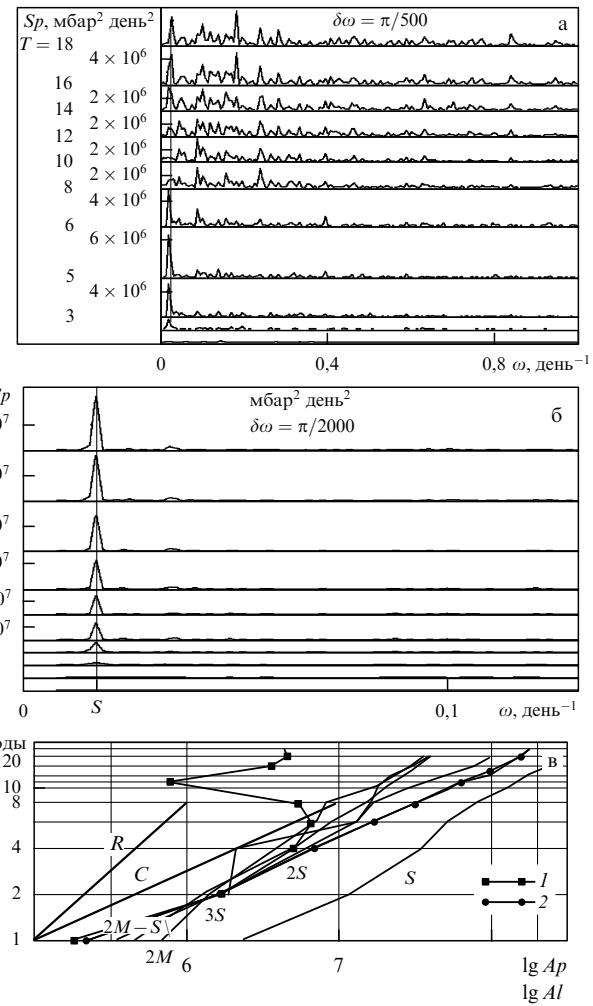


Рис. 1. Спектры атмосферного давления в точке Терней Sp , построенные по записям различной длительности T с разрешением по частоте $0,00628$ день $^{-1}$ (а) и частоте $0,00157$ день $^{-1}$ (б). Длительность T показана рядом с соответствующей линией. Частота ω в день $^{-1}$. (в) Зависимость амплитуды Ap спектрального максимума вариаций атмосферного давления на периоде 1 год от длительности интервала наблюдения T при различных интервалах разрешения по частоте: 1 — разрешение $0,00157$; 2 — разрешение $0,00628$. Зависимость амплитуды спектральных максимумов вариаций уровня моря Al от длительности интервала наблюдения. Показаны максимумы, соответствующие периодам 1 год (S), 0,5 года ($2S$), 0,333 года ($3S$), 13,66 дня ($2M$) и 14,17 дней ($2M-S$). Линии C и R показывают наклоны зависимостей для случаев когерентного и некогерентного спектров.

ния те же спектры вычислены с увеличением разрешения по частоте $\delta\omega$ (линия 1). Использованы значения $\delta\omega = \pi/2000$ и $\delta\omega = \pi/4000$. Зависимости амплитуды максимума от длительности приведены на рис. 1в. В данном случае положение максимума стабильно, зависимости практически одинаковы для обоих случаев и практически точно соответствуют теоретической зависимости для когерентного происхождения линии.

Таким образом, при выявлении линейчатой структуры спектра необходимо обеспечить достаточно подробный вывод данных — достаточно высокое разрешение по частоте. Предельная оценка такого разрешения $\delta\omega = \pi/T$. Однако, как видно из наших вычислений, обычно достаточно использовать меньшее разрешение.

Таблица 1. Параметры главных максимумов спектра вариаций уровня моря в точке Холмск

год	<i>S</i>		2 <i>S</i>		3 <i>S</i>		2 <i>M</i>		2 <i>M</i> – <i>S</i>	
	день	см ² день ⁻²	день	см ² день ⁻²	день	см ² день ⁻²	день	см ² день ⁻²	день	см ² день ⁻²
1	381	$2,3 \times 10^6$			117	$6,9 \times 10^5$	13,5	$3,4 \times 10^5$	14,3	$4,5 \times 10^5$
2	381	$1,2 \times 10^7$	210	$1,9 \times 10^6$	125	$1,4 \times 10^6$	13,6	$1,6 \times 10^6$	14,2	$1,3 \times 10^6$
4	381	$3,5 \times 10^7$	186	$2,1 \times 10^6$	121	$3,9 \times 10^6$	13,6	$6,2 \times 10^6$	14,2	$5,0 \times 10^6$
6	364	$5,2 \times 10^7$	182	$1,3 \times 10^7$	121	$7,3 \times 10^6$	13,65	$1,3 \times 10^7$	14,2	$9,1 \times 10^6$
8	364	$7,9 \times 10^7$	182	$1,7 \times 10^7$	121	$8,2 \times 10^6$	13,65	$1,6 \times 10^7$	14,2	$1,5 \times 10^7$
10	364	$1,3 \times 10^8$	182	$2,8 \times 10^7$	121	$1,7 \times 10^7$	13,65	$1,8 \times 10^7$	14,2	$2,0 \times 10^7$
12	364	$1,7 \times 10^8$	182	$4,8 \times 10^7$	121	$2,2 \times 10^7$	13,65	$2,2 \times 10^7$	14,2	$2,7 \times 10^7$
14	364	$2,3 \times 10^8$	182	$7,4 \times 10^7$	121	$3,0 \times 10^7$	13,65	$3,1 \times 10^7$	14,2	$3,3 \times 10^7$
16	364	$2,9 \times 10^8$	182	$1,0 \times 10^8$	121	$3,6 \times 10^7$	13,65	$3,9 \times 10^7$	14,2	$4,0 \times 10^7$

Существенно, чтобы величина была выведена при значении частоты, которое достаточно точно совпадает с истинным. Признаком правильно обнаруженного максимума является независимость его положения от длительности T при достаточно больших значениях T и достаточно быстрый рост амплитуды максимума. В данном случае для обнаружения периодичности практически достаточно наблюдений по интервалу в 4 года.

Второй пример достоверно изученных когерентных явлений — это вариации уровня моря с периодом 1 год и с периодом вращения Луны вокруг Земли [16]. Использованы записи в точке Холмск (Японское море) за период времени с 1951 г. по 1990 г. Запись представлена с интервалом 12 ч, выведены среднесуточные значения. Ряд суточных значений слажен по интервалу 700 сут, и результат слаживания вычен из исходного ряда. По остаточным значениям вычислен спектр. Значения выведены через интервал $\delta\omega = \pi/2000$ день⁻¹. Спектры вычислялись по интервалу в 1 год (1951 г.), 2 года (1951–1952 гг.), 4 года (1951–1955 гг.), 6 лет (1951–1956 гг.), 8 лет (1951–1958 гг.), 10 лет (1951–1960 гг.), 12 лет (1951–1962 гг.), 14 лет и 16 лет. По результатам определены положения и амплитуды отчетливо интерпретируемых главных максимумов. Это максимумы на частотах *S* (период в 1 год), *2S* (период 0,5 года), *3S* (период 1/3 года), *2M* (период 13,66 дней — половина тропического месяца), *2M*–*S* (период 14,17 дней — комбинация первой гармоники лунного вращения с сезонными колебаниями). Эти максимумы отчетливо разрешаются при использовании длительности наблюдения более двух лет. Параметры максимумов, период в днях и амплитуда в см² день⁻² приведены в табл. 1. Длительность интервала наблюдения в годах указана в первом столбце таблицы.

Зависимость амплитуды от длительности показана на рис. 1в. В общих чертах она также совпадает с ожидаемой для когерентного случая зависимостью $A \sim T^2$. Соотношения амплитуд осцилляций на частоте первой лунной гармоники *2M*, первой гармоники первой частоты обращения Земли вокруг Солнца *3S*, первой отрицательной комбинации первой гармоники *2M* и частоты обращения Земли вокруг Солнца *2M*–*S* более-менее согласуются с соотношением амплитуд ньютоновского приливного потенциала [7]. Комбинационная частота появляется в ньютоновском потенциале при построении суточных значений вследствие демодуляции сигнала на частоту суточного вращения Земли. Осцилляции с периодом в 1 год (*S*) и в 1/3 года также объяснены [17]. Это — следствие расширения воды при нагревании. Их ампли-

туды пропорциональны амплитудам первой и третьей солнечной гармоники вариаций атмосферного давления. Это же явление дает существенный вклад в амплитуду второй гармоники.

2.3. Линии спектров вариаций уровня моря на частоте вращения Луны

При анализе ньютоновского приливного потенциала, связанного с действием Луны, видно [7], что максимум на частоте основного тона (частоте вращения Луны) также должен наблюдаваться, однако соответствующий максимум в ε^2 раз меньше; ε — эксцентриситет лунной орбиты. Этот максимум описан в литературе [16], он имеет специальное обозначение *Mt*. Однако, в отличие от рассмотренных выше максимумов, его наблюдение на реальных спектрах не слишком убедительно. На рисунке 2а показан участок спектра в диапазоне частот от $2\pi/6$ до $2\pi/3$ (день⁻¹). Спектр построен по интервалу наблюдения 40 лет по записи вариаций уровня в точке Холмск и выведен с разрешением по частоте 10^{-4} день⁻¹. Отчетливо различимо большое количество максимумов, из которых только два (указаны стрелкой) приведены в таблице книги [16]. Детальная структура максимума *Mt* показана на рис. 2б. Главный максимум наблюдается не на частоте вращения Луны, а на частоте колебаний расстояния от Луны до Земли, как это и должно быть в соответствии с теорией Ньютона [7]. Период этих колебаний равен 27,55 дней и имеет специальное название — *аномалистический месяц*. На рисунке 2а видно, что это не единственный и не главный максимум в указанном диапазоне частот. Представляет интерес исследовать на когерентность и другие из наблюдавшихся максимумов, в частности максимумы на комбинациях частоты *Mt* с колебаниями с периодом 0,5 года (частота *2S*). Материалы исследования показаны на рис. 2в и 2г. На рисунке 2в показаны спектры колебаний уровня, вычисленные при различных временах наблюдения с разрешением по частоте, которое увеличивалось при увеличении интервала наблюдения. Рассматриваемые максимумы на комбинациях частот обозначены на рис. 2в как *M*–*2S* и *M*+*2S*. Эти частоты выделены на рисунке прямыми линиями. Интервалы наблюдений показаны цифрами рядом с соответствующей линией. Параметры этих максимумов и разрешение по частоте выписаны в табл. 2. Вариации амплитуды с длительностью в логарифмическом масштабе показаны на рис. 2г.

При длительности 12 лет наблюдается аномалия зависимости, характерная для оценок с недостаточным разрешением по частоте. Варианты для длительности

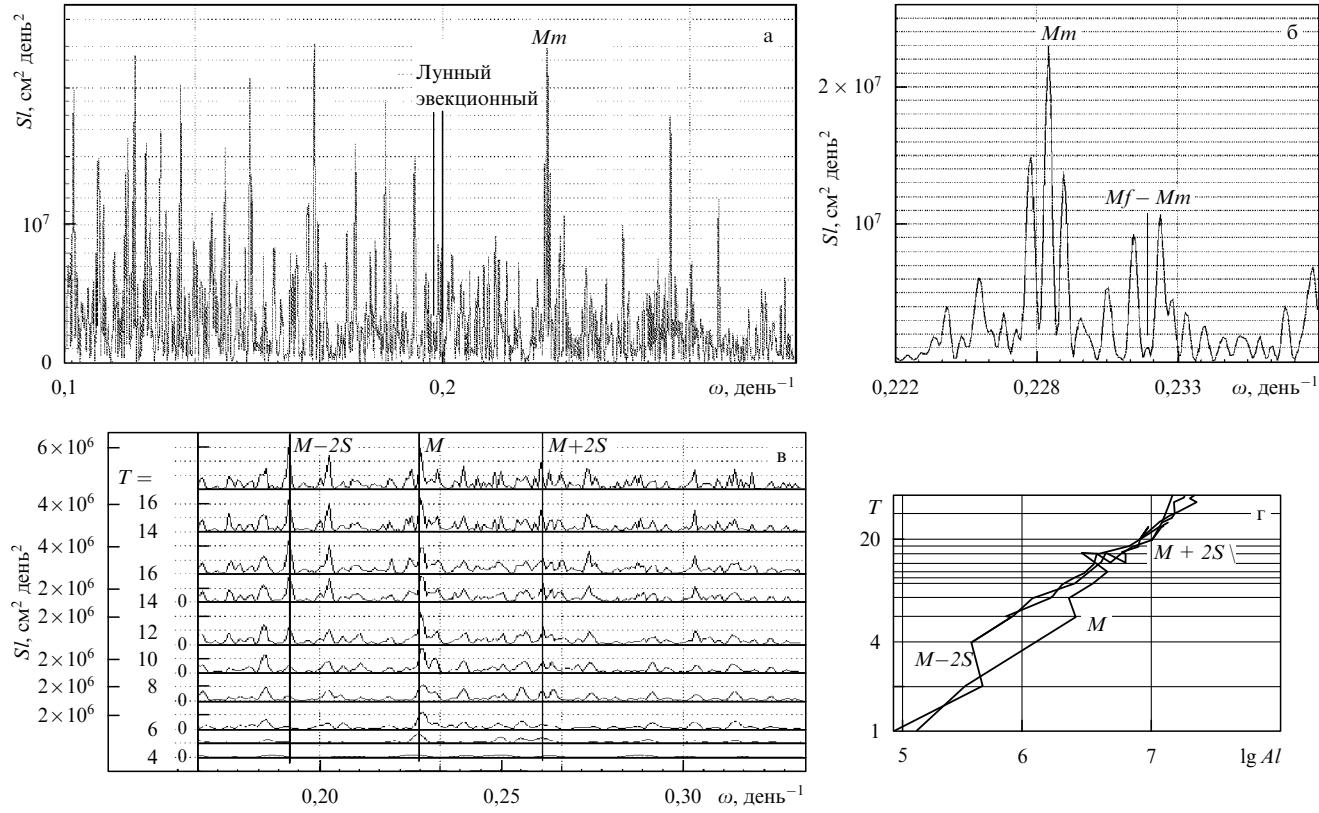


Рис. 2. (а) Спектр вариаций уровня в точке Холмск Sl : (а, б) по данным с 1950 г. по 1990 г.; частота ω в день^{-1} (показана окрестность максимума Mm (б)); (в) при различных длительностях T интервала наблюдения в окрестности частоты M вращения Луны вокруг Земли; частота ω в день^{-1} ; величина T (года) показана у линии; (г) зависимость амплитуды спектрального максимумов Al на частотах M , $M-2S$, $M+2S$ (абсцисса) от длительности наблюдения T в годах (ордината).

Таблица 2. Параметры максимумов спектров вариаций уровня моря на частоте лунного вращения M и комбинациях частот $M-2S$ и $M+2S$

Длина интервала (год)	Параметры линии $M-2S$: период (дни), амплитуда ($\text{см}^2 \text{день}^{-2}$)	Параметры линии M : период (дни), амплитуда ($\text{см}^2 \text{день}^{-2}$)	Параметры линии $M+2S$: период (дни), амплитуда ($\text{см}^2 \text{день}^{-2}$)	Разрешение (день^{-1})	
1	34	$1,13 \times 10^5$	27,39	$1,54 \times 10^5$	$7,84 \times 10^{-4}$
2	33,6	$3,1 \times 10^5$	27,7	$3,6 \times 10^5$	
4	33,7	$4,9 \times 10^5$	27,58	$1,3 \times 10^6$	10^5
6	32,9	$4,1 \times 10^5$	27,49	$2,58 \times 10^6$	
8	32,78	$8,3 \times 10^5$	27,49	$2,3 \times 10^6$	$24,02$ $7,4 \times 10^5$
10	32,78	$1,2 \times 10^6$	27,49	$3,43 \times 10^6$	$24,02$ $2,04 \times 10^6$
12	32,78	$2,5 \times 10^6$	27,58	$4,53 \times 10^6$	$24,02$ $3,13 \times 10^6$
14	32,78	$3,3 \times 10^6$	27,49	$3,68 \times 10^6$	$24,02$ $3,68 \times 10^6$
16	32,78	$4,1 \times 10^6$	27,49	$3,78 \times 10^6$	$24,02$ $2,9 \times 10^6$
14	32,41	$4,5 \times 10^6$	27,49	$4,83 \times 10^6$	$24,04$ $3,68 \times 10^6$
16	32,75	$6,3 \times 10^6$	27,49	$5,85 \times 10^6$	$24,04$ $3,8 \times 10^6$
16	32,68	$4,7 \times 10^6$	27,51	$5,85 \times 10^6$	$24,06$ $3,96 \times 10^6$
18	32,68	$5,6 \times 10^6$	27,51	$7,27 \times 10^6$	$24,06$ $6,6 \times 10^6$
20	32,68	$7,98 \times 10^6$	27,51	$1,01 \times 10^7$	$24,05$ $8,2 \times 10^6$
24	32,68	$1,14 \times 10^7$	27,51	$1,21 \times 10^7$	$24,04$ $9,5 \times 10^6$
20	32,68	$7,98 \times 10^6$	27,51	$1,02 \times 10^7$	$24,05$ $8,0 \times 10^6$
26	32,68	$1,35 \times 10^7$	27,51	$1,2 \times 10^7$	$24,04$ $1,14 \times 10^7$
28	32,66	$1,24 \times 10^7$	27,51	$1,44 \times 10^7$	$24,05$ $1,28 \times 10^7$
30	32,68	$1,28 \times 10^7$	27,53	$1,53 \times 10^7$	$24,04$ $1,56 \times 10^7$
36	32,66	$1,41 \times 10^7$	27,55	$2,24 \times 10^7$	$24,04$ $1,49 \times 10^7$
38	32,68	$1,43 \times 10^7$	27,55	$1,98 \times 10^7$	$24,04$ $1,78 \times 10^7$
40	32,68	$1,48 \times 10^7$	27,55	$2,29 \times 10^7$	$24,05$ $1,84 \times 10^7$

14 и 16 лет пересчитаны с большим разрешением. Однако это разрешение оказалось недостаточным для вычислений при больших длительностях. Эти вычисления проводились с дополнительным увеличением разрешения.

Характер зависимости от длительности наблюдения однозначно свидетельствует о когерентном возмущении уровня. Амплитуда этого возмущения значительно больше ожидаемой (в соответствии с теорией прили-

вов). Интенсивности линий $M - 2S$, M и $M + 2S$ примерно одинаковы. Они превосходят интенсивности линий $M - S$ и $M + S$, которые также наблюдаются достаточно отчетливо. Однако это не единственны линии в диапазоне циклических частот от 0,1 до 0,3 сут $^{-1}$. В этом диапазоне частот можно однозначно выделить еще 24 линии. Им соответствуют периоды: 1) 62,62; 2) 58,7; 3) 56,43; 4) 54,65; 5) 53,78; 6) 52,3; 7) 50,75; 8) 48,67; 9) 47,3; 10) 45,6; 11) 44,5; 12) 42,49; 13) 38,0; 14) 35,6; 15) 34,1; 16) 29,35; 17) 29,61; 18) 28,52; 19) 27,02; 20) 26,35; 21) 25,29; 22) 24,35; 23) 23,54; 24) 22,91 дней. Эти колебания ко-гентны и наблюдаются все 40 лет.

Таким образом, предложенный критерий, выделяющий спектральные линии, соответствующие чисто периодическим процессам, может быть использован для анализа. Его необходимо дополнить требованием на подробность вывода счетных точек. Именно, вследствие недостаточной подробности анализа возникают аномальные зависимости амплитуды линии от длительности, которые и вызывают недоверие к линейчатому представлению спектра. Однако не все аномалии зависи-мости обусловлены недостаточным разрешением по частоте. Некоторые из аномалий обусловлены тонкой структурой соответствующих пиков, которая отчетливо видна на рис. 2б. Видно, что пик Mt расщепляется на

три линии с расстоянием между линиями порядка 6×10^{-4} день $^{-1}$. Такое расщепление начинает замечаться на спектрах при длительности интервала наблюдения около 10 лет, при этом амплитуда главного пика уменьшается скачком примерно в 2 раза. Эта аномалия отчетливо видна на рис. 2г.

3. Сопоставление линий спектров вариаций различных метеорологических параметров

3.1. Линии спектров атмосферного давления, температуры воздуха и уровня моря в диапазоне периодов от 63 до 20 дней

Сопоставление спектральных амплитуд вариаций атмосферного давления и уровня моря используется для исследования природы вариаций [39]. Главный вопрос: где происходит генерация первоначально — в атмосфере или в океане? Выделение отдельных линий позволяет решать этот вопрос более детально и более точно, так как при вычислении обычных, сильно сглаженных спектров для анализа используются смешанные данные, содержащие несколько линий различной природы. Сам факт появления спектральных максимумов вариаций различных параметров на одной и той же частоте

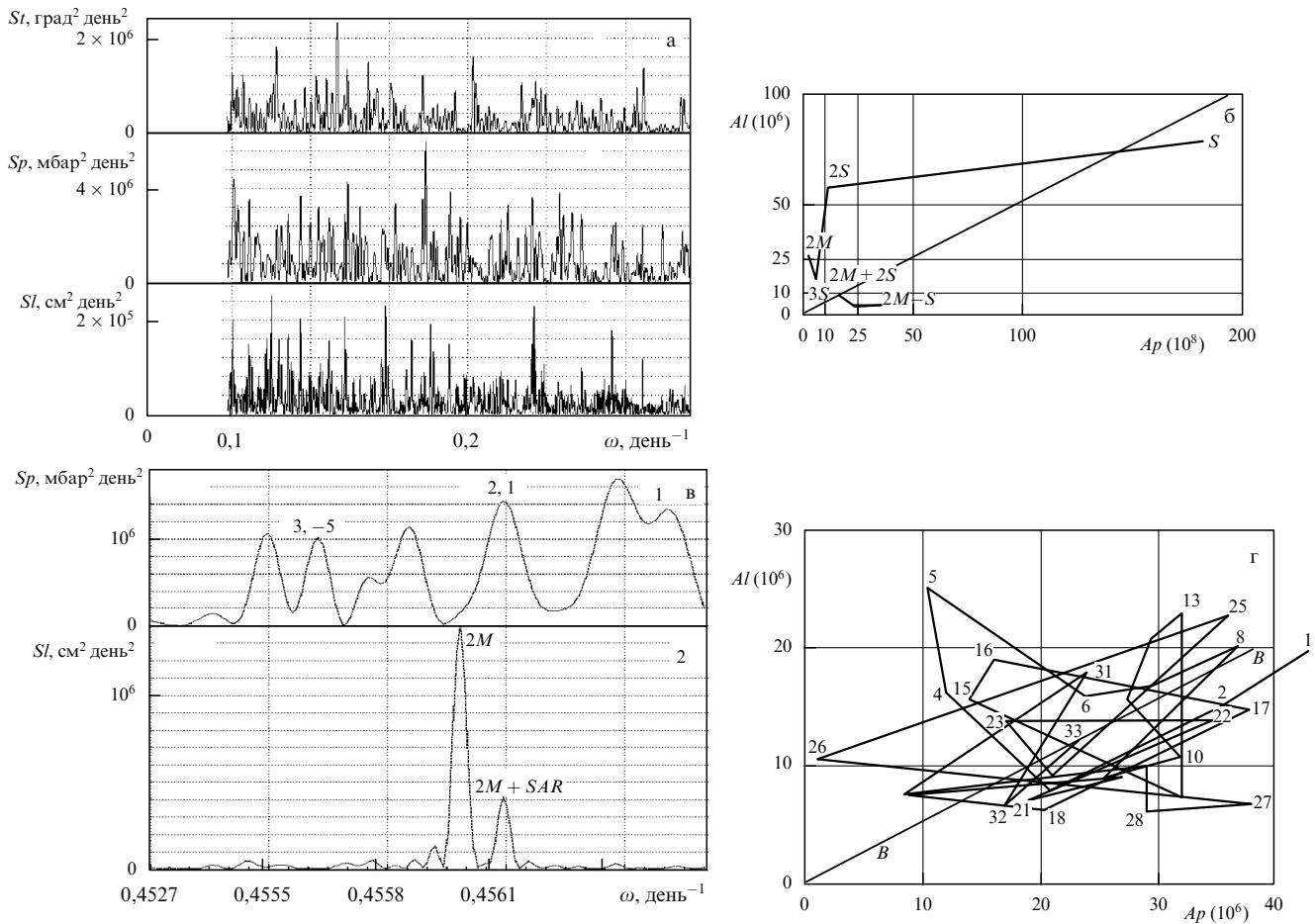


Рис. 3. (а) Спектры вариаций температуры воздуха St , атмосферного давления Sp и уровня моря Sl в диапазоне периодов от 62 до 20 дней. По оси абсцисс — частота ω в день $^{-1}$. (б) Соотношение амплитуд линий спектра атмосферного давления (Ap) и вариаций уровня (Al). (в) Тонкая структура линий $2M$ для спектра атмосферного давления Sp и вариаций уровня Sl . Частота ω в день $^{-1}$. (г) Соотношение амплитуд сопоставленных линий вариаций уровня Al и атмосферного давления Ap . Линия B — закон обратного барометра. Номера соответствуют табл. 3.

свидетельствует о физической реальности этих максимумов. Ниже этот факт иллюстрируется на материалах наблюдения спектров вариаций атмосферного давления, температуры воздуха и уровня моря в диапазоне периодов от 63 до 20 дней. Используются спектры, построенные по формуле (1) для материалов наблюдения атмосферного давления и температуры воздуха в точке Терней (с 1966 г. по 1984 г.) и материалов наблюдения вариаций уровня моря в точке Холмск (с 1951 г. по 1990 г.). В этом диапазоне периодов для уровня моря в литературе обсуждаются линии, соответствующие периоду колебаний расстояния от Луны до Земли (Mm , $T = 27,55$ дней) и лунному эвакционному периоду ($T = 31,812$ дней) [16, 7]. Остальные максимумы (рис. 2а) — интересное и не описанное явление. Источник этих детерминированных событий неизвестен.

Использованы данные наблюдения, представленные через интервал 3 ч. По данным построены суточные значения. Дальнейшая процедура построения спектра та же, что при оценке спектров вариаций уровня моря. На рисунке 3а эти спектры сравниваются друг с другом. Спектры выведены с разрешением по частоте $\delta\omega = 10^{-4}$ день⁻¹. Видно, что, как и в случае вариаций уровня моря (линия 3), на спектрах температуры (линия 1) и давления (линия 2) наблюдается большое количество максимумов, которые можно интерпретировать как линейчатую структуру. Положение некоторых

из этих максимумов с некоторой степенью точности совпадают с линиями спектра вариаций уровня моря. Характеристики этих линий (период и амплитуда) выписаны в табл. 3. По сравнению с приведенным выше списком линий вариаций уровня некоторые линии добавлены, так как эти линии отчетливо наблюдаются на спектрах вариаций давления. В первом столбце приведены порядковые номера линий, во втором и третьем столбцах — период и интенсивность линий спектра вариаций уровня, в четвертом и пятом столбцах — те же параметры линий вариаций атмосферного давления, в шестом и седьмом столбцах — параметры спектра вариаций температуры. Размерности спектров вариаций уровня — см² день⁻², давления — мбар² день⁻², вариаций температуры — град² день⁻².

Спектр вариаций уровня построен по периоду 40 лет, спектры атмосферного давления и температуры построены по интервалу времени 19 лет. Спектральные линии более четко выражены на спектре вариаций уровня. В основном в спектрах атмосферного давления и температуры воздуха выделены линии, сопоставляемые с максимумами спектра вариаций уровня. Как правило, большинству линий находится соответствие среди линий спектра вариаций атмосферного давления, но не все наблюдаемые линии атмосферного давления попали в число сопоставленных. В частности, максимальной линии спектра давления с периодом 34,46 дня с

Таблица 3. Параметры линий спектров вариаций уровня моря, атмосферного давления и температуры

№	Уровень моря		Атмосферное давление		Температура	
	Период (дни)	Амплитуда (см ² день ⁻²)	Период (дни)	Амплитуда (мбар ² день ⁻²)	Период (дни)	Амплитуда (град ² день ⁻²)
1	62,62	$1,98 \times 10^5$	62,43	$4,28 \times 10^6$	62,74	$1,26 \times 10^6$
2	58,7	$1,48 \times 10^5$	58,7	$3,48 \times 10^6$	58,55	$7,3 \times 10^5$
3	56,43	$8,01 \times 10^4$	56,43	$2,08 \times 10^6$	—	$4,7 \times 10^5$
4	54,65	$1,63 \times 10^5$	54,65	$1,2 \times 10^6$	54,65	$6,9 \times 10^5$
5	53,78	$2,52 \times 10^5$	—	$1,03 \times 10^6$	53,91	$7,6 \times 10^5$
6	52,3	$1,59 \times 10^5$	52,67	$2,38 \times 10^6$	52,78	$1,8 \times 10^6$
7	50,75	$1,69 \times 10^5$	50,75	$2,95 \times 10^6$	—	$3,2 \times 10^5$
8	48,67	$2,02 \times 10^5$	48,67	$3,69 \times 10^6$	—	$8,87 \times 10^5$
9	47,3	$8,89 \times 10^4$	47,19	$2,54 \times 10^6$	—	$7,2 \times 10^5$
10	45,6	$1,08 \times 10^5$	45,9	$3,2 \times 10^6$	45,9	$8,1 \times 10^5$
11	44,5	$1,57 \times 10^5$	44,5	$2,74 \times 10^6$	44,7	$1,15 \times 10^6$
12	42,49	$2,06 \times 10^5$	42,49	$2,93 \times 10^6$	42,49	$8,0 \times 10^5$
13	38,0	$2,3 \times 10^5$	38,11	$3,2 \times 10^6$	—	$4,8 \times 10^5$
14	37,20	$7,2 \times 10^4$	37,10	$3,2 \times 10^6$	—	$6,4 \times 10^5$
15	35,6	$1,56 \times 10^5$	35,6	$1,4 \times 10^6$	—	$1,5 \times 10^5$
16	34,09	$1,90 \times 10^5$	34,09	$1,6 \times 10^5$	—	$5,1 \times 10^5$
17	32,66	$1,48 \times 10^5$	32,63	$3,8 \times 10^6$	32,27	$8,0 \times 10^5$
	32,06	$5,8 \times 10^4$	31,90	$1,3 \times 10^5$	32,01	10^4
18	29,89	$6,23 \times 10^4$	29,89	$2,03 \times 10^6$	30	$3,91 \times 10^5$
19	29,61	$7,6 \times 10^4$	29,61	$8,9 \times 10^5$	—	$3,1 \times 10^5$
20	29,35	$9,1 \times 10^4$	29,35	$2,7 \times 10^6$	—	$1,0 \times 10^5$
21	28,52	$7,2 \times 10^4$	28,45	$1,9 \times 10^6$	28,19	$1,1 \times 10^6$
22	27,64	$1,4 \times 10^5$	27,59	$3,47 \times 10^6$	27,59	$7,2 \times 10^6$
23	27,46	$1,38 \times 10^5$	27,46	$1,7 \times 10^6$	27,46	$1,0 \times 10^6$
24	27,153	$9,2 \times 10^4$	27,21	$2,1 \times 10^6$	27,24	$9,5 \times 10^5$
25	27,55	$2,29 \times 10^5$	<i>Mm</i>			
26	27,02	$1,06 \times 10^5$	—	$9,0 \times 10^6$	26,94	$8,4 \times 10^7$
27	26,35	$6,8 \times 10^4$	26,30	$3,8 \times 10^6$	26,35	$5,0 \times 10^5$
28	25,75	$6,1 \times 10^4$	25,56	$2,9 \times 10^6$	25,71	$4,0 \times 10^5$
29	25,29	$9,9 \times 10^4$	25,29	$2,9 \times 10^6$	25,30	$6,4 \times 10^5$
30	24,35	$7,5 \times 10^4$	24,32	$8,4 \times 10^6$	24,32	$3,9 \times 10^5$
31	24,03	$1,80 \times 10^5$	24,06	$2,4 \times 10^6$	24,06	$4,9 \times 10^5$
32	23,54	$6,79 \times 10^4$	—	$1,7 \times 10^6$	—	$5,3 \times 10^5$
33	22,91	$1,19 \times 10^5$	22,91	$2,3 \times 10^6$	22,88	$1,4 \times 10^6$

амплитудой $5,99 \times 10^6$ соответствует сравнительно слабая линия спектра вариаций уровня ($T = 34,57$, $A = 8,8 \times 10^4$). Максимальная линия спектра вариаций температуры также не попала в число сопоставленных. Она соответствует периоду 43,45 сут и имеет амплитуду $2,33 \times 10^6$.

Сильная линия спектра температуры, соответствующая максимуму спектра давления, также не попала в таблицу. Ей соответствует период 34,68 дня и амплитуда $1,18 \times 10^6$.

Периоды линий, за некоторым исключением, совпадают неточно. Различия составляют несколько расчетных точек и абсолютно объективны. Они сохраняются, если использовать для вычисления спектра вариаций уровня интервал 20 лет. Как правило, они превышают вариации положения линии при изменении интервала наблюдения в диапазоне 18–40 лет, показанные в табл. 2. Сами линии имеют тонкую структуру, которая отчетливо разрешается при использованных параметрах вычислительной схемы. Образец тонкой структуры для линии Mt вариаций уровня показан на рис. 2б. Однако факт наблюдения острых спектральных линий на одинаковых частотах для спектров вариаций температуры воздуха, вариаций атмосферного давления и уровня моря очевиден.

3.2. Сопоставление спектральных амплитуд

различных метеорологических параметров

Сопоставление спектральных амплитуд различных метеорологических параметров позволяет исследовать механизм воздействия различных факторов на погоду. Частота линии обычно является убедительным указанием на источник возмущения. Относительные величины спектральных амплитуд, которые испытывают значительные вариации, могут быть использованы для распознавания механизма генерации. В частности, если вариации генерируются в атмосфере, то горизонтальные градиенты вариаций атмосферного давления Δp_a вызывают компенсирующие горизонтальные градиенты вариаций уровня ζ_a , и между амплитудами вариаций существует связь, известная как закон обратного барометра [7], $\rho_1 g \zeta_a = \Delta p_a$, ρ_1 — плотность воды; если генерируются вариации уровня моря ζ_0 , то эти вариации вызывают движение воздуха над поверхностью воды и приводят к вариациям атмосферного давления Δp_0 , причем амплитуды этих вариаций связаны соотношением $\rho_0 g \zeta_0 = \Delta p_0$, ρ_0 — плотность воздуха. То есть во втором случае вариации атмосферного давления в тысячу раз меньше. Аналогичные различия сохраняются и в том случае, если вариации генерируются в одном месте, а наблюдаются в другом. В этом случае волна, распространяющаяся по атмосфере с амплитудой Δp_{a1} (волны с периодами больше суток называются *планетарными* или *волнами Россби* [18]), вызывает спутную волну в океане с амплитудой вариаций уровня

$$\zeta_{a1} = \frac{\Delta p_{a1}}{(\rho_1 g)} \frac{H_2}{H_1 - H_2}.$$

Волна, распространяющаяся по океану с амплитудой ζ_{01} , вызывает волну в атмосфере с амплитудой вариаций давления [18]

$$\Delta p_{01} = (\rho_0 g) \frac{H_2}{H_1 - H_2} \zeta_{01}.$$

То есть в случае генерации в океане отношение амплитуд спектра атмосферного давления к амплитуде вариаций уровня также примерно в 1000 раз меньше. В этих формулах H_2 — глубина океана, $H_1 = 7800$ м [7] — высота приведенной атмосферы. Формулы получены в модели распространения длинных волн в двухслойной среде во вращающейся системе координат в поле тяжести [18] без обмена массами между средами. В этой модели характеристиками волн являются вариации η_1 и η_2 поверхности верхнего и нижнего слоев, характеристиками слоев являются плотности ρ_0 , ρ_1 и толщины H_1 и H_2 верхнего и нижнего слоев. Учитываются силы Кориолиса (параметр f') и сила тяжести. Верхняя среда моделирует атмосферу ($\rho_0 = 0,00129$ г см⁻³ и $H_1 = 7900$ м), нижняя среда моделирует океан ($\rho_1 = 1,0$ г см⁻³ и $H_1 = 5000$ м), вариации уровня моря совпадают с вариациями η_2 , вариации давления совпадают с величиной $g\rho_0\eta_1$. В этой постановке существуют две моды распространяющихся волн, в которых величины вариаций η_1 и η_2 связаны между собой соотношениями $\eta_{1a} = -q_a\eta_{2a}$ и $\eta_{10} = -q_0\eta_{20}$, а величины q_a и q_0 являются корнями уравнения

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} H_2 q^2 + \left(H_1 - H_2 + 2H_2 \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) q - H_2 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) = 0. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае величина $\rho_0/\rho_1 \ll 1$ и одно из решений (3) велико и равно $q_a = -(\rho_1/\rho_0)[(H_1 - H_2)/H_2]$. Оно определяет соотношение амплитуд вариаций для волны в атмосфере. Второе решение не зависит от соотношения плотностей и равно $q = H_2/(H_1 - H_2)$. Эти связи между спектральными амплитудами могут быть уточнены при анализе соотношения амплитуд линий известного происхождения, природа возбуждения которых более-менее известна, для линий, связанных с вращением Земли вокруг Солнца и вращением Луны вокруг Земли. Спектры построены по двухсугодичным средним для вариаций уровня по периоду 1951–1990 гг., для вариаций атмосферного давления по периоду 1966–1984 гг. Линии Солнца S , $2S$, $3S$ и линия Луны $2M$ являются наиболее интенсивными в соответствующих участках спектра и отчетливо выделены. Параметры линий выписаны в табл. 4.

Соответствующие амплитуды показаны на рис. 3б. Показана линия закона обратного барометра. Масштаб амплитуд различается для интенсивных линий (S , $2S$, $3S$, $2M$) и для относительно слабых линий. Наибольший интерес представляют линии S и $2M$.

Линия S (период 365,25 сут), описывающая сезонные вариации колебаний атмосферного давления и уровня моря, относительно хорошо удовлетворяет закону обратного барометра, однако амплитуда вариаций давления несколько больше ожидаемой. Она лучше всего соответствует соотношению амплитуд в волне, генерированной в атмосфере в двухслойной модели. Для величины $H_2/(H_1 - H_2)$ получаем оценку 1,24, которая при принятом значении толщины атмосферы соответствует средней глубине океана 3500 м.

Линия $2M$ (период 13,661 дня) в теории приливов обозначается Mf . Для этой линии амплитуда спектра вариаций уровня моря примерно в 10 раз больше, чем это следует из закона обратного барометра. С одной стороны, это однозначно указывает на то, что колебания

Таблица 4. Амплитуды спектральных линий известного происхождения

Название	Вариации уровня моря		Давление		Температура	
	Период	Амплитуда	Период	Амплитуда	Период	Амплитуда
S	365,71	$7,89 \times 10^6$	365,71	$1,823 \times 10^8$	365,71	$2,46 \times 10^9$
$2S$	182,336	$5,78 \times 10^6$	182,857	$1,146 \times 10^7$	181,303	$2,72 \times 10^7$
$3S$	121,673	$1,624 \times 10^6$	122,84	$5,8 \times 10^6$	121,90	$8,26 \times 10^6$
$2M$	13,660	$2,81 \times 10^6$	13,695	$1,14 \times 10^7$	13,76	$5,0 \times 10^5$
$2M-S$	14,178	$4,6 \times 10^4$	14,153	$1,43 \times 10^7$	13,65	$3,6 \times 10^7$
$2M-2S$	14,76	$4,0 \times 10^4$	14,26	$2,2 \times 10^6$	14,14	$5,5 \times 10^5$
$2M+S$	13,185	$8,8 \times 10^4$	13,176	$3,57 \times 10^6$	14,25	8×10^5
$2M+2S$	12,70	$1,1 \times 10^5$	12,74	$2,35 \times 10^6$	14,72	$1,9 \times 10^6$
					13,155	$2,9 \times 10^5$
					12,70	$3,2 \times 10^5$

генерируются в водах океана, с другой стороны, если это так, то амплитуда спектра колебаний атмосферного давления в 10^5 раз превосходит как оценку амплитуды этой линии в теории приливов в атмосфере [7, 19], так и оценку амплитуды спутной волны в атмосфере, сопровождающей приливные волны. Последняя представляет особый интерес, так как является важным вопросом теории взаимодействия океана и атмосферы [3]. Разительное противоречие теоретической и экспериментальной оценок заставляет подойти к вопросу более тщательно. Действие Луны на атмосферу и океан не исчерпывается гравитационными силами. В следующем разделе, в частности, проанализирован механизм действия Луны посредством модуляции солнечного излучения. Различные механизмы приводят к появлению максимума на частоте, близкой, но не совпадающей с частотой $2M$. В различных теориях наблюдаются смещения частоты, обусловленные детальными особенностями движения Луны: различием частоты вращения и частоты радиальных колебаний (различия тропического (27,321 дня) и аномалистического (27,554 дня) месяцев, частотой обращения (регрессии) узлов лунной орбиты (период 18,613 лет). Для различения таких эффектов следует анализировать спектры с большим разрешением по частоте, используя наблюдения по интервалам предельно большой длительности. Сопоставление тонкой структуры спектров вариаций атмосферного давления и уровня моря в окрестности частоты $2M$ иллюстрируется на рис. 3в. На линии 1 показан спектр вариаций атмосферного давления, на линии 2 — спектр вариаций уровня моря. Использованы те же данные, что и ранее. Длительность интервала наблюдения атмосферного давления — 19 лет, длительность наблюдения вариаций уровня — 40 лет. Разрешение по частоте — 10^{-4} день $^{-1}$. Видно, что спектр вариаций уровня содержит не только линию M_f (период 13,661 дня), но также линию на частоте $2M + SAR$ (SAR — частота регрессии узлов лунной орбиты). Спектр вариаций атмосферного давления содержит четыре интенсивных линии на смещенных относительно $2M$ частотах, на фоне хвостов которых линия $2M$ неразличима. Как будет показано в следующем разделе, линии 2,1 и 3,—5 — это линии, генерированные в атмосфере при модуляции солнечного излучения лунными затмениями. Что касается линии, связанной со спутной приливной волной в атмосфере, то относительно ее амплитуды можно сделать только предварительное заключение: амплитуда спектральной линии спутной волны колебаний, возбужденных в океане,

не превосходит 10^{-2} от оценки амплитуды по закону обратного барометра.

Комбинационные линии либо удовлетворяют закону $2M - 2S$, либо для них вариации давления превосходят вариации амплитуды. Можно заключить, что если генерация связана с поверхностными событиями, то закон обратного барометра удовлетворяется. В случае источника в водной массе (линия $2M$) вариации уровня моря превосходят соответствующие вариации атмосферного давления. В этой связи интересно отметить, что комбинации лунной гармоники и частоты S не имеют приливного происхождения. Из отношения соответствующих спектральных амплитуд следует, что они генерируются посредством того же процесса, что сезонные вариации (S) .

На рисунке 3г для отдельных линий сравниваются амплитуды спектров вариаций уровня и атмосферного давления. Номера линий из табл. 3 показаны около соответствующих точек. Отдельно показана линия закона обратного барометра. Видно, что большинство точек довольно удовлетворительно согласуется с этим законом. Для некоторых линий вариации уровня существенно больше соответствующих вариаций давления, для некоторых — наоборот.

Таким образом, соотношение амплитуд сопоставленных спектральных линий вариаций атмосферного давления и уровня моря позволяет оценить расположение первичных следствий генерации возмущений. Если амплитуды удовлетворяют закону обратного барометра или амплитуда линии атмосферного давления больше оценки, сделанной по измерениям амплитуды вариаций уровня в соответствии с законом обратного барометра, то первичная генерация возмущений происходит в атмосфере или на границе раздела. В противном случае генерация происходит в водных толщах.

Используя этот принцип, можно убедиться, что гармоники на частотах $2M - 2S$, $2M - S$, $2M + S$, $2M + 2S$ генерируются в атмосфере. По-видимому, они являются следствием модуляции солнечного излучения при движении Луны.

Таким образом, в диапазоне периодов от 20 до 60 дней наблюдается линейчатая структура спектров вариаций атмосферного давления, атмосферной температуры и уровня моря. Периоды линий вариаций различных параметров совпадают с хорошей степенью точности. Относительные амплитуды линий варьируются в довольно широком диапазоне. Однако по величине относительной амплитуды линии вариаций

давления и уровня моря разделить на две группы. Для линий первой группы это отношение близко к $1 \text{ мбар}^2 \text{ см}^{-2}$. К первой группе относится известная линия сезонных вариаций с периодом 1 год. Для линий второй группы величина этого отношения близка к $0,1 \text{ мбар}^2 \text{ см}^{-2}$. К этой группе относится линия с периодом 13,6 дня, обусловленная приливными колебаниями, вызванными гравитационным действием Луны.

4. Происхождение периодических вариаций уровня моря, атмосферного давления и температуры в диапазоне периодов 10–60 дней

4.1. Введение

Одним из наиболее убедительных аргументов в пользу физической реальности обнаруженных периодических изменений атмосферного давления и температуры воздуха является понимание физического происхождения этих вариаций. Теория приливов Ньютона [7] в значительной мере содействовала внедрению идеи периодичности приливов. Ниже приведены попытки построения теории влияния Луны на вариации температуры воздуха, атмосферного давления и уровня моря. Главным фактором, формирующим вариации температуры и атмосферного давления, полагается излучение Солнца. Главным фактором, формирующим вариации уровня моря, как и в теории Ньютона [7], полагается гравитационное действие Луны. Основными характеристиками, определяющими положение спектральных линий вариаций метеорологических параметров, являются кинематические параметры движения Солнца и Луны. Информация о движении Солнца и движении Луны накоплена астрономами [20], и оценка положения и структуры линий может быть получена теоретически.

4.2. Генерация приливных волн в океане на характерных частотах движения Луны

При оценке особенностей вариаций уровня моря, генерированных в океане, используется выражение для статического отклонения уровня ζ , вызванного приливной силой теории Ньютона [7]:

$$\begin{aligned} \zeta = & \frac{3}{2} H \left(\cos^2 \Delta - \frac{1}{3} \right) \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) + \\ & + \frac{1}{2} H \sin 2\Delta \sin 2\theta \cos(\alpha + \varphi) + \\ & + \frac{1}{2} H \sin^2 \Delta \sin^2 \theta \cos 2(\alpha + \varphi). \end{aligned} \quad (4)$$

В этой формуле Δ — угол между направлением на Луну и направлением на полюс; θ — угол, дополняющий широту рассматриваемой точки до прямого; α — угол поворота Земли относительно своей оси, отсчитанный от некоторого момента; φ — широта точки наблюдения [1]; $H = (3/2)(M/E)(a/D)^3 a$, a — радиус Земли, D — радиус лунной орбиты, M , E — массы Луны и Земли (используются обозначения [7]).

На рисунке 4а показана схема расположения светил, траектории движения Земли и Луны, узлы лунной орбиты N_1 и N_2 , оси системы координат, связанной с Землей, которая использована для вычислений. В этой системе координат ось z направлена перпендикулярно

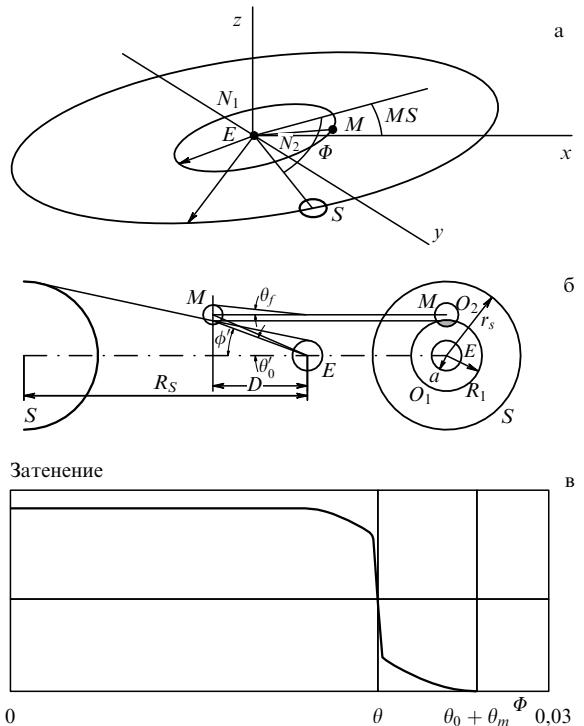


Рис. 4. (а) Система координат. (б) Две проекции расположения светил (S — Солнце, E — Земля, M — Луна); справа — проекция на плоскость, перпендикулярную к направлению от Земли на Солнце; слева — проекция на плоскость, проходящую через центры Солнца, Земли и Луны. Зачернена эффективная площадь затенения. (в) Зависимость затенения Солнца Луной от угла между направлениями на Солнце и на Луну.

плоскости эклиптики (плоскости вращения Земли вокруг Солнца). Ось z совпадает с линией пересечения плоскостей орбиты Луны и эклиптики. Центр совпадает с центром Земли. Эта система координат вращается в пространстве относительно оси z с частотой "регрессии узлов лунной орбиты"

$$\omega_4 = \frac{2\pi}{6585,32} = 9,54 \times 10^{-4} \text{ день}^{-1}.$$

В этой системе координат Солнце вращается вокруг Земли с частотой $\omega_2 + \omega_4$ в плоскости xy , а Луна вращается вокруг Земли с частотой $\omega_1 + \omega_4 \cos MS$;

$$\omega_2 = \frac{2\pi}{365,25} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ день}^{-1},$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{27,321} = 0,230 \text{ день}^{-1}.$$

Величина MS равняется $5^\circ 8' 43''$ [5], $\cos MS = 0,9962$; ее отличие от 1 мало, и в дальнейших расчетах им пренебрегается. В этой системе координаты Луны M_i и Солнца S_i запишутся так:

$$Mz = D \sin MS \cos(\omega_1 + \omega_4) t,$$

$$My = D \sin(\omega_1 + \omega_4) t,$$

$$Mx = D \cos MS \cos(\omega_1 + \omega_4) t,$$

$$Sz = 0,$$

$$Sy = R_s \sin(\omega_2 + \omega_4) t,$$

$$Sx = R_s \cos(\omega_2 + \omega_4) t.$$

Косинус угла Φ , определяющего fazу Луны, равен

$$\begin{aligned} \cos \Phi = & \cos MS \cdot \cos(\omega_1 + \omega_4) t \cdot \cos(\omega_2 + \omega_4) t + \\ & + \sin(\omega_1 + \omega_4) t \cdot \sin(\omega_2 + \omega_4) t. \end{aligned} \quad (5)$$

В этих формулах время t отсчитывается от момента новолуния, Rs — радиус орбиты Земли. Плоскость лунной орбиты пересекает плоскость xy по оси y . Уравнение этой плоскости

$$z \cos EM = x \sin EM,$$

где EM — угол между экваториальной плоскостью и плоскостью орбиты Луны. Направление из центра на Луну лежит в этой плоскости и составляет угол α с линией $y = 0$; $z \cos EM = x \sin EM$. Угол φ отсчитывается от Гринвичского меридиана, время t отсчитывается от момента, когда направление на Луну попадает в плоскость xz . В этом случае

$$\alpha + \varphi = (\omega_0 - \omega_1 - \omega_2) t;$$

$\omega_0 = 2\pi \text{ день}^{-1}$ — частота вращения Земли вокруг своей оси. Первая поправка возникает за счет перемещения направления на Луну, вторая возникает вследствие движения Земли вокруг Солнца, фаза которого положена в основу определения периода вращения. Оценка величины Δ хорошо известна. Она неоднократно проводилась при анализе приливов:

$$\cos \Delta = \sin EM \cdot \cos \omega_1 t. \quad (6)$$

Значение угла EM приводится в астрономических ежегодниках [21]. Этот угол варьируется от $18^\circ 18'$ до $28^\circ 35'$ с периодом 18,613 лет (6585 сут) регрессии лунных узлов [22]. Максимальные значения достигались в августе 1950 г., в марте 1969 г., в ноябре 1988 г. [22]. Изменение во времени величины синуса этого угла можно описать уравнением

$$\sin EM = \sin E \cdot \cos MS + \cos E \cdot \sin MS \cdot \cos \omega_4 t. \quad (7)$$

Здесь $E = 23^\circ 33'$ — наклон орбиты Земли.

Ниже анализируются только низкочастотные спектральные максимумы, поэтому в формуле (4) достаточно рассматривать только первый член

$$\zeta_1 = \frac{3}{2} H \left(\sin^2 EM \cdot \cos^2 \omega_1 t - \frac{1}{3} \right) \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right). \quad (8)$$

Для описания главных линий, связанных с движением Луны, необходимо принять во внимание зависимость величины H от времени. Дополнительные линии возникают вследствие зависимости расстояния D до Луны от времени. Обычно полагается, что движение Луны относительно Земли происходит по эллиптической орбите с малым эксцентриситетом $e = 0,055$ [22], однако период колебаний расстояния от Луны до Земли 27,555 дней — длительность аномалистического месяца — не совпадает с периодом вращательного движения. Это несовпадение достаточно значительно, чтобы его можно было обнаружить при анализе рядов наблюдений длительностью более 10 лет. В этом случае расстояние D определяется

из уравнения

$$\frac{P}{D} = (1 + e \cos \omega_3 t); \quad (9)$$

P — параметр орбиты, частота $\omega_3 = 2\pi/27,555$. Величина $H \sim D^{-3}$.

Выражение для приливного потенциала содержит чисто периодические функции с тремя частотами $2\omega_1$, ω_3 , ω_4 . Его спектр содержит линии на комбинациях этих частот $\omega_{i,j,k} = i2\omega_1 + j\omega_3 + k\omega_4$ (i, j, k — целые числа). Однако не все эти комбинации одинаково интенсивны. Выражение содержит малые параметры. Параметр $\cos E \cdot \sin MS = 0,0752$ появляется в качестве сомножителя каждый раз, когда комбинация включает частоту ω_4 ; параметр $e = 0,055$ появляется, когда комбинация включает частоту ω_3 . Кроме того, частота $2\omega_1$ входит как чисто синусоидальный сомножитель, т.е. величина i принимает только три значения: $-1, 0, 1$. В таком случае видно, что главные компоненты соответствуют частотам 0 ($i = 0, j = 0, k = 0$) и $2\omega_1$ ($i = \pm 1, j = 0, k = 0$). Вторая — это известная линия M_f [16], спектр вариаций уровня моря в окрестности которой показан на рис. 3в. Там же видны две линии ($i = \pm 1, j = 0, k = \pm 1$). Относительная интенсивность этих линий вполне согласуется с теоретической оценкой в случае линии ($i = 1, j = 0, k = -1$) и примерно в 10 раз больше ее для случая линии ($i = 1, j = 0, k = 1$).

Следующие по величине интенсивности линии — это линии на частотах ω_3 ($i = 0, j = 0, k = 1$) и $2\omega_1 - \omega_3$ ($i = 1, j = -1, k = 0$). Первая из них — линия M_m , показанная на рис. 2в; вторая линия также видна. Чтобы облегчить распознавание, на рисунке показаны положения линий теоретического спектра (M_m и $M_f - M_m$). В данном случае распознавание линий затруднительно, линии имеют специфическую форму, которая не содержится в теоретическом представлении. Линия M_m расщепляется на три, а линия $M_f - M_m$ — на четыре линии. Это различие не является следствием ограниченности теории Ньютона, а появляется вследствие недостаточной точности представлений о движении Луны, положенных в основу оценки. В частности, используемые формулы Брауна [21] для элементов лунной орбиты не содержат описания приливных явлений в системе Луна — Земля, связанных с действием Солнца. Эти явления учитываются как появление различий между аномалистическим и тропическим месяцами, но не содержат описания вариаций этих различий с периодом, равным половине тропического года. Само существование таких вариаций понято и качественно исследовано математиками [23], однако эти исследования не подкреплены наблюдениями и не доведены до реальных рекомендаций, в частности совсем не используются при интерпретации приливных явлений. Ниже анализируется влияние гравитационного действия Солнца на относительное движение Луны и Земли. Действие этого потенциала, осредненное по периоду вращения Луны, приводит к различию тропического (27,322 дня) и аномалистического (27,555) месяцев. Колебания этого потенциала с периодом 6 месяцев [24] приводят к осцилляциям периодов или к частотной модуляции вращательного и колебательного движений Луны. Модуляция эта происходит с частотой $2\omega_2$, или с периодом полгода.

Рассмотрим гелиоцентрическую систему координат. Пусть радиус-векторы центра Земли и Луны есть Re и

Rm , массы Солнца, Земли и Луны — S , E и M , универсальная гравитационная постоянная — G . Гамильтониан H системы Земля–Луна записывается в виде [24]

$$H = E \frac{(\mathrm{d}Re/\mathrm{d}t)^2}{2} + M \frac{(\mathrm{d}Rm/\mathrm{d}t)^2}{2} - \frac{GSE}{Re} - \frac{GSM}{Rm} - \frac{GEM}{Re - Rm}. \quad (10)$$

Центр инерции системы расположен в точке $R = (ERe + MRm)/(E + M)$. Ниже приводится теоретическая оценка частотной модуляции орбитальных и радиальных колебаний Луны при движении в поле тяжести Земли, возмущенном действием Солнца. При анализе сохраняется первый неисчезающий член по параметру малости $D/R \approx 2,5 \times 10^{-3}$, где D и R — соответственно расстояния между Луной и Землей и между Луной и Солнцем. Рассматриваются импульсы P_r , P_ϕ , P_z в цилиндрических координатах с осью z , перпендикулярной к плоскости орбиты Луны с центром в центре инерции. Компоненты D : r , z , ϕ . Движение описывается гамильтонианом [24]

$$\frac{1}{2} \mu \left(P_r^2 + \frac{P_\phi^2}{r^2} + P_z^2 \right) - \frac{GME}{r} - \frac{GS\mu r^2}{2R^3} (3 \cos \Phi^2 - 1). \quad (11)$$

Поправка к гамильтониану, связанная с действием Солнца, равна

$$H' = -\frac{GS\mu r^2}{2R^3} (3 \cos \Phi^2 - 1). \quad (12)$$

Угол Φ между направлениями на Солнце и на Луну зависит от времени. Величина $\cos \Phi$ равна

$$\cos MS \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega_2 t + \sin \varphi \cdot \sin \omega_2 t,$$

где μ — приведенная масса, $\mu = ME/(E + M)$. Угол $MS = 5^{\circ}8'43''$ — средний наклон орбиты к плоскости эклиптики. Величины

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{27,321} \text{ день}^{-1}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi}{365,24} \text{ день}^{-1}$$

— частоты вращения соответственно Луны и Солнца вокруг центра инерции.

Гамильтониан является периодической функцией времени с периодом $2\pi/\omega_2$. Последний член аналогичен солнечной приливной силе в системе Луна–Земля [24]. Это — малая адиабатическая поправка к потенциалу взаимодействия. Она приводит к известному эффекту различия между периодами радиального и азимутального движения Луны [24]. Величина $\cos MS = 0,9967$ мало отличается от 1. Ниже эти различия игнорируются. В этом приближении гамильтониан не зависит от z , возмущение не нарушает плоскости орбиты и является периодической функцией времени с периодом π/ω_2 .

Ниже периодическая добавка рассматривается как малое адиабатическое возмущение. Невозмущенные решения хорошо известны [25]. Движение происходит в плоскости $z = 0$ и характеризуется величинами постоянного момента K относительно оси z ($K = \mu r^2 \mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}t$) и

эксцентриситетом орбиты $e = 0,055$. Траектория задается уравнением

$$\frac{p}{r} = 1 + e \cos \varphi. \quad (13)$$

Энергия системы Земля–Луна есть

$$W = -\frac{1}{2} GME \frac{1 - e^2}{p}.$$

Величина p равняется [24]

$$\frac{K^2}{GME} = 384403 \text{ км.}$$

Величина эксцентриситета e мала, и в первом приближении по этой малости движение по орбите представляется как равномерное вращение по кругу с радиусом p и радиальными колебаниями относительно окружности с амплитудой er и с частотой ω_1 , равной частоте вращения. Такая структура решения — основная концепция метода малых колебаний [25]. Характеристики модели — положение центра R_0 и частота осцилляций ω — находятся из уравнений движения по простому алгоритму. Решение представляется в виде $R_0 + r_0(t)$. Расстояние R_0 , относительно которого совершаются радиальные колебания, находится как точка, в которой производная по времени радиального импульса равна нулю:

$$\frac{\mathrm{d}p_r}{\mathrm{d}t} = -\frac{\partial H'}{\partial r} = 0, \quad \text{или} \quad \frac{K^2}{\mu R_0^3} - \frac{GEM}{R_0^2} = 0; \quad (14)$$

при отсутствии возмущения $R_0 = K^2/(GEM) = p$.

Величина малых отклонений от равновесия r_0 подчиняется уравнению

$$\begin{aligned} \mu \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2} r_0 &= -\frac{\partial^2 H'}{\partial r^2} \Big|_{R_0} r_0 = \\ &= -\left[\frac{3K^2}{\mu R_0^4} - \frac{2GEM}{R_0^3} \right] r_0 = -\left[\frac{K^2}{\mu R_0^4} \right] r_0. \end{aligned} \quad (15)$$

Последнее представляет уравнение колебаний с частотой $\omega = K/(\mu R_0^2) = \omega_1$. Частота движения ω определяется из уравнения

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 H'}{\partial r^2} \Big|_{R_0} = \omega^2. \quad (16)$$

Таким образом, в случае малых возмущений траектория представляется окружностью, относительно которой тело испытывает гармонические радиальные колебания небольшой амплитуды. Алгоритм оценки параметров траектории сводится к определению двух характеристик: положения центра орбиты (уравнение (14)) и частоты радиальных колебаний, которая оценивается после вычисления первого члена разложения силы в точке равновесия в ряд Тейлора по переменной r (уравнение (16)) [25].

Анализ влияния солнечных приливных сил на радиальные колебания проведем методом малых колебаний. Влияние приливной силы и на вращательное, и на колебательное движение очень мало. Параметр малости возмущения — отношение характерной энергии возмущения к энергии относительного движения. Энергия

возмущения — порядка величины $GS\mu p^2/R^3$, энергия вращательного движения — $W = \mu\omega_1^2 p^2$, т.е. действие возмущения определяется параметром малости

$$\alpha = \frac{GS}{\omega_1^2 R^3} = \frac{S}{E} \left(\frac{p}{R} \right)^3 = 5 \times 10^{-3}.$$

Порядок этой величины совпадает с порядком величины $(\omega_1 - \omega_3)/\omega_1 = 8 \times 10^{-3}$.

При анализе возмущения используется еще один параметр малости — отношение частоты возмущения к частоте собственных движений $2\omega_2/\omega_1$. Последнее позволяет рассматривать возмущение как адиабатическое [25].

Возмущение орбитального движения. Уравнения Гамильтона для возмущений орбитального момента p_φ записутся в виде

$$\frac{dp_\varphi}{dt} = -\frac{\partial H'}{\partial \varphi}. \quad (17)$$

Интегрирование возмущения проводится по невозмущенной траектории, для которой

$$d\varphi = \frac{dt \mu r^2}{K}. \quad (18)$$

Невозмущенная величина орбитального импульса постоянна и равна K . Из (17), (18) для возмущения p_φ ($P_\varphi = K + p_\varphi$) находим

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_\varphi}{\partial \varphi} &= \frac{GS\mu r^2}{2R^3} \frac{\mu r^2}{K} \frac{\partial}{\partial \varphi'} (3 \cos \Phi^2 - 1) = \frac{3\mu\omega_1 p^2 \alpha}{(1 + e \cos \varphi)^4} \times \\ &\times \{ \cos \varphi \cdot \sin \varphi [-\cos^2 MS \cdot \cos^2 \omega_2 t + \sin^2 \omega_2 t] + \\ &+ \cos 2\varphi \cdot \cos \omega_2 t \cdot \sin \omega_2 t \cdot \cos MS \}. \end{aligned}$$

При оценке p_φ полагаем величину эксцентриситета e малой и строим разложение в ряд по этой величине. При этом следует принять во внимание, что для вычисления периода будет оцениваться величина переменной действия [25] I_φ , которая выражается как интеграл от импульса по периоду:

$$I_\varphi = \frac{1}{2\pi} \int p_\varphi d\varphi. \quad (19)$$

Поправка к периоду орбитального движения T_φ связана с этой величиной соотношением

$$T_\varphi = 2\pi \frac{dI_\varphi}{dW_1}. \quad (20)$$

Величина W_1 — это энергия вращательного движения Луны.

При оценке поправки к периоду орбитального движения правую часть уравнения (17) разложим в ряд Фурье. Для каждого из членов ряда сохраняем только главный член разложения по эксцентриситету. Получаем

$$\begin{aligned} \delta M &= \frac{9}{16} \alpha e^2 K \cos(2\omega_2 t) \frac{\omega_1}{\omega_2} - \\ &- \frac{3}{2} \alpha e K \cos(\varphi - 2\omega_2 t) \frac{\omega_1}{\omega_1 - 2\omega_2} + \\ &+ \frac{3}{2} \alpha K \cos(2\varphi - 2\omega_2 t) \frac{\omega_1}{2\omega_1 - 2\omega_2}. \end{aligned}$$

При оценке медленных вариаций момента следует сохранить только нулевой (не зависящий от φ) член.

Члены ряда, пропорциональные $\sin k\varphi$ и $\cos k\varphi$, при вычислении переменной действия при интегрировании по φ обращаются в нуль и не дают вклада в изменение периода. Этот член пропорционален величине e^2 и равен

$$\delta M = \frac{9}{16} \alpha e^2 \frac{\omega_1}{\omega_2} K \cos(2\omega_2 t). \quad (21)$$

Поправка медленно изменяется со временем с периодом π/ω_2 . Она описывает периодические изменения орбитального момента и частотную модуляцию орбитального движения Луны. Колебания δM орбитального момента с частотой $2\omega_2$ соответствуют модуляции колебаний с амплитудой по периоду, равной

$$\delta T_\varphi = 2\pi \frac{9}{16} \frac{\alpha e^2}{\omega_2} = 3 \times 10^{-3} \text{ дня},$$

или, по частоте,

$$\delta\omega_\varphi = \frac{\omega_1^2}{2\pi} \delta T_\varphi = \omega_1^2 \frac{9}{16} \frac{\alpha e^2}{\omega_2} = 2,6 \times 10^{-5} \text{ день}^{-1}. \quad (22)$$

Эта величина значительно меньше величины $\delta\omega \equiv \omega_1 - \omega_3$. Она практически неразрешима при использованном нами интервале наблюдения, что проявляется как появление острых пиков без тонкой структуры (рис. 3в). Дополнительная малость связана с параметром $e^2\omega_1/\omega_2 = 3 \times 10^{-2}$.

Радиальное движение. При анализе радиального движения исходим из представлений малых колебаний. Для оценки поправки δp_0 к положению p_0 равновесия, используя уравнение (10), находим

$$\mu\omega_1^2 \delta p_0 = \overline{GS \frac{\mu r}{R^3} (3 \cos \Phi^2 - 1)}. \quad (23)$$

Правую часть необходимо усреднить по периоду вращательного движения. Главная часть поправки (по параметру e) не зависит от времени и равна

$$\delta p_0 = \frac{1}{2} GS \frac{\mu p}{\omega_1^2 R^3} = \frac{1}{2} \alpha p. \quad (24)$$

Незначительная часть поправки δp_1 изменяется во времени с частотой $2\omega_2$. Она пропорциональна фактору $e^2 (\omega_1/\omega_2)$.

Для оценки поправки к периоду используем уравнение для малых радиальных колебаний r с учетом возмущения. Оно запишется так:

$$\begin{aligned} \mu \frac{d^2}{dt^2} r &= -\frac{\partial^2 H'}{\partial r^2} \Big|_{R_0} r = \left(\frac{12K^2}{\mu R^5} - \frac{6GEM}{R^4} \right) \delta p_r - \\ &- 3 \left[\left(\frac{K^2}{\mu R_0^4} - \frac{2GEM}{R_0^3} \right) r + \frac{GS\mu r}{R^3} (3 \cos \Phi^2 - 1) \right], \end{aligned} \quad (25)$$

или, после переноса не зависящего от возмущения члена в левую часть,

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2}{dt^2} + \omega_1^2 \right) r &= \left[\left(\frac{12K^2}{\mu^2 R^5} - \frac{6GEM}{\mu R^4} \right) \delta p_r + \right. \\ &\left. + \frac{GSr}{R^3} \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \cos 2\Phi \right) \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Не зависящие от времени члены в правой части уравнения определяют постоянную поправку к частоте радиальных колебаний, которая в соответствии с уравнением (15) равна

$$2\omega_1 \delta\omega_r = \left[-\left(\frac{12K^2}{\mu^2 R^5} - \frac{6GEM}{\mu R^4} \right) \delta p - \frac{GSr}{R^3} \frac{1}{2} \right] \frac{1}{2\omega_1},$$

или

$$\delta\omega_r = -1,75\alpha\omega_1. \quad (27)$$

Эта известная поправка определяет различия между периодами радиальных и орбитальных движений Луны и равна известной величине $\omega_3 - \omega_1$.

Для определения зависящей от времени поправки к частоте необходимо выделить только члены, изменяющиеся с частотой, близкой к ω_1 .

В члене $(GSr/R^3)(3/2) \cos [2(\varphi - \omega_2 t)]$

$$\begin{aligned} r \cos [2(\varphi - \omega_2 t)] &= \\ &= ep \cos \varphi [\cos 2\varphi \cdot \cos(2\omega_2 t) + \sin 2\varphi \cdot \sin(2\omega_2 t)] = \\ &= \frac{1}{2} ep [\cos \varphi \cdot \cos(2\omega_2 t) + \cos 3\varphi \cdot \cos(2\omega_2 t) + \\ &\quad + \sin \varphi \cdot \sin(2\omega_2 t) + \sin 3\varphi \cdot \sin(2\omega_2 t)]. \end{aligned}$$

В этом члене при усреднении по периоду сохраняется только слагаемое $(1/2)ep \cos \varphi$. Остальные слагаемые при усреднении по периоду обращаются в нуль и не дают вклада в вариации частоты.

Для переменной компоненты частоты получаем выражение

$$2\omega_1 \delta\omega_2 = \frac{GS}{R^3} \frac{3}{2} \frac{1}{2} \cos(2\omega_2 t),$$

или для амплитуды частотной модуляции $\delta\omega_2$ получаем выражение

$$\delta\omega_2 = \frac{3}{8} \alpha\omega_1. \quad (28)$$

Суммируем результаты анализа. Действие солнечной силы на систему Луна–Земля характеризуется параметром малости $\alpha = (S/E)(p/R^3) \approx 5 \times 10^{-3}$ и сводится к небольшому изменению равновесного расстояния между Луной и Землей, равному $\delta p_0 = (3/2)\alpha p$, к появлению различия между средними значениями частот орбитальных и радиальных колебаний, равному $\delta\omega = 1,75\alpha\omega_1 = 0,002 \text{ день}^{-1}$, и к частотной модуляции орбитального $\delta\omega_\varphi$ и радиального $\delta\omega_r$ движений Луны, происходящей с частотой $2\omega_2$ и с амплитудами

$$\delta\omega_{1\varphi} = \omega_1^2 \frac{9}{16} \frac{\alpha e^2}{\omega_2} = 2,6 \times 10^{-5} \text{ день}^{-1},$$

$$\delta\omega_2 = \frac{3}{8} \alpha\omega_1 = 4,5 \times 10^{-4} \text{ день}^{-1}.$$

Амплитуда частотных модуляций радиальных колебаний много больше амплитуды модуляции вращения. Это связано с тем, что в приближении малых колебаний эти движения разделяются, и суммарная энергия представляется как сумма этих величин. Величина энергии вращения W_1 много больше энергии колебаний W_2 . Последняя пропорциональна квадрату эксцентриситета и для невозмущенного движения равна $W_2 = e^2 p^2 \omega_1^2 / 2 = e^2 W_1$. Модуляция радиальных колеба-

ний может наблюдаться на спектрах, построенных по интервалу 20 лет. Поэтому собственную структуру линии, обусловленную частотной модуляцией радиальных колебаний Луны, удобнее всего наблюдать на линии Mt (частота ω_3) спектра колебаний вариаций уровня. В теории приливов полагается, что эта линия обусловлена радиальными колебаниями Луны. Ниже проиллюстрированы некоторые особенности спектра колебаний с модуляцией частоты. Используются значение основного периода колебаний 27,555 дней и вариации этого периода с амплитудой колебаний частоты $(1-20) \times 10^{-4} \text{ день}^{-1}$. Спектр вычисляется за интервал 40 лет по значениям с интервалом по времени 2 дня. Результаты выводятся с интервалом по частоте $10^{-4} \text{ день}^{-1}$. Для вычислений использована та же программа, что и при вычислении спектров реальных колебаний. То есть вычислялся спектр величины

$$Y(t) = \cos [(\omega_3 + a \cos(2\omega_2 t))t]$$

для значений

$$a = 0; 0,0001; 0,0002; 0,0004; 0,0006; 0,0008; 0,001; \\ 0,0014; 0,002 \text{ день}^{-1}.$$

Результаты вычислений показаны на рис. 5: на рис. 5а — результаты вычисления спектров при различных значениях параметра a в окрестности основной частоты колебаний; на рис. 5б — результаты вычисления в широкой окрестности, содержащей несколько комбинационных максимумов; на рис. 5в — зависимость амплитуды главного и первых комбинационных максимумов от амплитуды модуляции a .

Видно, что с увеличением a пик расширяется и уменьшается по амплитуде. При теоретическом значении $a = 0,0004$ он расщепляется на три пика: центральный, расположенный на частоте ω_3 , и два боковых, расположенных на частотах $\omega_3 \pm a$. Амплитуда пиков при больших значениях a падает с ростом a как $1/a^{1/2}$. Расщепление максимума, вызванное модуляцией частоты радиальных колебаний, существенно влияет на оценку амплитуды этих колебаний. Зависимость показана на вставке к рис. 5в. Видно, что вследствие этого эффекта при теоретическом значении амплитуды модуляции периода происходит уменьшение наблюдаемой амплитуды линии более чем в 10 раз.

Полученные результаты полностью соответствуют ожиданиям. Вариации частоты сигнала в пределах $2a$ естественно приводят к увеличению ширины линии на эту величину и уменьшению ее амплитуды. Особенность состоит в том, что на линии появляются два максимума на границах полосы.

Таким образом, вследствие частотной модуляции колебаний расстояния от Луны до Земли происходит расширение спектрального максимума Mt (он расщепляется на три максимума: центральный и два смещенных на величину частоты модуляции), уменьшение его амплитуды и появление комбинационных максимумов на частотах $\omega_3 \pm l/2\omega_2$, где l — целое число. Каждый комбинационный максимум расщепляется на два всплеска, расположенных симметрично относительно невозмущенного положения линии c на расстоянии $\delta\omega$ от него.

Аналогичные эффекты: расширение максимума, появление нескольких близких пиков вместо одного и появление большого количества дополнительных пиков на комбинациях главной частоты с частотой $2\omega_2$,

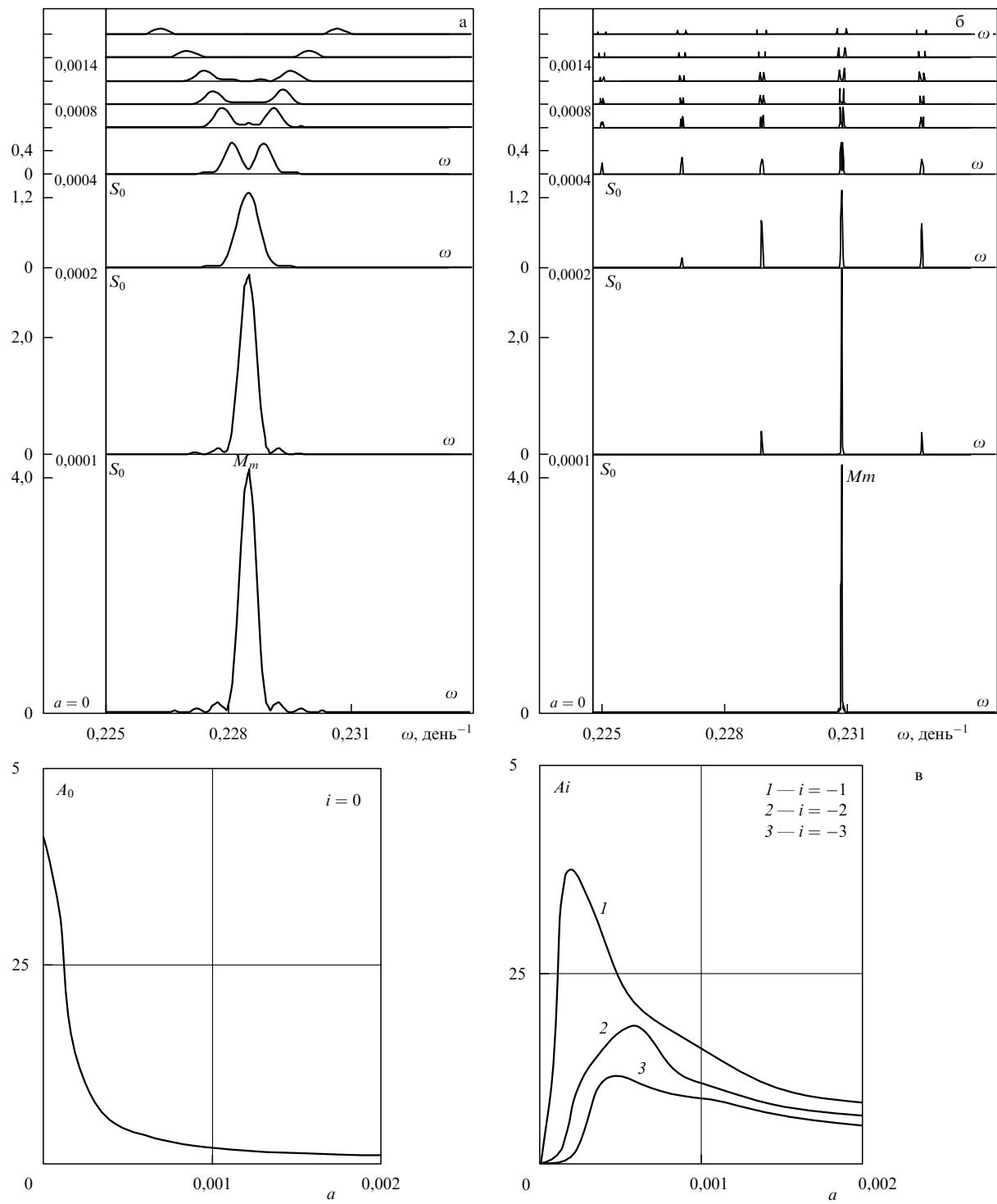


Рис. 5. (а) Спектры S_0 частотно модулированных колебаний при различных значениях амплитуды модуляции a (день^{-1}). Значение амплитуды написано рядом с линией. Основная частота $Mm = 0,23 \text{ день}^{-1}$. Детально показан главный максимум. Частота модуляции $2S = 0,0344 \text{ день}^{-1}$. Ордината в условных единицах, единых для всех кривых. (б) Спектры S_0 частотно модулированных колебаний при различных значениях амплитуды модуляции a . Значение амплитуды написано рядом с линией. Показаны амплитуды и расположение линий на комбинационных частотах $Mm - i2S$ ($i = \pm 1, 2, 3$). (в) Зависимость амплитуды спектральных максимумов A_i на комбинационных частотах от амплитуды модуляции a . Зависимость показана для максимумов с $i = 0, 1, 2, 3$.

появляется и на любых комбинациях частот приливного потенциала, включающих частоту радиальных колебаний. В частности, это относится и к линиям $(1, 0, -1)$, $(1, 1, -1)$, $(1, -1, 1)$, которые вследствие раздвоения каждой из них образуют гребенку линий, отчетливо видную на спектре (рис. 5б).

4.3. Спектр модуляций солнечного излучения при затмениях

Влияние Луны на атмосферу Земли проявляется посредством двух хорошо изученных механизмов. Первый — это отражение Луной части солнечного излучения; второй механизм — это затмение Солнца Луной. Нами

проведены оценки спектров вариаций облучения Земли вследствие этих механизмов.

При оценке интенсивности освещения Луной земной поверхности полагалось, что эта величина зависит от угла Φ между направлениями от Земли на Солнце и на Луну. Для вычислений использована та же система координат, что и в предыдущем разделе (рис. 4а). В этой системе координат ось z направлена перпендикулярно плоскости эклиптики (плоскости вращения Земли вокруг Солнца). Ось z совпадает с линией пересечения плоскостей орбиты Луны и эклиптики. Центр совпадает с центром Земли. Эта система координат вращается в пространстве относительно оси z с частотой SAR .

Косинус угла Φ , определяющего фазу Луны, равен

$$\cos \Phi = \cos MS \cdot \cos(M + SAR) t \cdot \cos(S + SAR) t + \\ + \sin(M + SAR) t \cdot \sin(S + SAR) t. \quad (29)$$

При вычислении спектра использована наблюдаемая зависимость яркости Луны от фазы [20]. Она достаточно существенно отличается от закона Ламберта, чтобы это обстоятельство повлияло на распределение интенсивности в различных линиях. На основе этой зависимости построены вариации во времени полного освещения Земли солнечным излучением, рассеянным поверхностью Луны. По этим вариациям построены спектры возмущений. Из трех периодов, M , S и SAR , практически в спектре участвуют только линии, соответствующие гармоникам периода $M - S$. Пики, соответствующие другим комбинациям периодов, наблюдаются, но имеют очень малую амплитуду, более чем на четыре порядка меньшую амплитуды максимумов гармоник главного периода. Это обстоятельство является следствием малости отличия от 1 величины $\cos MS$. В случае, если $\cos MS = 1$, выражение (29) для $\cos \Phi$ содержит только $\cos(M - S) t$, и зависимость от остальных частот отсутствует. Главная гармоника соответствует частоте $M - S$, вторая по интенсивности гармоника соответствует частоте $2M - 2S$ (она слабее примерно в семь раз), третья по интенсивности гармоника $3M - 3S$ по интенсивности составляет несколько процентов от главной.

Отметим одну возможную причину модуляции эффектов солнечного свечения [26, 27]. Это — вращение Земли вокруг своей оси. Вследствие этого вращения Земля отчетливо разделяется на два полушария. Обмен энергией между полушариями значительно менее эффективен, чем обмен внутри отдельного полушария. Этот эффект является главным источником сезонных вариаций температуры и давления. Для его оценки грубо можно использовать модуляцию полного потока энергии не на Земной шар, а отдельно на Северное полушарие. Такая модуляция возникает вследствие наклона оси Земли по отношению к нормали к плоскости эклиптики. Угол наклона $E = 23^\circ 26' 45''$. При этом часть энергии, попадающая на Северное полушарие, равна

$$\frac{1}{2} (1 + \sin E \cdot \cos(St + \Phi_1));$$

Φ_1 — фаза вращения Земли вокруг Солнца в момент новолуния, использованный как начало отсчета. Эта вариация ответственна за линию спектра с частотой S .

Заметим, что такая модуляция не относится к потоку солнечной энергии, отраженному на Землю лунной поверхностью. Однако и в этом случае при раздельном

анализе только потока на Северное полушарие следует принимать во внимание наклон оси вращения Земли по отношению к лунной орбите (угол EM). Дополнительная модуляция отраженного Луной излучения определяется величиной

$$\frac{1}{2} (1 + \sin EM \cdot \cos M(t + t_1)).$$

Величина EM изменяется со временем вследствие регрессии узлов лунной орбиты в пределах от $18^\circ 18'$ до $28^\circ 35'$. Изменение во времени величины синуса этого угла можно описать уравнением

$$\sin EM = \sin E \cdot \cos MS + \cos E \cdot \sin MS \cdot \cos(SAR t).$$

С учетом этого обстоятельства к отчетливым линиям на гармониках частоты $M - S$ добавляются менее интенсивные, но отчетливые линии на частотах

$$S \pm SAR, \quad M - 2S \pm SAR, \quad M \pm SAR, \\ 2M - 3S \pm SAR, \quad 2M - S \pm SAR \text{ и т. д.}$$

Наиболее интенсивные из добавленных линий (линии $S \pm SAR$ и $2M - S \pm SAR$) связаны с дополнительной модуляцией колебаний, соответствующих главной линии спектра — линии $M - S$.

Таким образом, отраженное Луной солнечное излучение приводит к периодической модуляции температуры Земли и образованию специфических линий на гармониках синодического периода. Вследствие вращения Земли вокруг своей оси появляются несколько ослабленные линии на комбинациях этих гармоник с частотами $M + SAR$ и $M - SAR$. Однако сам эффект значительно (примерно в 1000 раз) слабее, чем эффект затмений. Модуляция облучения и ее спектр показаны на рис. 6.

Ниже приведена оценка спектров лунных затмений. Предполагается, что эффект затмения — это затенение потока солнечной энергии, который освещает поверхность Земли. На сфере радиуса D (D — расстояние от Луны до Земли) этот поток формируется на площади круга O_1 с центром в точке пересечения поверхности шара, направлением от Земли к Солнцу и радиусом $R_1 = (a + (r_S - a) D/R_S)$. Здесь $a = 6370$ км — радиус Земли; $r_S = 695600$ км — радиус Солнца. Угловой размер этого круга

$$\theta_0 = \frac{R_E + (R_S - R_E) D/R_S}{D} = 0,0211.$$

При затмении часть этого круга затеняется Луной. Эта часть равна отношению площади пересечения круга O_1 с кругом O_2 , расположенной на поверхности того же шара с центром в точке пересечения шара с направлением на Луну и с радиусом r_m (r_m — радиус Луны, 1730 км). Угловой размер этого круга

$$\theta_m = \frac{r_m}{D} = \frac{1730}{384000} = 0,0045.$$

Геометрия затенения иллюстрируется на рис. 4б. В случае затенения освещение Земли уменьшается пропорционально отношению площади пересечения кругов O_1 и O_2 к площади круга O_1 . Величина этого отношения зависит от угла Φ между направлениями на Солнце и на Луну, косинус которого определяется формулой (29). На

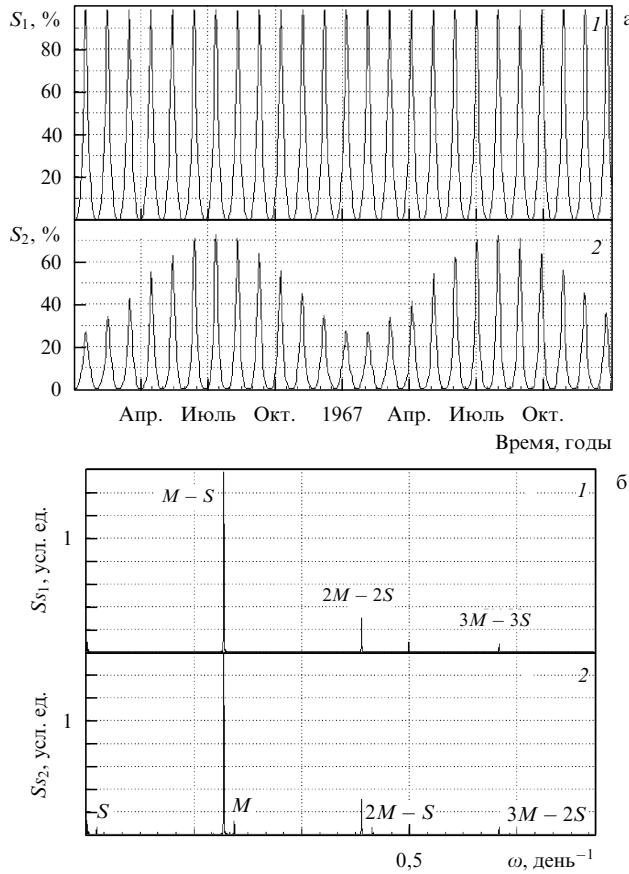


Рис. 6. (а) Модуляция интенсивности солнечного излучения, рассеянного Луной на поверхность Земли (S_1), на Северное полушарие (S_2) в процентах от максимального значения. (б) Спектр потока солнечного излучения, рассеянного Луной на Землю (S_{s1}), на Северное полушарие (S_{s2}) в условных единицах.

рисунке 4в показана зависимость затенения от фазы, использованная при вычислениях спектра. В случае $\Phi > \theta_0 + \theta_m$ эффект затенения Sh отсутствует, в случае $\Phi < \theta_0 + \theta_m$ эффект равен $Sh = (\theta_m/\theta_0)^2 = 0,0455$. В промежуточном случае эффект затенения определялся из системы уравнений

$$\begin{aligned} \theta_0 \sin \varphi_1 &= \theta_m \sin \varphi_2, \\ \theta_m(1 - \cos \varphi_1) + \theta_0(1 - \cos \varphi_2) &= \Phi, \\ Sh &= \frac{1}{\pi} (\theta_0(\varphi_1 - \sin \varphi_1) + \theta_m(\varphi_2 - \sin \varphi_2)). \end{aligned} \quad (30)$$

Временная зависимость эффекта затенения показана на рис. 6а (линия 1). Спектр этой величины показан на рис. 6б (линия 1).

Спектр состоит из набора полос с центральной частотой на гармониках частоты $M-S$, причем присутствует и полоса, соответствующая нулевой частоте. Отдельные полосы состоят из набора линий, эквидистантно расположенных с интервалом $2S+2SAR$. Каждая линия может характеризоваться двумя целыми числами: номером полосы $i = 0, 1$ и номером линии в полосе k , который может иметь положительные и отрицательные целые значения. Таким образом, частоты главных линий определяются формулой

$$\omega_{i,k} = (M-S)i + (2S+2SAR)k. \quad (31)$$

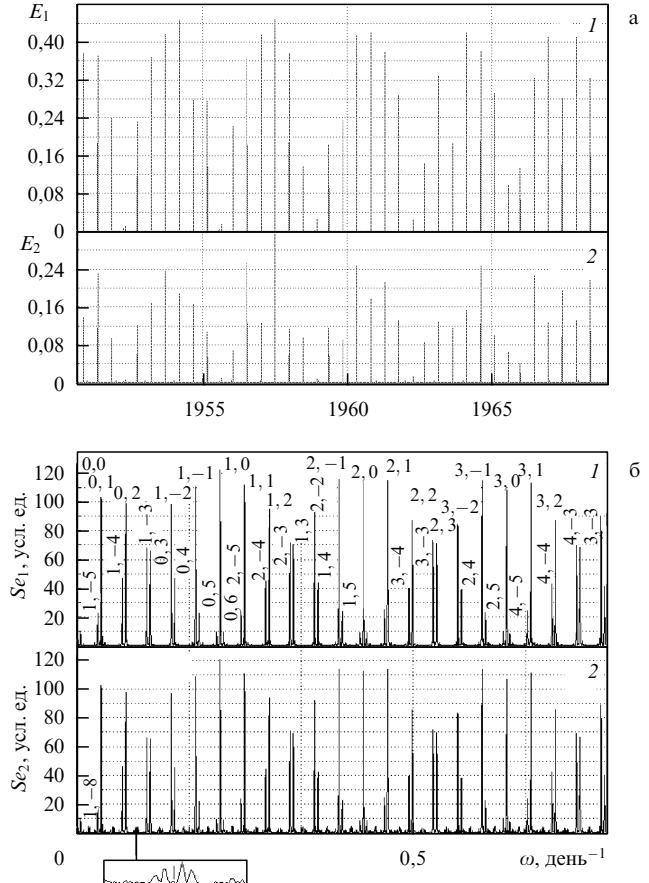


Рис. 7. (а) Зависимость от времени затенения Солнца Луной для всей Земли в целом (E_1) и для Северного полушария (E_2) (доля полного потока). (б) Спектры зависимости от времени затенения Солнца Луной для всей Земли в целом (Se_1) и для Северного полушария (Se_2) в условных единицах.

На рисунке 7б (линия 1) около отдельных линий поставлены соответствующие номера i и k . На первый взгляд, такая структура спектра достаточно неожиданна, поскольку аргумент функции $\sin \Phi$ практически сводится к периодической функции с периодом $M-S$. Отклонения от этой периодической функции имеют порядок малости $(1 - \cos SM) \sim 0,004$ и, казалось бы, спектр должен состоять из линий на гармониках частоты $M-S$, как и спектр облучения Земли рассеянным Луной светом. Существенные отклонения от такого положения дел возникают вследствие того, что функция испытывает существенные изменения на очень малом интервале $\sim \theta_0$. Для оценки количества существенных гармоник по периоду $2S+2SAR$ практически следует сравнивать величину SM с величиной θ_0 , которая примерно в три раза меньше. Поэтому примерно три гармоники по дополнительному периоду $2S+2SAR$ имеют одинаковый порядок величины. В силу характера особенности функции Sh от θ и другие линии полосы спадают по интенсивности сравнительно медленно, так что в отдельной полосе отчетливо наблюдается более 10 линий, и полосы заметно перекрываются. В месте перекрытия наблюдаются дублеты из линий близкой интенсивности. Одна из линий относится к левой полосе, другая — к правой. Щель между линиями равна $\sigma = 13S + 12SAR - M = 0,0051 \text{ день}^{-1}$. На временной зависимости дублеты спектра проявляются как

бieniaя интенсивности действия затмений с периодом $2\pi/\sigma = 1228,87$ дней.

Спектр затмений несколько модифицируется, если рассматривать модуляцию светового потока для Северного полушария. При этом интенсивность затенения, вычисленная по формуле (2), должна быть умножена на фактор $(1/2)(1 + \sin E \cdot \cos(St + \Phi_1))$. Вследствие этого для каждой линии возникают две дополнительные, сдвинутые на частоту $\pm S$ и имеющие интенсивность 4 % от интенсивности возмущаемой линии. Зависимость модуляции потока для Северного полушария показана на рис. 6а (линия 2), спектр показан на рис. 6б (линия 2). Дополнительные линии — отдельные узкие полосы, состоящие из четырех или шести линий.

Наиболее интересной особенностью является периодическая модуляция потока энергии с периодом 1229 дней (3,4 года). На спектрах эти модуляции проявляются как расщепление линий на дублеты. Спектр содержит много линий и дает достаточно материала для сопоставления с наблюдаемыми спектрами.

4.4. Сопоставление наблюдаемых линий и линий спектра затмений

Рассмотренные выше источники периодических возмущений метеорологических параметров в диапазоне периодов 10–60 дней не являются превалирующими и не составляют главных вариаций, однако они достаточно

интенсивны и могут быть отчетливо выделены при использовании спектрального анализа по рядам измерений длительностью в 20 лет и более. Факт появления этих линий убедительно свидетельствует в пользу реальности линейчатой структуры спектров и позволяет использовать все наблюдаемые линии для долгосрочного прогнозирования погоды. Отклонения от теории позволяют уточнить представления о движении Луны, что существенно для исследования эволюции Солнечной системы [28, 38].

Ниже теоретические линии спектров возмущений, созданных солнечными затмениями, и особенности спектра приливного потенциала Луны, связанные с частотной модуляцией колебаний расстояния, сопоставляются с материалами исследования спектров вариаций атмосферных параметров и уровня моря. Порядок сопоставления иллюстрируется на рис. 8. На линиях 1 и 3 в удобном для обозрения масштабе показаны теоретические спектры возмущений лунного приливного потенциала, связанных с особенностями колебаний расстояния от Луны до Земли, и при затмениях; на линиях 2, 4, 5 показаны спектры вариаций уровня моря, атмосферного давления и температуры воздуха соответственно. После выбора линии теоретического спектра (на рисунке эта линия показана небольшим квадратом) анализируются значения спектра изучаемого параметра в окрестности выделенной точки. Эта

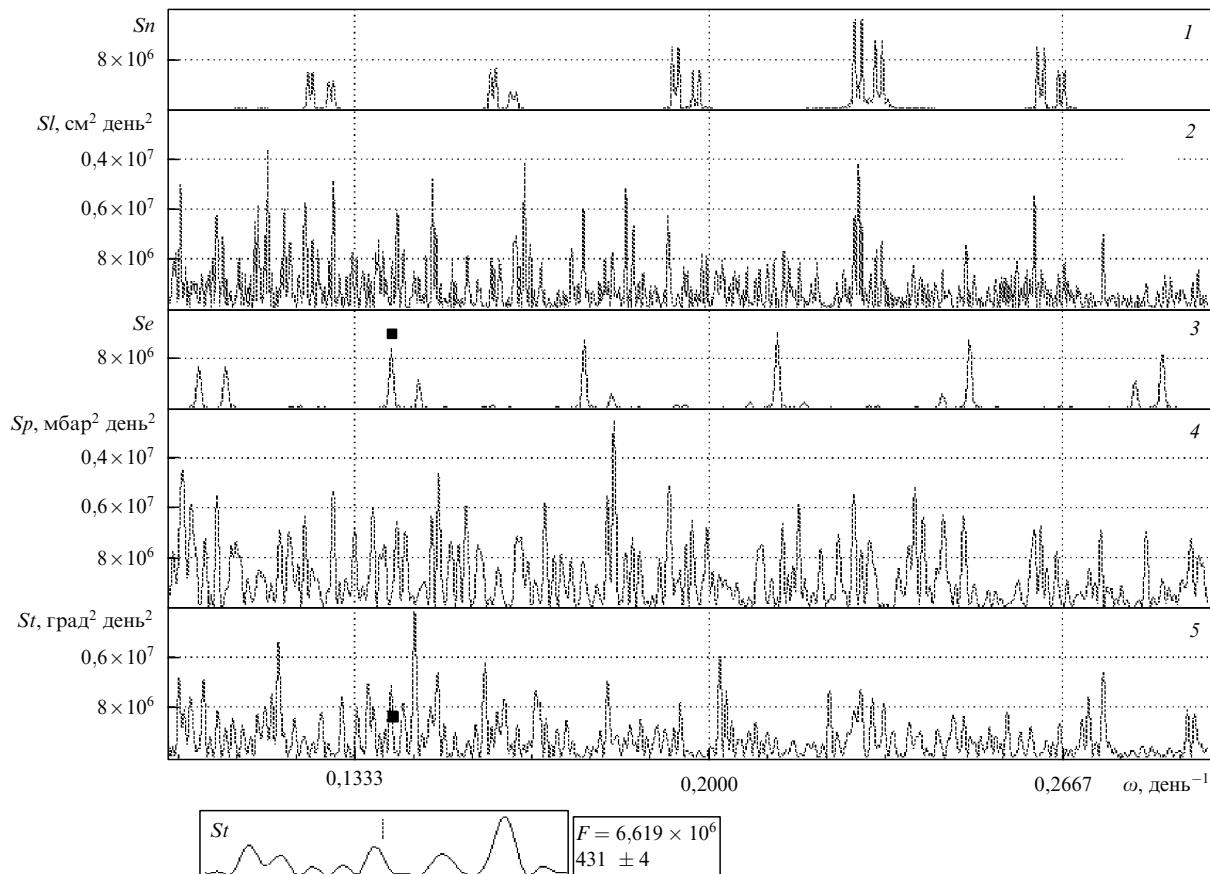


Рис. 8. Иллюстрация процедуры сопоставления максимумов спектров температуры, давления и уровня моря, соответствующих теоретическим спектрам. Квадратом указана теоретическая линия спектра затмений. На врезке в нижней части рисунка показаны вариации амплитуды спектра температуры воздуха в окрестности теоретического пика. Линия 1 — спектр Sn приливного потенциала Луны с учетом частотной модуляции радиальных колебаний; 2 — спектр Sl вариаций уровня; 3 — спектр Se затмений; 4, 5 — спектры Sp и St атмосферного давления и температуры воздуха.

окрестность в увеличенном масштабе показана на врезке в нижней левой части рисунка. Частота выделенной точки соответствует вертикальной линии в верхней части врезки.

Для сопоставления выбирается ближайший максимум к выделенной точке или (если расстояния до максимумов слева и справа одинаковы) наибольший из ближайших максимумов. С графиков снимаются значения амплитуды и частоты максимума, которые и составляют данные табл. 5 и табл. 6. В таблице 5 анализируются линии спектра вариаций уровня моря в точке Холмск, спектр вычислен по интервалу 40 лет. В таблице 6 анализируются линии спектров вариаций температуры воздуха и атмосферного давления в точке Терней за период 18 лет с разрешением 10^{-4} с $^{-1}$. Результаты сопоставления представлены раздельно для линий приливов и линий лунных затмений.

Результаты сопоставления приливных линий со спектром вариаций уровня собраны в табл. 5. Каждая линия характеризовалась числами i, j, k, l и знаком + или -. Характеристики линий i, j, k, l связаны с частотой линии ω посредством соотношения $\omega = i\omega_1 + j\omega_3 + k\omega_4 + l\omega_2 \pm \beta$. Анализировались только главные линии с $i = 0$ и $i = 1$. Знак в индексе линии соответствует знаку в формуле; β — амплитуда модуляции частоты радиальных колебаний. Для каждой линии вычислялся период и амплитуда максимума при дискретном представлении зависимости с шагом по частоте $0,98 \times 10^{-4}$ день $^{-1}$.

В таблице 6 анализируются только максимально интенсивные линии спектра затмений, те линии, которые составляют дублеты на частотах $i(M - S) + k(2S + 2SAR)$. Параметры линии i и k приведены во втором столбце таблицы. В третьем и четвертом столбцах приведены теоретические период в днях и

интенсивность в условных единицах, соответствующие этой линии.

Спектры вычислялись в единицах, используемых в ДВНИИГМИ. Для уровня моря это 0,1 см, для температуры 0,1°, для давления 0,1 мбар. Единица времени — 1 день.

Отметим следующие особенности.

1. Расхождения оценок периодов не превосходят нескольких единиц последнего знака. Для вариаций уровня отклонения несколько меньше, чем для вариаций температуры и атмосферного давления.

2. Для периодов меньше 40 дней положение максимумов спектра вариаций параметров атмосферы и вариаций уровня моря практически точно совпадают с теоретическими оценками. Отклонения для меньших частот, возможно, связаны с погрешностями вычислений, сделанных с недостаточным разрешением по частоте. Однако возможна также ошибочная интерпретация низкочастотных максимумов, амплитуда которых в десятки раз превосходит теоретические оценки.

3. Наблюдаются отчетливые различия оценок относительных амплитуд отдельных линий. Эти различия очень существенны для спектров температуры и давления и менее существенны для спектра вариаций уровня (рис. 8 линия $S1$). С моей точки зрения, эта особенность обусловлена зависимостью проявления затмения от места расположения точки наблюдения. Эта зависимость более существенна для атмосферных явлений и менее существенна для вариаций уровня моря.

4. Как правило, интенсивность линии спектра вариаций атмосферных параметров в несколько раз больше теоретической оценки этой величины.

Этому обстоятельству, по-видимому, не следует особенно удивляться. Если мы сравним интенсивность

Таблица 5. Линии спектра приливного потенциала и линии спектра вариаций уровня моря*

№	Множители в комбинации частот i при ω_1 , j при ω_3 , k при ω_1 , l при ω_2 . В столбце l знак после числа соответствует знаку при девиации частоты β				Теоретическая оценка характеристик линии: 1 — период (сут), 2 — амплитуда спектра (см 2 день $^{-2}$)		Оценка характеристик наблюдаемой линии: 3 — период (сут), 4 — амплитуда спектра (см 2 день $^{-2}$)	
	i	j	k	l	1	2	3	4
1	0	1	0	-3-	50,51	5,9	50,71	16,0
2	0	1	0	-3+	50,15	5,8	50,15	11,0
3	0	1	0	-2-	39,58	6,2	39,55	7,8
4	0	1	0	-2+	39,33	6,4	39,38	6,0
5	0	1	0	-1-	32,55	10,0	32,65	12,0
6	0	1	0	-1+	32,36	9,7	32,36	2,3
7	0	1	0	0-	27,63	14,0	27,63	14,8
8	0	1	0	0	27,55	3,8	27,55	22,0
9	0	1	0	0+	27,46	14,0	27,46	12,0
10	0	1	0	1-	23,99	9,9	23,99	4,1
11	0	1	0	1+	23,88	9,8	23,90	4,9
12	1	-1	0	-3-	48,96	4,25	48,91	7,5
13	1	-1	0	-3+	48,63	4,25	48,63	20,0
14	1	-1	0	-2-	38,62	2,35	38,49	10,0
15	1	-1	0	-2+	38,39	2,6	38,39	11,0
16	1	-1	0	-1-	31,90	6,0	31,95	4,0
17	1	-1	0	-1+	31,71	6,0	31,64	8,6
18	1	-1	0	0-	27,16	10,5	27,14	8,5
19	1	-1	0	0+	27,01	11,0	27,02	11,0
20	1	-1	0	1-	23,64	6,0	23,64	5,3
21	1	-1	0	1+	23,53	6,0	23,53	7,3

* $\omega_1 = 2\pi/27,332 = 0,2299$ день $^{-1}$, $\omega_2 = 2\pi/365,25 = 0,0172$ день $^{-1}$, $\omega_3 = 2\pi/27,555 = 0,2280$ день $^{-1}$, $\omega_4 = 2\pi/6585,32 = 0,00095$ день $^{-1}$, $\beta = 0,00045$ день $^{-1}$. Оценки значения максимума амплитуды спектров умножаются на 10^6 .

Таблица 6. Сопоставление линий спектра затмений со спектрами вариаций уровня моря, атмосферного давления и температуры

№	Спектр затмений			Вариации уровня моря		Вариации давления		Вариации температуры	
		период	амплитуда	период	амплитуда	период	амплитуда	период	амплитуда
1	-1, 6	1230	0,9	1254,9	2×10^7	1333	$8,3 \times 10^7$	1255	$5,1 \times 10^7$
2	1, -5	202,5	2,1	203,17	$2,8 \times 10^7$	201,2	16×10^7	205	15×10^7
3	0, 1	173,9	10,0	172,04	$1,95 \times 10^7$	173,9	52×10^7	171	34×10^7
4	1, -4	93,02	4,5	92,48	7×10^6	93,43	12×10^7	92,75	11×10^7
5	0, 2	86,48	9,7	85,56	13×10^6	85,2	15×10^7	85,21	22×10^7
6	1, -3	60,60	6,6	60,26	6×10^6	59,8	20×10^7	59,98	12×10^7
7	0, 3	57,76	6,5	57,70	$4,9 \times 10^6$	58,44	28×10^7	57,7	$4,6 \times 10^7$
8	1, -2	44,81	9,6	44,78	$7,5 \times 10^6$	44,47	26×10^7	44,81	11×10^7
9	0, 4	43,24	4,5	43,24	$4,7 \times 10^6$	42,95	$8,5 \times 10^7$	43,06	$3,4 \times 10^7$
10	1, -1	35,63	10,0	35,65	16×10^6	35,63	14×10^7	35,45	$1,6 \times 10^7$
11	0, 5	34,63	2,2	34,59	20×10^6	34,48	59×10^7	34,68	11×10^7
12	2, -6	30,2	1,0	30,24	$1,05 \times 10^6$	30,21	$2,8 \times 10^7$	30,24	$4,2 \times 10^7$
13	1, 0	29,52	12	29,37	$9,1 \times 10^6$	29,35	27×10^7	29,52	3×10^7
14	0, 6	28,88	0,6	28,78	$1,2 \times 10^6$	28,78	$9,4 \times 10^7$	28,86	$0,6 \times 10^7$
15	2, -5	25,76	2,3	25,69	$1,9 \times 10^6$	25,71	29×10^7	25,81	$4,5 \times 10^7$
16	1, 1	25,23	11,0	25,30	$8,5 \times 10^6$	25,29	28×10^7	25,17	$2,6 \times 10^7$
17	2, -4	22,40	4,0	22,37	$1,9 \times 10^6$	22,32	$1,4 \times 10^7$	22,43	$0,1 \times 10^7$
18	1, 2	22,00	9,3	21,98	5×10^6	21,97	9×10^7	21,97	$0,26 \times 10^7$
19	2, -3	19,85	7,0	19,89	$4,9 \times 10^6$	19,85	19×10^7	19,82	$2,2 \times 10^7$
20	1, 3	19,53	6,9	19,54	$1,9 \times 10^6$	19,53	14×10^7	19,52	$7,4 \times 10^7$
21	2, -2	17,81	7,3	17,80	$2,7 \times 10^6$	17,82	12×10^7	17,81	$4,6 \times 10^7$
22	1, 4	17,54	4,2	17,54	$0,3 \times 10^6$	17,55	10×10^7	17,53	$3,4 \times 10^7$
23	2, -1	16,14	11,0	16,09	$8,1 \times 10^6$	16,14	13×10^7	16,18	$5,5 \times 10^7$
24	1, 5	15,93	2,2	15,91	$1,2 \times 10^6$	15,90	18×10^7	15,89	$5,3 \times 10^7$
25	3, -6	14,93	0,85	14,90	4×10^6	14,92	$3,4 \times 10^7$	14,92	$1,6 \times 10^7$
26	2, 0	14,76	11,2	14,73	$4,9 \times 10^6$	14,72	24×10^7	14,73	16×10^7
27	1, 6	14,58	0,83	14,57	$4,0 \times 10^6$	14,57	7×10^7	14,57	$2,6 \times 10^7$
28	3, -5	13,75	2,4	13,74	$6,9 \times 10^6$	13,76	10×10^7	13,76	$4,4 \times 10^7$
29	2, 1	13,61	11,0	13,56	$6,2 \times 10^6$	13,56	16×10^7	13,58	$8,9 \times 10^7$
30	3, -4	12,74	4,0	12,75	$4,5 \times 10^6$	12,71	$8,5 \times 10^7$	12,73	$1,9 \times 10^7$
31	2, 2	12,61	7,9	12,62	$2,3 \times 10^6$	12,62	$9,2 \times 10^7$	12,61	$4,8 \times 10^7$
32	3, -3	11,86	7,1	11,86	$4,2 \times 10^6$	11,86	10×10^7	11,87	$4,2 \times 10^7$
33	2, 3	11,75	6,9	11,74	$3,2 \times 10^6$	11,72	$9,2 \times 10^7$	11,75	$2,8 \times 10^7$
34	3, -2	11,11	8,32	11,105	$3,2 \times 10^6$	11,11	$3,6 \times 10^7$	11,12	$6,7 \times 10^7$
35	2, 4	11,01	3,8	11,00	$1,7 \times 10^6$	11,00	$6,3 \times 10^7$	11,01	$2,8 \times 10^7$

сезонных и суточных вариаций атмосферных параметров, то увидим, что при формировании сезонных вариаций изменения теплового потока Солнца примерно в три раза менее эффективны. Это общее свойство атмосферных процессов, которые нивелируют пространственные вариации, обусловленные внешними по отношению к атмосфере факторами. Эта нивелировка существенное для сезонных вариаций, однако она достаточно велика и для суточных вариаций.

Таким образом, модуляция солнечного излучения при затмениях приводит к появлению строго периодических линий спектров вариаций атмосферного давления и температуры воздуха на частотах $\omega_{i,k} = (M - S)i + (2S + SAR)k$, а модуляция частоты радиальных колебаний Луны с частотой $2S$ и с амплитудой $\beta = 4 \times 10^{-4}$ день $^{-1}$ приводит к расщеплению всех линий лунного прилива на дублеты с щелью, равной 2β , и к появлению дополнительных дублетов на комбинациях основной частоты и частоты $2S$. Эти линии отчетливо наблюдаются на спектрах атмосферного давления, температуры воздуха и вариаций уровня моря, которые, очевидно, являются физическим фактом, а не "ложными максимумами, связанными со специфическими свойствами спектров". Однако это не главные линии, наблюдается еще много линий неизвестного происхождения, которые, если полагаться только на материалы наблю-

дения, нисколько не уступают исследованным. Они также могут быть использованы для построения долгосрочного прогноза на времена, определяемое только шириной линии.

Более того, оценка таких спектров климатологических характеристик дает интересную информацию для астрономических исследований, в частности, для исследования эволюции системы Луна – Земля [28]. В рассмотренном случае это — информация о частотной модуляции колебаний расстояния от Земли до Луны. В этом направлении результаты могут быть усилены. В частности, на основе оценки амплитуды линии на частоте $2\omega_1 + 2\omega_2$ удается получить оценку амплитуды частотной модуляции частоты вращения Луны. Эта линия отчетливо разрешается от близкой линии, связанной с эффектами затмения, $2\omega_1 + 2\omega_2 + 4\omega_4$. Она появляется как комбинационная линия, связанная с главной приливной компонентой на частоте $2\omega_1$. При используемом времени наблюдения расщепление центральной линии не наблюдается и комбинационная линия слаба. Для оценки отношения ζ амплитуд спектра на первой комбинации и на основной частоте можно использовать оценку $\zeta \cong (\delta\omega_\varphi T)^2/16$. Эта линия отчетливо наблюдается на спектре вариаций уровня, и отношение ζ имеет значение $3,2 \times 10^{-3}$. Для амплитуды $\delta\omega_\varphi$ получаем оценку $1,56 \times 10^{-5}$ день $^{-1}$, которая вполне согласуется с

теоретической $2,6 \times 10^{-5}$ день $^{-1}$. Учитывая то обстоятельство, что рассматривается небольшой максимум, расположенный не слишком далеко от более сильных, такое совпадение следует рассматривать как вполне удовлетворительное.

5. Влияние когерентных колебаний давления на формирование погоды

5.1. Прогноз развития вариаций

Главное достоинство чисто периодических вариаций состоит в том, что такие вариации точно прогнозируются на много времени вперед. Такие вариации выделяются при наблюдениях как появление узких спектральных линий, ширина которых определяется длительностью интервала времени, использованного для вычисления спектра. Как показывают приведенные спектры вариаций атмосферного давления и температуры воздуха, такие линии содержат до 50 % энергии сигнала, из которого вычленены сезонные вариации. Прогноз вариаций $y(t)$ осуществляется путем вычисления суммы ряда гармонических составляющих:

$$y(t) = \sum A_i \cos(\omega_i t - \varphi_i). \quad (32)$$

Частоты ω_i отдельных компонент определяются по положению узких максимумов спектра, амплитуды A_i определяются по значению спектра в максимуме, для вычисления фазы проводится дополнительный анализ, определяются отдельно синус- и косинус-составляющие спектра и по их отношению определяется величина фазы. Такой метод прогноза предложен еще Лапласом [7] и используется при прогнозировании приливных вариаций уровня моря. При таком прогнозе нет необходимости понимать природу вариаций, однако такое понимание существенно содействует доверию. Такой прогноз реализован в виде программы на языке Турбо Паскаль. Программа позволяет использовать ряды значений исходных вариаций в 7800 точках и выводит значения прогноза на 2000 расчетных точек вперед. Для вычисления спектра используется представления фурье-образа суммой полинома от комплексной переменной

$$z = \cos(\omega\delta T) + i \sin(\omega\delta T),$$

где δT — интервал дискретизации сигнала. Для вычисления значения полинома большой степени используется известная процедура Ноггер [29], время вычисления одного спектра не превосходит 2 мин (Pentium, 133 МГц). Для прогнозирования вычисленный по исходным данным спектр выводится на экран дисплея, и оператор в интерактивном режиме выбирает максимумы i , которые используются при построении прогноза по формуле (32). Качество такого прогноза проиллюстрировано на рис. 9, где на линиях 4 и 6 сравниваются реально наблюдаемые и прогнозируемые вариации атмосферного давления в точке Терней.

Проведенный выше анализ показывает, что долговременные (с периодами более 10 дней) вариации атмосферного давления могут быть прогнозированы заблаговременно на несколько лет вперед. Однако эти вариации сами по себе не составляют полного представления о погоде. В технических и бытовых целях главными являются вопросы, будет ли дождь и какова сила ветра.

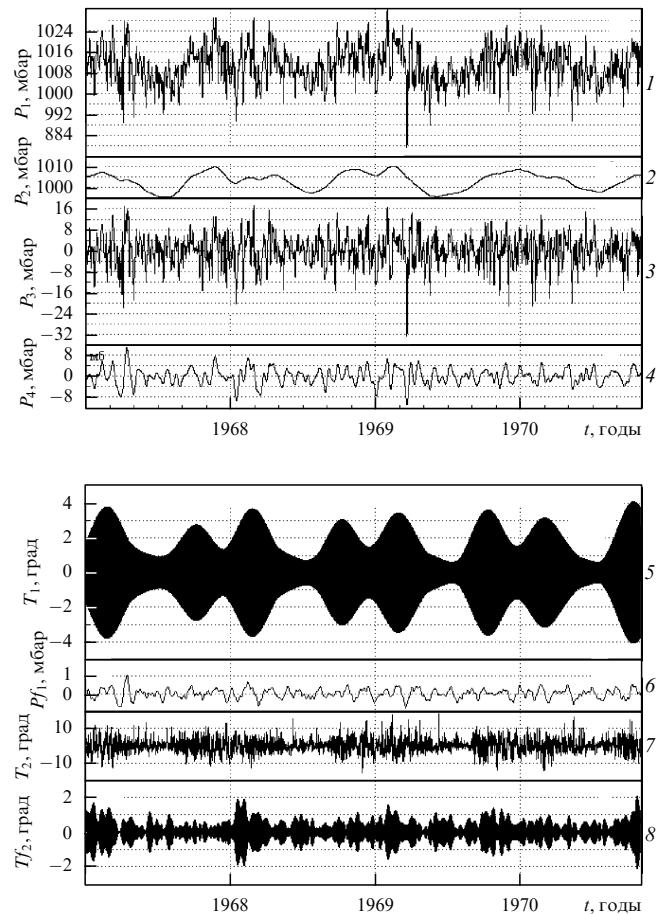


Рис. 9. Сопоставление вариаций атмосферного давления $P(t)$ и суточных вариаций температуры $T(t)$ в точке Терней. P_1 — вариации атмосферного давления; P_2 — сезонный ход вариаций давления, полученный слаживанием по интервалу 60 дней; P_3 — отклонения вариаций давления от суточного хода; P_4 — результат слаживания отклонений вариаций давления по интервалу 10 дней; T_1 — сезонный ход вариаций суточного хода температуры; Pf — прогноз отклонений вариаций давления, построенный по параметрам 20 наиболее интенсивных узких линий спектра в диапазоне периодов от 60 до 10 дней; T_2 — отклонения суточного хода вариаций температуры от усредненного сезонного хода; Tf — прогноз отклонений суточного хода температуры от среднесезонного хода. Точка Терней. Время t в годах.

Возможности качественного ответа на первый из этих вопросов анализируются в настоящем разделе.

5.2. Тонкая структура спектрального максимума колебаний температуры атмосферы на периоде 1 сут

В основном прогноз погоды сводится к ответу на вопрос: будет дождь или не будет? Достаточно убедительным признаком дождливой погоды является величина суточной амплитуды [31], т.е. разности между температурами самого холодного и самого теплого часа одного дня. Величина суточной амплитуды зависит от характера погоды. Она в 2 раза больше при тихой, ясной погоде, чем при пасмурной и ветреной. Поэтому вариации погоды приводят к модуляции суточных колебаний. Модуляция приводит к формированию тонкой структуры спектра температурных вариаций в окрестности узкой спектральной линии на частоте $DN = 2\pi$ день $^{-1}$, соответствующей периоду 1 сут.

Сравнительно медленные синоптические и сезонные процессы проявляются как усложнение контура спектральной линии. Если процесс носит строго периодический характер и влияет на погодные условия, то в окрестности этой линии должны появиться дополнительные линии на комбинациях частоты DN и гармоник частоты этого процесса. То есть обнаружение тонкой линейчатой структуры спектрального максимума вариаций температуры на частоте DN позволяет выделить периодические процессы, влияющие непосредственно на формирование погоды. Появление такой структуры является важным свидетельством физической реальности колебаний, приводящих к появлению линий спектра вариаций давления.

Исследование тонкой структуры спектра температуры в окрестности суточного максимума на материалах наблюдения вариаций температуры воздуха в точке Терней с 1966 г. по 1984 г. представлено в настоящем разделе. Материалы наблюдений заданы как последовательность значений температуры, измеренных ежедневно в 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ч. В качестве спектра функции $y(t)$, как и прежде, рассматривалась величина

$$Sy(\omega) = \left| \int y(t) \exp(i\omega t) dt \right|^2.$$

Исходя из возможностей программы спектр вычислялся по значениям, усредненным за 6 ч наблюдения. Данные выводились с разрешением по частоте $0,000392$ день $^{-1}$.

На рисунке 10а показан спектр для точки Терней за 5 лет наблюдения — с 1967 г. по 1972 г. Спектр содержит интенсивную линию на частоте D . Она соответствует колебаниям с периодом в 1 сут с амплитудой $2,56^\circ$ или с суточным ходом $5,12^\circ$. В окрестности этой линии наблюдаются еще несколько пиков с интенсивностью, примерно в 10 раз меньшей. Это пики, соответствующие комбинационным частотам суточных вариаций с гармониками периода в 1 год. Все остальные особенности спектра на таком графике практически не наблюдаются.

Для иллюстрации тонкой структуры из вариаций температуры вычтены усредненные суточные колебания, параметры которых оценены по амплитуде и фазе главного максимума. Спектр вариаций после вычитания суточной гармоники показан на рис. 10б. Главная часть спектра — это семь почти эквидистантно расположенных линий. Параметры линий — период и амплитуда — показаны в табл. 6. Частота линий с точностью до единицы разрешения совпадает с комбинациями $D - 3S$, $D - 2S$, $D - S$, D , $D + S$, $D + 2S$, $D + 3S$. Кроме этих линий наблюдаются и другие достаточно интенсивные вариации, особенности спектра которых плохо иллюстрируются на их фоне. Для иллюстрации из материалов наблюдения вычтены чисто периодические колебания на частотах $D - 4S$, $D - 3S$, $D - 2S$, $D - S$, $D + S$, $D + 2S$, $D + 3S$, $D + 4S$ с амплитудами и фазами, вычисленными по спектру рис. 10б (табл. 7).

Временные вариации вычтенных осцилляций показаны на рис. 9 (линия 5). Эти вариации представляют усредненные значения сезонных изменений суточного хода температуры атмосферы в точке Терней. Отчетливо просматриваются весенний и осенний максимумы. На основе таких представлений можно делать долговременные прогнозы, однако такие прогнозы очень неполны. Непрогнозируемая часть вариаций показана на линии 7 (см. рис. 9). Она весьма и весьма существенна.

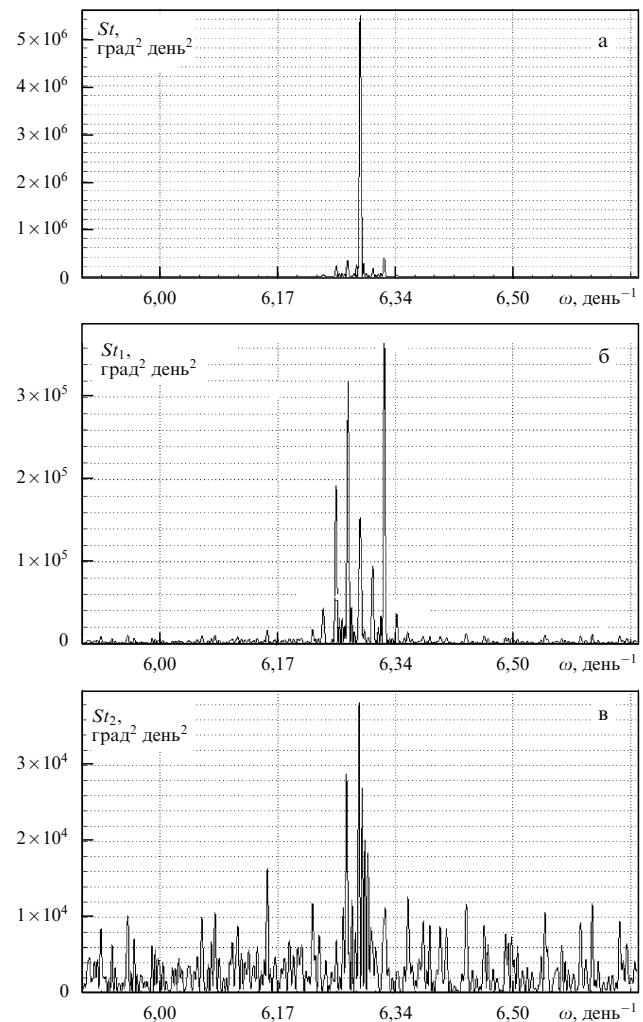


Рис. 10. (а) Спектр $St_1(\omega)$ вариаций температуры атмосферы в точке Терней за 1967–1972 гг. в окрестности частоты суточных колебаний 2π . (б) Спектр $St_1(\omega)$ после вычитания периодической компоненты, соответствующей параметрам максимума на частоте 2π . (в) Спектр St_2 вариаций после вычитания гармоник, соответствующих комбинациям частот суточного периода и периода в 1 год. Параметры линий приведены в табл. 7. Частота ω в день $^{-1}$.

Таблица 7. Параметры спектральных линий на комбинации частот суточных колебаний и гармоник периода в 1 год

	Фаза, рад	Период, день $^{-1}$	Амплитуда, град
$D - 3S$	-1,4042	6,2316	0,22359
$D - 2S$	-1,4172	6,2492	0,52503
$D - S$	0,6570	6,2653	0,63580
D	0,7246	6,2830	2,56539
$D + S$	-1,4349	6,3015	-0,45818
$D + 2S$	0,0831	6,3168	-0,68915
$D + 3S$	-0,2569	6,3344	-0,20403

Спектр сигнала, полученного после вычитания усредненного сезонного хода, показан на рис. 10в. Отчетливо выделяются отдельные спектральные линии, меньшие, но сравнимые по амплитуде с максимумами спектра сезонных вариаций. Линии имеют очень небольшую ширину, практически определяемую длительностью выбранного для анализа интервала наблюдения. Наличие таких линий говорит о существовании долговре-

менно действующих строго периодических процессов, участвующих в формировании погоды. Роль этих процессов достаточно велика. Существование строгой периодичности позволяет надеяться на существенное улучшение возможностей долговременного прогноза погоды. Положение линий и их пространственная изменчивость позволяют рассчитывать на успех при исследовании природы источника вариаций погоды. Однако цель предпринятого исследования несколько скромнее. Мы хотим убедиться в том, что строго периодические процессы, приводящие к узким максимумам спектра атмосферного давления, это те самые процессы, которые приводят к вариациям погоды. Чтобы это обнаружить, сравниваются спектры вариаций атмосферного давления и тонкая структура суточного максимума спектра вариаций температуры воздуха. Анализ проводится на материалах наблюдения в точке Терней с 1967 г. по 1972 г.

5.3. Синоптическая изменчивость атмосферного давления и суточных вариаций температуры

Вариации атмосферного давления в точке Терней (линия 1) с 1967 г. по 1972 г. и та часть вариаций, которая может быть предсказана (линия 5), показаны на рис. 9. На том же рисунке показан вычисленный сезонный ход, полученный сглаживанием по интервалу 60 дней (линия 2). Для анализа изменчивости погоды (синоптической изменчивости) построена величина разности вариаций давления и сезонной зависимости (линия 3). Большой интервал сглаживания (60 дней) выбран, чтобы включить в анализ достаточно сильные вариации, обусловленные солнечными затмениями. В нашем анализе рассматриваются только вариации с характерными временами более 10 дней, т.е. прогнозированная зависимость должна сравниваться с синоптической изменчивостью, сглаженной по интервалу 10 дней. Эта величина показана на линии 4. Сравнивая эту характеристику с прогнозом, построенным на интерпретации спектральных максимумов по формуле (32) (линия 6), видно, что эти вариации прогнозируются достаточно точно как по времени появления минимумов и максимумов (циклоны и антициклоны), так и по амплитуде (время прогноза — 4 года). На линии 5 того же рисунка показана сезонная изменчивость суточного хода вариаций температуры, построенная по параметрам спектральных линий на комбинациях суточных колебаний и гармоник периода 1 год, параметры которых — фаза, период и амплитуда — выписаны в табл. 7. Видно, что для сезонных вариаций сохраняется известная закономерность: увеличению атмосферного давления соответствует увеличение амплитуды суточных вариаций температуры, уменьшению давления соответствует уменьшение этой величины.

На линии 7 рис. 9 показаны отклонения суточного хода вариаций температуры от усредненного сезонного хода. Максимальные отклонения соответствуют временем прохождения циклонов и антициклонов через точку наблюдения, что проявляется как совпадения времен появления максимумов и минимумов кривой синоптической изменчивости атмосферного давления (линия 4) с максимумами кривой отклонения суточного хода температуры (линия 7).

На линии 8 показан прогноз отклонений суточного хода вариаций температуры от усредненного сезонного хода, построенный на основе 19 максимальных линий

спектра в диапазоне частот $5,89 - 6,7 \text{ день}^{-1}$. Параметры этих линий выписаны в табл. 8. Сравнивая кривые 7 и 8, видим, что такой прогноз оправдывается хуже, чем прогноз вариаций атмосферного давления (линия 6). Если времена наступления погодных аномалий прогнозируются достаточно достоверно, то амплитуды прогнозируемых вариаций в несколько раз меньше реальных.

Таблица 8. Параметры спектральных линий на максимальных по амплитуде узких линиях

№	Фаза, рад	Частота, день^{-1}	Амплитуда, град
1	-0,5936	5,9154	-0,10206
2	1,0060	5,9535	-0,11169
3	-1,2831	6,0588	-0,11050
4	-0,0191	6,0772	0,10979
5	0,0457	6,1514	-0,13856
6	-0,6553	6,2151	-0,12876
7	0,3154	6,2504	-0,14811
8	-0,1093	6,2638	-0,27176
9	-1,3469	6,2826	0,44279
10	-1,0729	6,3011	0,24183
11	-1,2945	6,3148	0,20258
12	-0,4720	6,3513	0,12898
13	1,3498	6,3820	-0,10163
14	-0,9667	6,3965	0,10485
15	0,0642	6,4334	0,11917
16	1,1096	6,4585	-0,10308
17	0,1916	6,5449	-0,11068
18	1,5000	6,5956	-0,10552
19	0,2073	6,6121	-0,11858

Соответствие вариаций атмосферного давления и тонкой структуры пика суточных вариаций температуры более отчетливо просматривается при сопоставлении спектров этих величин. Факт совпадения соответствующих линий однозначно свидетельствует в пользу физической реальности обнаруженных колебаний, так как эти колебания приводят к реальному физическому процессу — модуляции суточного хода температуры. Факт совпадения линий с частотами спектра солнечных затмений показывает, что солнечные затмения являются одним из важных факторов формирования погоды на Земле.

На рисунке 11а сравниваются тонкая структура спектра суточных вариаций температуры и спектр колебаний давления в диапазоне периодов от 16 дней и более. Нуевая точка спектра давлений совмещена с 2π ; в сторону частот, меньших 2π , спектр продолжен по правилу $S(2\pi - \delta) = S(2\pi + \delta)$. Оба спектра линейчатые, содержат довольно большое количество узких линий. Ширина отдельной линии примерно в 20–30 раз меньше расстояния между линиями. Совпадение линий неочевидно, поскольку совпадение неполное. Более убедительно совпадение линий иллюстрируется на кривой зависимости от частоты произведения спектров. В случае совпадения линий одновременно должна наблюдаваться как на произведении спектров, так и на самом спектре. Такое сопоставление проведено на рис. 11б. На линии 1 показан спектр вариаций давления, на линии 2 — произведение спектров вариаций давления и спектра температуры. Отчетливо выделяются совпадающие линии, их несколько меньше, чем просто линий спектра давления.

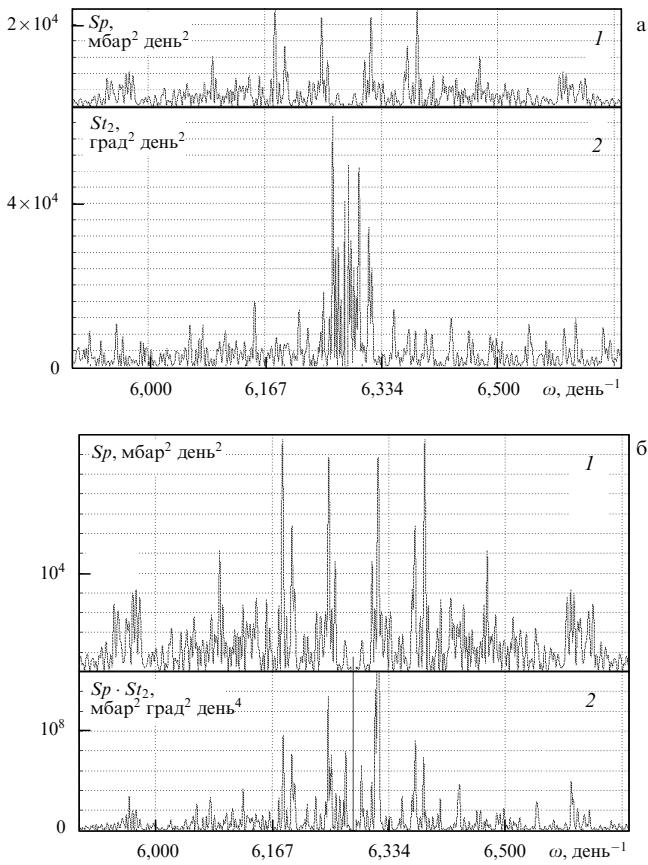


Рис. 11. (а) Сравнение спектров вариаций атмосферного давления Sp в диапазоне периодов, меньших 16 дней, и тонкой структуры спектра вариаций температуры St_2 в окрестности периода 1 день (частота 2π). Ось частот для спектра давления смещена на величину 2π день $^{-1}$; (б) произведение $Sp \cdot St_2$ спектров вариаций температуры и атмосферного давления (линия 2). Точка Терней, 1967–1972 гг. Для сравнения показан спектр атмосферного давления Sp (линия 1). Частота ω в день $^{-1}$.

Не все линии произведения спектров расположены симметрично относительно частоты 2π . При меньших частотах линий больше. Это обстоятельство показывает, что на частотах от 5,8 до 6,28 встречаются не только линии тонкой структуры, наведенной периодическими процессами, но также линии тонкой структуры, не связанные с модуляцией суточных колебаний. В поисках наиболее убедительных сопоставлений наибольший интерес представляют узкие линии с частотой, большей 6,28. Они интерпретируются как модуляция суточных колебаний температуры периодическими процессами. Периоды модуляции выписаны ниже. Единица измерения 1 сут. Это 421; 210; 177; 161; 85,6; 71; 68; 60,6; 58; 49,2; 40,3; 35,0; 33,8; 30,0; 29,4; 28,6; 27,5; 25,9; 23,6; 22,03; 21,6; 19,9; 16. Значительная часть из этих линий легко узнается — это линии спектра возмущений солнечного излучения, вызванных затмениями Солнца. Надежно опознаются линии, соответствующие периодам 177 дней (0,1); 85,6 (0,2); 60,6 (1, -3); 58 (0,3); 35,0 (1, -1); 30,0 (1, 0); 25,9 (1, 1); 22,0 (1, 2); 19,9 (2, -3); 16,0 (2, -1). В скобках указаны обозначения линий из табл. 6. Также наблюдаются линии с периодами 29,4 и 27,5 дней, синодическим и сидерическим периодами вращения Луны. Более точная оценка положения линий не может быть проведена

вследствие ограниченности использованной длительности интервала наблюдения.

Таким образом, периодические процессы, обнаруживаемые как линейчатая структура спектра вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов от 10 дней до нескольких лет, влияют на формирование погоды. Это влияние просматривается при анализе суточных вариаций температуры. Оно проявляется как тонкая структура спектрального пика вариаций температуры в окрестности частоты 2π день $^{-1}$, которая содержит несколько серий спектральных линий. Главная серия — это линии на частотах $2\pi \pm kS$ день $^{-1}$ ($k = 1, \dots, 4$). Эти линии описывают сезонные изменения суточных вариаций. Вторая серия — это линии на частотах $i(M-S) \pm k(2S + 2SAR)$ ($i = 0, \dots, 4$, $k = \pm 1, 2, 3$), связанные с затмениями Солнца. Линии fi спектра вариаций атмосферного давления (в диапазоне периодов от нескольких дней до нескольких месяцев) также проявляются на спектре вариаций температуры на частотах $2\pi \pm fi$. Моделирование суточных вариаций температуры по параметрам линий (амплитуде и фазе) позволяет описать времена появления и магнитуды проходящих циклонов за время в 4 года с временным разрешением 10 дней.

Таким образом, наблюдаемые линии спектра атмосферного давления есть следствие реально существующих физических процессов. Они не являются фикцией, обусловленной математическими издержками построения спектров. Колебательные процессы, фиксируемые как острые максимумы спектра вариаций атмосферного давления, — это реальные физические высокодобротные колебания, которые вызывают колебания суточного хода температуры на тех же частотах. Последнее означает, что вариации погоды содержат интенсивную чисто периодическую компоненту, которая с высокой достоверностью может быть предсказана на несколько лет вперед. Заметим, что значительные вариации погоды связаны с действием Луны (солнечными затмениями).

6. Периодические колебания климата

6.1. Вводные замечания

Наличие узких линий в спектре вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов 10–100 дней позволяет прогнозировать эти вариации на несколько лет вперед и заблаговременно определять времена и интенсивность циклонов и антициклонов, что представляет интерес для долгосрочного прогноза погоды. На рисунке 10в видно, что отдельные узкие спектральные линии появляются и в непосредственной окрестности суточного пика спектра температуры воздуха. Они соответствуют периодам модулирующих возмущений 100 дней и более. Такие вариации существуют и представляют значительный интерес при прогнозе рыболовства [31] и сельскохозяйственной деятельности. Они отчетливо наблюдаются на колебаниях биологической активности. Пример таких наблюдений иллюстрируется на рис. 12а (линия 1), где показаны вариации ширины годовых колец дерева. Они проявляются как вариации среднегодовой температуры (рис. 12а, линия 3, точка Абасири, Охотское море [32]), как вариации интенсивности и времени существования ледяного покрова Охотского моря (рис. 12а, линия 2 [32]).

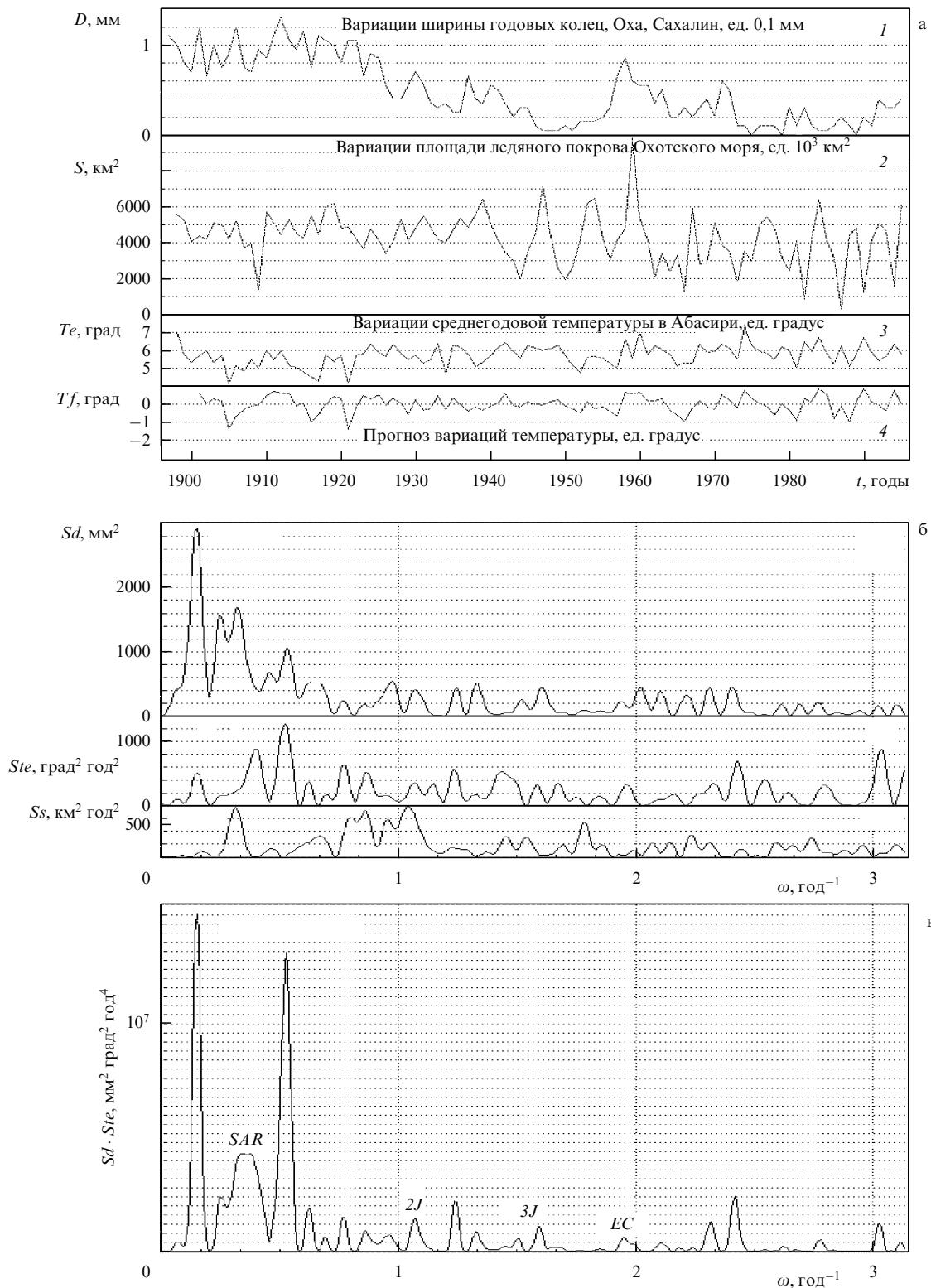


Рис. 12. (а) Вариации годового прироста (ширины годовых колец) деревьев D (М.И. Стрельцов) — линия 1; площадь максимального покрытия льдом Охотского моря S [М. Аота, 1999] — линия 2; изменения среднегодовой температуры в точке Абасири Te [М. Аота, 1997] — линия 3; прогноз вариаций спеднегодовых значений температуры в Абасири T_f на основе периодического представления — линия 4. Время t в годах. (б) Спектр вариаций ширины годовых колец деревьев S_d , спектр среднегодовых значений температуры в точке Абасири Ste , спектр значений максимальной поверхности ледяного покрова Охотского моря S_s . Частота ω в год^{-1} . (в) Произведение $S_d \cdot Ste$ спектров вариаций ширины годовых колец S_d и среднегодовых значений температуры Ste . Частота ω в год^{-1} .

Во временных зависимостях различных характеристик наблюдается много сходного. Чтобы выделить вариации, имеющие общее происхождение, на рис. 12б

построены спектры вариаций ширины годовых колец, среднегодовой температуры и полной поверхности льда Охотского моря. Если спектры содержат узкие линии,

общие источники выявляются в том случае, когда положения линий различных спектров совпадают. При построении спектра для устранения влияния обрывов на конце интервала наблюдения из вариаций всех параметров вычтены результаты сглаживания по интервалу 50 лет (вариации с большими периодами не могут быть обнаружены при использовании рядов наблюдений менее 100 лет, и такие вариации из анализа устраниены).

Спектры содержат достаточно узкие максимумы, положения которых частично совпадают для вариаций различных параметров. Для иллюстрации совпадающих максимумов на рис. 12в показано произведение спектров вариаций ширины годовых колец и среднегодовых значений температуры. Такая операция из всех наблюдаемых линий различных спектров выделяет те, для которых частоты положения максимумов совпадают.

Видны отчетливо совпадающие достаточно узкие максимумы. Величины соответствующих периодов вычислены и приведены ниже. Наибольший максимум при низких частотах не принимался во внимание, так как его появление есть следствие технологической операции, вычитания компоненты, сглаженной по интервалу 50 лет для удаления эффектов границ интервала наблюдения.

Определенные по графику значения периодов составляют: 25,0; 18,51 (*SAR*); 11,904 (*J*); 10,1; 8,13; 7,29; 6,53; 5,88 (2*J*); 5,07; 4,73; 4,16; 3,95 (3*J*); 3,21 (-1,6); 2,97 (4*J*); 2,71; 2,59; 2,26; 2,07 (*S-MR*) (года). Некоторые из значений легко узнаются. Это период регрессии узлов лунной орбиты (18,613) *SAR*. Это период вращения Юпитера вокруг Солнца (11,863) — *J*, период первой — 2*J* (5,93), второй — 3*J* (3,952) и четвертой — 4*J* (2,97) гармоник вращения Юпитера, период биений потока солнечной энергии, связанных с затмениями (3,3) (индексы максимума -1,6 в соответствии с обозначениями табл. 6), синодический период вращения Марса *S-MR* (2,136). В последнем случае совпадение периодов не очень убедительное.

Периодические колебания климата с периодом обращения Юпитера обсуждались в литературе [33–35, 3]. Полагается, что они обусловлены колебаниями центра Солнца относительно центра тяжести системы Солнце–Юпитер. Колебания с периодом регрессии узлов лунной орбиты также обсуждались на научных конференциях [5], где предполагалось, что колебания вызваны вариациями меридиональной конвекции, связанной с инерционными силами, обусловленными вращением Земли относительно общего центра тяжести системы Земля–Луна. Относительно слабый пик на частоте $-1,6 = 13S + 12SAR - M$, связанный с вариациями солнечного излучения при затмениях Солнца Луной, — это новый результат. Физический смысл периодов других из обнаруженных осцилляций неизвестен, хотя некоторые из периодов (5,07) обсуждались ранее в научной литературе [31].

Описание периодической структуры вариаций климата в этом диапазоне частот представляется полезным при анализе изменений климата. Такой анализ представляется необходимым при разработке правил ограничения человеческой деятельности, так как периодические эффекты значительно интенсивнее малых вариаций температуры, связанных с человеческой активностью.

Оценки положения и фазы максимумов могут быть использованы для прогноза вариаций климата. Качество

такого прогноза иллюстрируется на рис. 12а; на линиях 3 и 4 сравниваются оценка вариации среднегодовой температуры вследствие периодических изменений (4) и наблюдаемые вариации в точке Абасири. Видно, что прогноз достаточно точный, и тренда, связанного с человеческой деятельностью, не наблюдается.

Оценка положения максимумов с известными периодами может быть использована при интерпретации геологических данных. В работе [36] для поиска следов катастроф в голоценовых отложениях предложено определять зависимость сопротивления контакта от глубины заложения. Такие измерения проводятся тривиальными средствами и позволяют получить информацию о свойствах разреза отложений с разрешением в 1 мм. При этом наблюдаются существенные квазипериодические колебания сопротивления как функции глубины с периодами 2–6 см. Спектр вариаций сопротивления контакта, измеренных в бухте Церковная, о. Шикотан [36], показан на рис. 13. На нем отчетливо просматриваются два максимума (на рисунке указаны специальными пометками), отношение положений которых довольно точно соответствует отношению периодов главных максимумов вариаций климата (18,6 и 11,9 лет). Если такая интерпретация этих максимумов окажется достоверной, это позволит оценить скорость накопления осадков, производить быстрые и точные оценки возраста выделенных по другим признакам геологических катастроф, исследовать региональные особенности вековой изменчивости климата [37], анализируя динамические спектры полученных таким образом рядов.

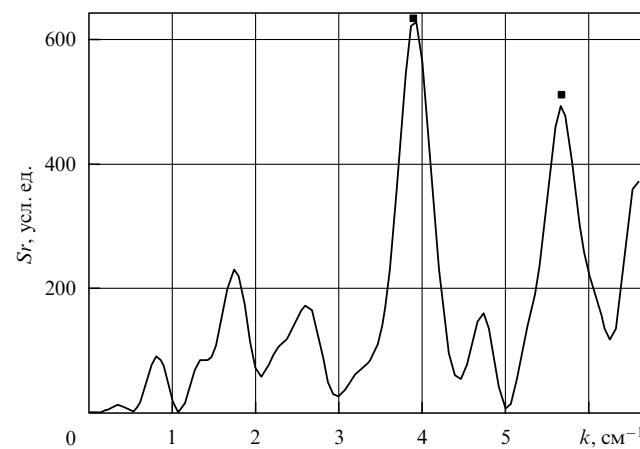


Рис. 13. Спектр $Sr(k)$ зависимости сопротивления заземления от глубины контакта (см^{-1}). Бухта Церковная, о. Шикотан [32].

Таким образом, выделение спектральных пиков в диапазоне периодов 2–50 лет представляет существенный практический и научный интерес. Ниже более подробно проанализированы вариации в диапазоне периодов 100 дней–15 лет, которые можно анализировать на основе наблюдений за период 40 лет. Основой являются наблюдения вариаций уровня моря.

6.2. Спектры вариаций уровня моря в диапазоне периодов от нескольких месяцев до нескольких лет

В этом разделе более подробно исследуются спектры вариаций климата в диапазоне периодов от 100 дней до 15 лет на основе анализа спектров простейшей метеоро-

логической характеристики — положения уровня моря. Наблюдения этой величины в отдельных районах продолжаются уже более 100 лет. Выбор характеристики обусловлен тем, что в нашем распоряжении оказался наиболее длинный ряд с 1950 г. по 1990 г. Длина ряда определяет разрешающую способность по частоте и позволяет разрешить близко расположенные линии. Однако эта характеристика (вариации уровня моря) достаточно интересна сама по себе. Интерпретация ее наблюдений используется в геологии для оценки изменений климата в геологические времена [3]. В настоящее время предпринимаются попытки оценить глобальное потепление климата на основе наблюдений вариаций уровня в диапазоне периодов 5–40 лет [37], правда, в последнем случае обнаружено, что необходимо принимать во внимание современные движения Земли и вариации точки закрепления датчика, связанные с землетрясениями [6].

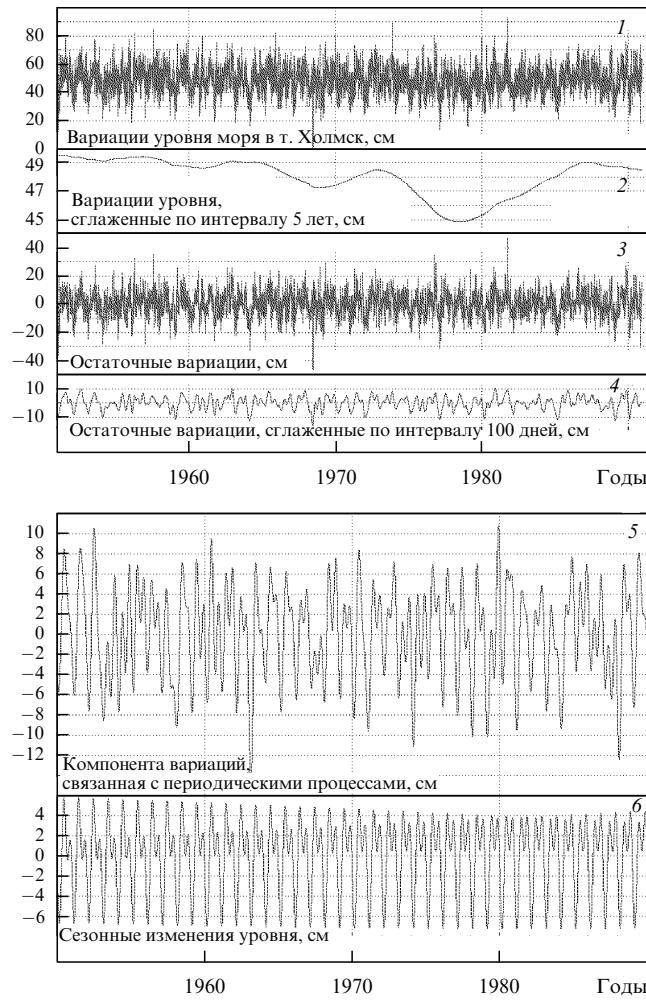


Рис. 14. Запись вариаций уровня в точке Холмск: 1 — результат усреднения по интервалу 2 дня; 2 — результат усреднения по интервалу 5 лет; 3 — использованная для оценки спектра запись вариаций уровня с вычитенным средним по интервалу 5 лет; 4 — сопоставляемые вариации, сглаженные по интервалу времени 100 дней; 5 — оценка этих вариаций на основе определения сезонных вариаций и вариаций уровня, связанных с колебаниями, соответствующими максимумам спектра, выписанным в табл. 9; 6 — сезонные вариации уровня, вычисленные по параметрам спектральных максимумов на частотах S и $2S$.

Для анализа используется запись вариаций на приливной станции СахУГМС в точке Холмск (Россия, о. Сахалин). Временная зависимость показана на рис. 14 (линия 1). Она построена по значениям уровня, усредненным по интервалу времени 2 дня. Компонента записи, усредненная по периоду 5 лет, показана на рис. 14 (линия 2). Она была вычтена из записи для построения спектра.

Вычислялась величина $A(\omega) = |\sum Y(t_k) \exp(i\omega t_k)|^2 \Delta t^2$, где t — время с 1950 г. по 1990 г.; Y — вариации уровня после вычитания сезонных изменений и усредненных значений по интервалу времени 15 лет; Δt — 2 дня; ω — циклическая частота, которая изменялась в диапазоне от 0,00785 до 15 год $^{-1}$. Спектр показан на рис. 15 (линия 1).

Главная особенность спектра — это максимумы, соответствующие периодам 1 год (S) и 0,5 года ($2S$). Наблюдается смещение максимума, соответствующего периоду 1 год, на три счетных точки. Колебания на этих частотах описывают сезонные вариации уровня. Они исследованы подробно в работе [11] и не составляют предмет исследования настоящей работы. Сделаем только одно замечание. Колебания главной гармоники происходят не точно с периодом 1 год, положение максимума отчетливо смещено на несколько расчетных точек. Это смещение реально проявляется как биения колебаний главной и первой гармоник, частота которой точно соответствует периоду 0,5 года. Эти биения показаны на рис. 14 (линия 6) и вычтены из полных колебаний.

Спектр колебаний после вычитания сезонных вариаций показан на рис. 15 (линия 2). Это линейчатый спектр. Ширина большинства из линий определяется интервалом наблюдения, так что, по-видимому, мы имеем дело с чисто периодическими процессами, не изменявшими ни периода, ни фазы колебаний в течение интервала наблюдения.

Периодические колебания, соответствующие максимумам спектра, были вычислены и сопоставлены с реальными изменениями уровня. Параметры максимумов, учтенных при оценке, выписаны в табл. 9. Периодические колебания и исходная зависимость сравниваются на рис. 14 (линии 5 и 4). Параметры учтенных линий выписаны в табл. 9.

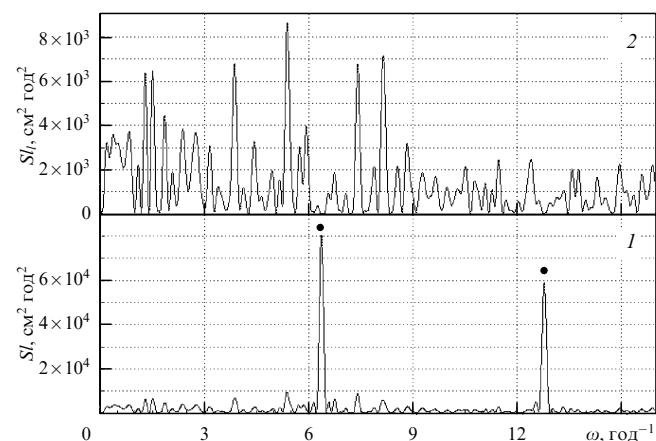


Рис. 15. Спектры вариаций уровня в точке Холмск по записи длительностью 40 лет: S/I — полный спектр (линия 1); S/I_1 — спектр вариаций после вычитания годовых и полугодовых вариаций, определенных по параметрам спектра (линия 2).

Таблица 9. Параметры линий при моделировании вариаций уровня

№	Фаза, рад	Частота, день^{-1}	Амплитуда, град
1	1,3273	0,0035	1,0845
2	-0,6092	0,0041	-1,0921
3	0,1101	0,0050	-0,9056
4	-1,1963	0,0064	-0,8407
5	0,2866	0,0074	0,8227
6	1,1171	0,0085	0,7548
7	-1,2680	0,0104	-1,1199
8	-0,3444	0,0120	0,7798
9	-1,3344	0,0145	-1,2635
10	-0,2516	0,0155	-0,7466
11	1,0314	0,0160	-0,8556
12	-1,3121	0,0200	1,1191
13	1,1990	0,0220	1,1483
14	0,0579	0,0238	-0,7709
15	0,8004	0,0250	-0,5852
16	-1,4966	0,0283	-0,6284
17	-0,5891	0,0309	0,6702
18	-1,3593	0,0334	-0,6742
19	-0,7892	0,0366	-0,6147

Видно, что периодические осцилляции содержат основную долю вариаций, и оценка этих значений по параметрам спектральных максимумов дает описание картины вариаций уровня в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет. По качеству это описание не уступает описанию приливных колебаний по Лапласу [7] с помощью компонент, соответствующих лунному и солнечному приливам.

Таким образом, значительная часть наблюдаемых вариаций уровня моря в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет вызывается периодическими процессами, состоит из отдельных гармоник и может быть предсказана с большой степенью точности на много лет вперед. Наблюдаемые значения периодов лежат в диапазоне, характерном для комбинационных частот периодов вращения по орбите планет Земля, Марс, Венера и Юпитер. Ниже предпринята попытка истолковать результаты наблюдения как следствие действия планет. Анализируются три механизма действия планет. Все они связаны с гравитационным действием. Первый обсуждался ранее [7], это приливное действие планет на воды океана. Второй связан с гравитационным действием планет на орбиту системы Луна — Земля, в результате которого происходит смещение орбиты в направлении на Солнце, которое приводит к модуляции потока солнечного излучения, сопровождающейся модуляцией температуры воздуха и атмосферного давления, сопровождающейся в свою очередь вариацией уровня моря в соответствии с законом обратного барометра. Третий связан с модуляцией периодических колебаний расстояния от Земли до Солнца. Он аналогичен механизму расщепления линии *Mt* лунного приливного потенциала, рассмотренному в разделе 4. Для различия этих механизмов полезно сопоставить амплитуды спектральных максимумов вариаций уровня и атмосферного давления. Ниже такое сопоставление проводится на основе интерпретации наблюдений атмосферного давления в точке Терней. Интервал имеющихся в наличии материалов наблюдения составляет 18 лет. Вообще говоря, этого недостаточно для надежного разделения всех линий, но для некоторых из линий результаты более-менее убедительны.

6.3. Спектры вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет

Ниже представлены результаты исследования спектров вариаций атмосферного давления в точке Терней в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет. Цели исследования — проверить, существует или нет в этом диапазоне периодов линейчатая структура спектров, обнаруженная при анализе спектров вариаций уровня, оценить долю энергии вариаций, содержащуюся в чисто периодических компонентах, и подготовить материал для сопоставления с линейчатой структурой спектров вариаций уровня в этом диапазоне периодов. Как было показано выше, соотношение амплитуд соответствующих спектральных максимумов позволяет оценить расположение первичного возмущения в атмосфере или в океане и является важной информацией при выборе точки зрения на происхождение линии.

В качестве основы для анализа использованы материалы наблюдения атмосферного давления в точке Терней за интервал времени с 1966 г. по 1984 г. В качестве метода обнаружения периодических компонент использовано построение спектров по технологии, описанной в разделе 2. Спектр строился по сигналу, слаженному по интервалу 2 сут (сигнал 1 на рис. 16), из которого предварительно вычен вековой ход вариаций (линия 2). Последний вычислялся как результат слаживания исходного сигнала по интервалу 5 лет. Для вычисления спектра использованы остаточные вариации после вычитания векового хода. Они показаны на линии 3.

Построенный спектр выведен с разрешением по частоте $\delta\omega = 2 \times 10^{-5} \text{ день}^{-1}$ и показан на рис. 17 (линия 1). Главные элементы спектра — линии на периодах, приблизительно равных 1 году (*S*) и 0,5 года (*2S*). Они значительно превосходят остальные, так что мелкие детали спектра плохо различимы. Для иллюстрации малых вариаций спектр построен вторично после вычитания из исходного ряда сезонной компоненты, которая определена как сумма синусоидальных компонент, параметры которых — частота, амплитуда и фаза — определены по характеристикам максимумов *S* и *2S*. Сезонные вариации показаны на линии 6 на рис. 16. В отличие от случая вариаций уровня, для атмосферного давления не наблюдается значительного отклонения положения максимума *S* от частоты, соответствующей периоду 1 год. Кроме того, амплитуда максимума *2S* относительно невелика, так что вековые вариации сезонного хода практически незаметны.

Спектр вариаций после исключения сезонного хода показан на линиях 2 и 3 на рис. 17. Две линии использованы для иллюстрации спектра вследствие плохого разрешения, обусловленного недостаточной длительностью интервала наблюдения. Линия 2 — это спектр сигнала после вычитания сезонного хода. Спектр содержит несколько линий, ширина которых достаточно велика. Количество линий значительно меньше, чем на аналогичном спектре рис. 15 (линия 2). Видно, что интервал 18 лет недостаточен для разрешения всех линий. Чтобы их увидеть, была предпринята попытка выделить колебания, соответствующие главным максимумам, исключить их из сигнала и построить спектр заново. Результат показан на линии 3, на которой отчетливо выделяются дополнительные линии, не обнаруживаемые при поверхностном осмотре спектра.

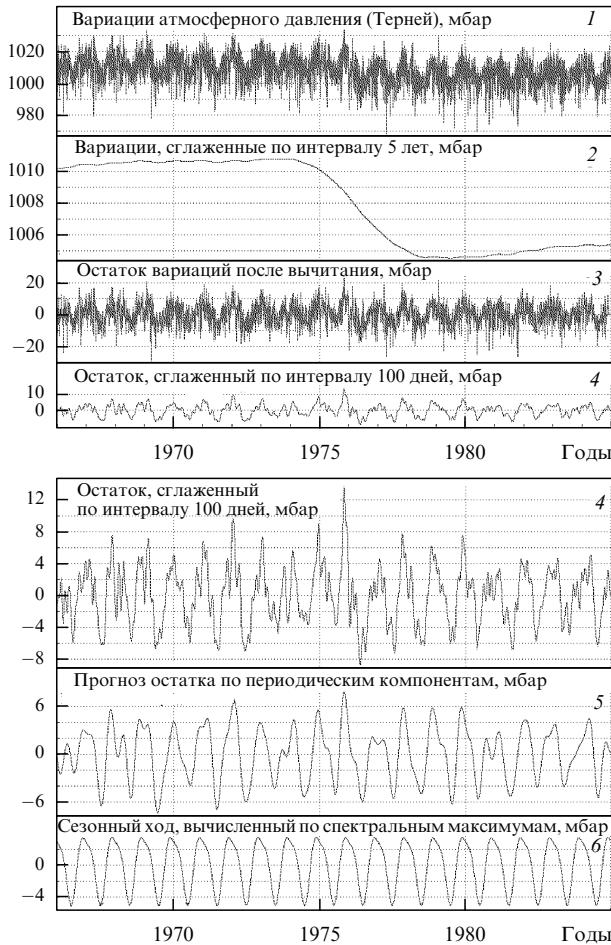


Рис. 16. Вариации атмосферного давления в точке Терней за период времени с 1966 г. по 1984 г., сглаженные по интервалу времени 2 дня (линия 1); вековой ход вариаций атмосферного давления в точке Терней (результат сглаживания кривой 1 по интервалу 5 лет); вариации атмосферного давления за вычетом векового хода (линия 3); результат сглаживания вычлененных вариаций по интервалу 100 дней; прогноз вариаций атмосферного давления по периодическим компонентам в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет (линия 5). Ученые линии и их параметры показаны в табл. 11; сезонный ход вариаций давления, вычисленный по характеристикам спектральных линий, соответствующих периодам 1 год и 0,5 года (линия 6).

Для наиболее интенсивных линий, параметры которых приведены в табл. 10, были вычислены спектральные компоненты. Их сумма показана на рис. 16 (линия 5). Эта величина построена для качественной оценки возможности прогноза вариаций атмосферного давления по параметрам чисто периодических компонент этих вариаций. Поскольку для анализа использована только линия с периодами в диапазоне 100 дней — 5 лет, то для сравнения построена зависимость вариаций давления, сглаженных по интервалу 100 дней. Она показана на линии 4, воспроизведенной на рисунке в двух различных масштабах. На верхнем рисунке она воспроизведена, чтобы проиллюстрировать ту долю энергии вариаций, которая относится к рассматриваемому диапазону частот. Здесь она воспроизведена в одном масштабе с исходным рядом. На нижнем рисунке она воспроизведена в одном масштабе с периодической компонентой, построенной по максимумам спектра, чтобы проиллюстрировать долю энергии, содержащейся в чисто периодических компонентах сигнала.

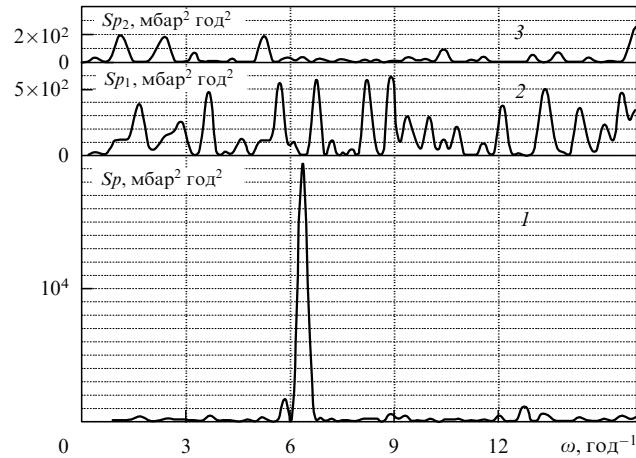


Рис. 17. Спектр вариаций атмосферного давления в точке Терней Sp , вычисленный по интервалу времени с 1966 г. по 1984 г. в диапазоне периодов от 150 дней до 8 лет (линия 1): Sp_1 — спектр сигнала после вычитания сезонной компоненты; Sp_2 — после вычитания главных максимумов. Частота ω в год^{-1} .

Таблица 10. Параметры линий спектра вариаций атмосферного давления в точке Терней

№	Фаза, рад	Частота, день^{-1}	Амплитуда, мбар
1	-0,5295	0,0044	-2,6076
2	1,5382	0,0077	3,9651
3	-0,3214	0,0098	-6,1437
4	1,4863	0,0124	2,8186
5	0,0811	0,0154	-6,3106
6	-0,1548	0,0183	-6,6586
7	0,4505	0,0195	-3,3586
8	1,3767	0,0223	-6,7872
9	0,3434	0,0241	-7,4833
10	0,1057	0,0252	-5,0085
11	-1,3481	0,0270	5,2369
12	-0,0992	0,0281	3,5963
13	-1,0536	0,0291	4,3310
14	0,8210	0,0312	2,6930
15	0,2987	0,0327	-5,2917
16	-1,2655	0,0361	7,0674
17	0,5163	0,0388	5,0434
18	-1,2618	0,0406	-4,3706

Видно, что основная часть энергии вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет содержится в чисто периодической компоненте. Это — важное наблюдение, которое означает, что данная компонента с большой точностью может быть предсказана на несколько лет вперед.

Таким образом, спектр вариаций атмосферного давления в диапазоне периодов 100 дней — 5 лет имеет линейчатую компоненту, которая содержит значительную долю энергии всех вариаций и может быть предсказана с удовлетворительной точностью на много лет вперед.

6.4. Спектральные пики приливных потенциалов планет Венера, Юпитер, Марс

Ниже предпринята попытка истолковать результаты наблюдения как следствие действия планет. Анализируются три механизма действия. Все они связаны с гравитацией. Первый обсуждался ранее [7], это — при-

ливное действие планет на воды океана. Второй связан с гравитационным действием планет на орбиту Земли, в результате которого происходит смещение орбиты в направлении на Солнце, которое приводит к модуляции потока солнечного излучения, сопровождающейся модуляцией температуры воздуха и атмосферного давления, сопровождающейся в свою очередь вариацией уровня моря в соответствии с законом обратного барометра. Третий связан с модуляцией периодических колебаний расстояния от Земли до Солнца. Он аналогичен механизму расщепления линии Mm лунного приливного потенциала, рассмотренному в разделе 4. В настоящем разделе рассмотрен первый из перечисленных механизмов. С теоретической точки зрения анализ не содержит новизны. Он опирается на теорию Лапласа [1], в соответствии с которой спектр приливных вариаций состоит из большого количества узких линий на комбинационных частотах, составленных из комбинаций гармоник периодов движения взаимодействующих планет. Однако не все комбинации частот одинаково интенсивны. Особенности распределения энергии по различным комбинациям зависят от механизма. Ниже построены спектры приливного потенциала, связанного с планетами. Подробно описывается только оценка спектра приливного потенциала Венеры. Особенности спектров Юпитера и Марса исследованы аналогичным образом.

Для теоретической оценки вариации уровня ζ используем формулу Ньютона, несколько преобразованную с учетом некоторых упрощений, связанных с конкретными значениями параметров орбиты Венеры [16, 15]:

$$\zeta = \frac{(3/2) \sin^2 \varepsilon (\cos^2 \theta - (1/2) \sin^2 \theta) (V/E) (a/R_S)^3}{(1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(\omega_V t - \Phi - \omega_E t))^{5/2}} \times a [\cos^2 \omega_E t + \alpha^2 \cos^2(\omega_V t - \Phi) - 2\alpha \cos(\omega_V t - \Phi) \cos \omega_E t]; \quad (33)$$

$\omega_E = 2\pi \text{ год}^{-1}$ — частота вращения Земли вокруг Солнца; $\omega_V = 10,23 \text{ год}^{-1}$ — частота орбитального вращения Венеры; $\Phi = -0,04$ — фаза движения Венеры в январе 1950 г.; $\alpha = R_V/R_S = 0,723$ — отношение радиусов орбит Венеры R_V и Земли R_S ; $V/E = 0,817$ — отношение масс Венеры и Земли; a — радиус Земли; $\varepsilon = 23^\circ 27'$ — угол наклона экватора Земли; θ — широта точки наблюдения.

Вычисления спектра проводились по периоду времени 1950–1990 гг. по формуле (33). Для спектральной амплитуды получено значение $0,018 \times 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ год}^2$. Последнее соответствует амплитуде колебаний уровня $\sim 10^{-5} \text{ см}$. Спектр показан на рис. 18а (линия 1).

Видно, что спектр потенциала Венеры распадается на полосы. Каждая полоса состоит из трех линий. Центральная линия каждой полосы максимальна по интенсивности и по частоте совпадает с одной из гармоник синодического периода (583,92 дня или 1,598 года). Боковые линии отстоят на расстоянии $\Delta_V = 0,798 \text{ год}^{-1}$. Частота Δ_V есть комбинация частот вращения Венеры ($\omega_V = 10,213 \text{ год}^{-1}$) и Земли ($\omega_E = 6,2830 \text{ год}^{-1}$) вокруг Солнца, равная $5\omega_E - 3\omega_V$.

На том же рис. 18 показаны основные линии спектров приливных потенциалов планет Юпитер и Марс. Структуры спектров Юпитера и Венеры существенно отличаются. Связано это с тем обстоятельством, что радиус орбиты Юпитера много больше радиуса орбиты Земли и вариации расстояния между планетами малы по сравне-

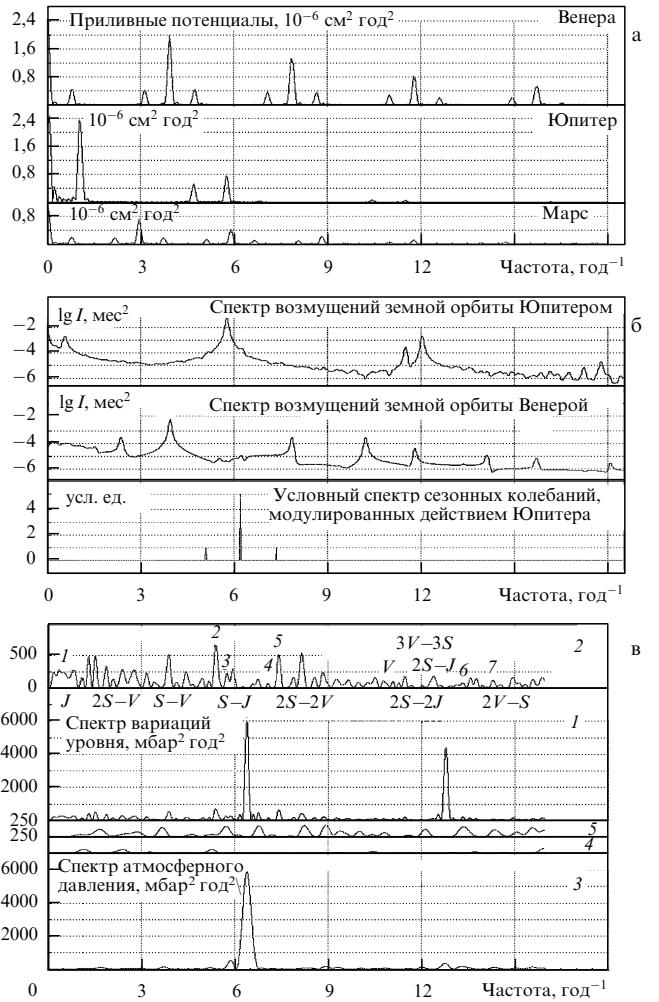


Рис. 18. (а) Спектр приливных потенциалов планет Венера, Юпитер и Марс. (б) Спектры относительных радиальных возмущений орбиты Земли гравитационным действием планет Юпитер и Венера, условное представление спектра сезонных колебаний, возмущенного модуляцией радиальных колебаний под действием Юпитера. (в) Спектры вариаций уровня моря в точке Холмск (линии 1, 2) и вариаций атмосферного давления в точке Терней (линии 3, 4, 5). На линиях 2, 4, 5 показаны спектры после вычитания сезонных вариаций.

нию с самим расстоянием, вследствие чего оказываются малыми и интенсивности высоких гармоник. Максимальная линия спектра Юпитера соответствует второй гармонике периода движения Юпитера вокруг Солнца (частота Юпитера $\omega_J = 0,5297 \text{ год}^{-1}$, период первой гармоники $4\pi/\omega_J = 5,931 \text{ года}$). Она по интенсивности примерно в 10 раз слабее максимальных линий Венеры. Значительную амплитуду имеют также колебания на следующих комбинациях частот ω_J и ω_E : $\omega_E - 3\omega_J$, $\omega_E - \omega_J$, $\omega_E + \omega_J$. Остальные комбинации ослаблены в отношении $(D/R_J)^2 = 0,037$; R_J — радиус орбиты Юпитера.

Максимальные линии приливного потенциала Марса примерно в десять раз менее интенсивны, чем линии потенциала Венеры. Они так же, как и в случае Венеры, представляют собой последовательность полос, каждая из которых состоит из трех линий. Центральная линия каждой полосы имеет максимальную интенсивность, частота ее совпадает с гармоникой синодического периода движения Марса T_M ($T_M = 780$ дней,

($\omega_M = 3,336 \text{ год}^{-1}$). Боковые линии полосы имеют заметно меньшую интенсивность и отстоят на интервале $\Delta M = 4\omega_M - 2\omega_E = 0,78 \text{ год}^{-1}$. Отметим, что $\Delta M \cong \Delta V$, и частоты некоторых интенсивных линий Марса и Венеры так же, как Юпитера и Венеры, близки и плохо разрешимы.

Оценки главных линий спектров приливных потенциалов проведены для сопоставления с результатами наблюдения.

6.5. Теория изменения потока солнечной энергии на Землю под действием движения планет

Приливная сила не единственный источник возмущения уровня океана на комбинациях частот вращения планет и Земли вокруг Солнца. К некоторому эффекту приводит также вариация орбиты Земли под действием планет. В результате этих возмущений изменяется расстояние от Земли до Солнца. Последнее приводит к изменению суммарного потока солнечной энергии, попадающего на Землю. Механизм этих возмущений поясняется ниже на примере Венеры.

На рисунке 19 показана схема движения планеты и Земли вокруг Солнца, которое расположено в центре системы координат. Плоскость X, Y совпадает с плоскостью орбиты Земли. Точки E_0 и E_1 — положения Земли в момент начала анализа (1 января 1950 г.) и в некоторый промежуточный момент времени t . Точки V_0 и V_1 — положения Венеры в момент начала анализа (1 января 1950 г.) и в некоторый промежуточный момент времени t . Угол γ — угол между плоскостями орбит. Эта величина предполагается малой и при первичной оценке положена равной нулю.

Расстояние r между планетами равно

$$r = (R_S^2 + R_V^2 - 2R_S R_V \cos(\Phi_1))^{1/2}. \quad (34)$$

Здесь R_S и R_V — радиусы орбит Земли и Венеры; Φ_1 — угол между направлениями на Венеру и Землю из начала координат, $\Phi_1 = \omega_V t - \Phi_0 - \omega_E t$; $\omega_E = 0,523 \text{ мес.}^{-1}$ — частота вращения Земли по орбите; $\omega_V = 0,8511 \text{ мес.}^{-1}$ — частота вращения Венеры по орбите; $\Phi_0 = -0,04$ — фаза движения Венеры в январе 1950 г.; угол $\gamma = 3^\circ 23' 38,9''$ мал и в дальнейших оценках полагается равным нулю.

Гравитационная сила A , действующая со стороны Венеры на Землю, направлена вдоль линии $E_1 V_1$ и равна

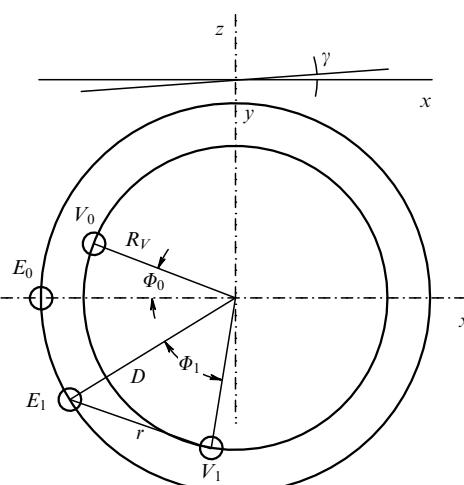


Рис. 19. Схема представлений движения планеты и Земли.

$A = f M_V M_E / r^2$; $M_V = 0,878 M_E$ — масса Венеры, $f = 6,7 \times 10^{-8} \text{ см}^2 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-3}$ — гравитационная постоянная.

Возмущения потока солнечной энергии возникают при движении Земли в направлении на Солнце и пропорциональны величине $-2l/R_S$, l — смещение Земли в направлении к Солнцу. Оно определяется компонентой силы A в направлении на Солнце, равной $(f M_V / r^2) \cos \delta$. Угол δ между направлением на планету и направлением на Солнце определяется из уравнения $R_S^2 + r^2 - 2R_S r \cos \delta = R_V^2$.

Для оценки радиального смещения Земли по направлению на Солнце получаем уравнение

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = \frac{f M_V (R_S^2 + r^2 - R_V^2)}{2R_S r^3}. \quad (35)$$

В правой части уравнения зависимость от времени связана с величиной r . Это периодическая зависимость с синодическим периодом Венеры $T_V = 2\pi / (\omega_V - \omega_E) = 583,92$ дня. Оценим порядок величины смещения l :

$$l = \frac{f T_V^2}{(2\pi)^2 M_E} = \frac{g T_V^2 a^2 D}{(2\pi)^2 (D - R_V)^3} \frac{M_V}{M_E} \sim 10^4 \text{ км};$$

g, a — соответственно ускорение силы тяжести ($9,8 \text{ м с}^{-2}$) и радиус Земли (6370 км). Такие смещения могут привести к вариациям температуры $\sim 2l/(D T_0) \sim 0,3^\circ$ и атмосферного давления $\sim 1 \text{ мбар}$; $T_0 = 300^\circ$ — средняя температура поверхности Земли. Последняя цифра вполне согласуется с полученными оценками вариаций давления.

Спектр возмущений орбиты (35) содержит только линии на гармониках синодического периода вращения планеты, причем наибольшая энергия соответствует линии с минимальным периодом. Оценка спектра показывает, что амплитуда первой гармоники в 20 раз меньше амплитуды нулевой.

Частоты наблюдаемых возмущений не удовлетворяют этому условию, даже если принимать во внимание только колебания с первичной генерацией в атмосфере. Колебания с комбинационными частотами могут появиться вследствие эффектов вращения Земли вокруг своей оси, главным из которых является ограничение обмена энергией между Северным и Южным полушариями. Для оценки возмущений на комбинационных частотах можно рассмотреть вариации потока энергии на отдельное полушарие. Это приводит к дополнительной вариации потока солнечной энергии с периодом 1 год. При этом часть энергии, падающая на Северное полушарие, равна

$$\frac{1}{2} (1 + \sin E \cdot \cos(St + \Phi_l));$$

Φ_l — фаза вращения Земли вокруг Солнца. С учетом этой модуляции в спектре появляются дополнительные линии на частотах $k(\omega_V - \omega_E) \pm \omega_E$. В силу значительного различия интенсивностей различных линий спектр показан на рис. 18б в логарифмическом масштабе. Аналогичная оценка для Юпитера показана на рис. 18б.

Отметим, что возмущение траектории движения Земли вокруг Солнца, вызванное планетой Венера, меньше возмущения, связанного с движением Юпитера. Эффект пропорционален массе планеты, квадрату периода и обратно пропорционален квадрату минимального расстояния между планетами. То есть относитель-

ная величина вклада Венеры по сравнению с Юпитером равна

$$\frac{V}{J} = \frac{M_V}{M_J} \left(\frac{R_J}{R_S - R_V} \right)^2 \left(\frac{T_V}{T_J} \right)^2 = 10^{-3}.$$

Это соотношение относится к главной гармонике Юпитера. В приведенном анализе рассматривались только вторичные гармоники, величина которых меньше в отношении $R_S/R_J = 0,2$ раза. Так что фактически главные линии Венеры и вторичные линии Юпитера имеют сравнимые амплитуды, и действие обеих планет следует принимать во внимание при анализе физической природы наблюдаемых спектральных линий вариаций уровня моря.

Отметим также, что к аналогичному эффекту приводит действие Луны. Только в данном случае приходится несколько усложнять представления. Вследствие прецессии возникают колебания центра тяжести системы Земля–Луна относительно эллиптической орбиты. Эти колебания имеют период 18,61 лет и амплитуду $\Delta_S = D M/E = 4700$ км и происходят в плоскости, имеющей наклон 5° к плоскости орбиты, т.е. практически в плоскости орбиты Земли. Эффект этих колебаний сравним с колебаниями орбиты под действием Юпитера. Они также должны рассматриваться как источник возмущений на линиях SAR и $S + SAR$.

6.6. Модуляция частоты радиальных колебаний Земли
При анализе лунных приливов, связанных с колебаниями радиуса орбиты Луны (линия Mm), было обнаружено, что на формирование спектра существенное влияние оказывает действие Солнца, которое приводит к различию между периодами колебательного и вращательного движений Луны (см. раздел 4.2). Аналогичный эффект может наблюдаться и в системе Солнце–Земля, которая аналогичным образом возмущается действием планет. Для отдаленных планет, таких, как Юпитер, период возмущения много больше периода движения Земли по орбите, и возмущение может рассматриваться как адабатическое. В этом случае эффект возмущения определяется параметром

$$\alpha_J = \frac{M_J}{M_S} \left(\frac{R_E}{R_J} \right)^3 = 0,66 \times 10^{-5},$$

где M_J и M_S — массы Юпитера и Солнца, R_E и R_J — радиусы орбит Земли и Юпитера, и сводится к появлению разницы

$$\delta\omega_J = -1,75\alpha\omega_E = -0,19 \times 10^{-6} \text{ день}^{-1}$$

между частотами радиальных колебаний и вращения Земли и к частотной модуляции радиальных колебаний с частотой модуляции, равной удвоенной частоте вращения Юпитера $2\omega_J$ с амплитудой модуляции $\delta\omega_{J1} = (3/8)\alpha\omega_E$. Последняя приводит к увеличению ширины линии спектра, соответствующей частоте радиальных колебаний, и к появлению дополнительных линий на $\omega_{jk} = S \pm 2\omega_J$. Здесь ω_E и ω_J — частоты вращения по орбите Земли и Юпитера. В случае, если $\delta\omega_{J1}T \ll 1$, амплитуда дополнительных линий с индексом k (k — целое число) пропорциональна величине $(\delta\omega_{J1}T)^{2k}/(k!)^2$, т.е. линии с большими k имеют малую амплитуду и практически появляются только две дополнительные линии на частотах $\omega_{J1} = S \pm 2\omega_J$.

Подставляя известные характеристики планеты Юпитер и значение $T = 40$ лет, использованное для построения спектров, получаем оценку $\delta\omega_{J1}T \sim 10^{-3}$ и разницу в периодах радиальных колебаний и вращения Земли $\delta T \cong 0,004$ дня. Последнее значение меньше оценки, полученной астрономами [18], где для периода вращения ТЕ1 (тропический год) используется значение 365,242 дня, а для периода радиальных колебаний используется значение 365,2596 дня (аномалистический год). Это вполне естественно, так как в формировании разности периодов участвует не только планета Юпитер. К аналогичному эффекту должно приводить действие других планет, и действие всех планет складывается.

Таким образом, вследствие модуляции частоты колебаний радиуса орбиты Земли под влиянием планет должны наблюдаться линии спектра в окрестности пика, соответствующего периоду 1 год, отстоящие на частоты $\pm 2\omega_\gamma$, где γ обозначает планеты Марс, Юпитер, Сатурн и т.д. Интенсивность этих линий пропорциональна параметру $\alpha_\gamma = M_\gamma/M_S (R_E/R_\gamma)^3$; здесь M_γ и R_γ — соответственно масса и радиус орбиты планеты. Вообще говоря, приведенные оценки справедливы только для случая $(R_E/R_\gamma) \ll 1$. Однако если использовать эту оценку для анализа эффектов различных планет, то видно, что главную роль в формировании эффекта играют планеты Юпитер, Венера и Марс. Порядок отношения интенсивности этих линий к интенсивности максимума на частоте S определяется величиной $(\delta\omega_{J1}T)^2$. Если известная оценка $\delta\omega_{J1} = 0,00029$ год⁻¹ справедлива, то на спектрах, построенных по интервалу наблюдения 40 лет, интенсивность этих линий более чем на четыре порядка меньше интенсивности пика на частоте S .

Следует отметить, что эффект модуляции периода колебаний расстояния от Земли до Солнца возникает и под влиянием прецессии лунной орбиты. Вследствие прецессии Луны возникают колебания расстояния центра тяжести системы Луна–Земля до Солнца с периодом 18,61 лет (частота SAR), т.е. изменяется потенциальная энергия. Последнее приводит к увеличению периода и к модуляции частоты радиальных колебаний. Модуляция происходит с частотой $2SAR$ и с амплитудой $\delta\omega_{SAR} = \omega_2 \Delta_S / R_S$. На спектре эта модуляция проявляется как появление дополнительных линий на частотах $S \pm 2SAR$ с амплитудой, пропорциональной $\delta\omega_{SAR}T = 10^{-3}$, сравнимой по величине с аналогичным эффектом, связанным с действием Юпитера.

6.7. Анализ наблюдаемых линий спектра вариаций уровня моря

Анализ природы наблюдаемых линий спектра подтверждает, что эти линии действительно существуют и могут быть надежно использованы для прогноза вариаций климата. Поэтому такое истолкование представляет определенный практический интерес. Из изложенных теорий только теория модуляции солнечного излучения вследствие вариации орбиты Земли под действием планет (механизм А) дает оценки вариаций, сопоставимые по амплитуде спектральных максимумов с наблюдаемыми. Остальные теории (теория приливов и теория частотной модуляции радиального движения) приводят к оценкам, различающимся на несколько порядков величины. Теория гравитационных приливов (механизм В) дает оценки вариаций уровня моря, различаю-

щиеся на четыре порядка, теория частотной модуляции (механизм Б) — на два порядка. Поэтому наибольшую достоверность имеет истолкование линии как следствия действия механизма А. Эта система предпочтения использована при интерпретации линии. Все изложенные механизмы приводят к линейчатым спектрам на комбинациях частот вращения планеты и вращения Земли вокруг Солнца. Однако каждому из механизмов соответствует свое особенное распределение энергии по линиям спектра. Вследствие этого обстоятельства некоторые из линий не могут быть истолкованы посредством механизма А, и приходится использовать истолкование посредством действия механизма Б.

В таблице 11 представлены параметры линий спектра, истолкованных как следствие действия механизма А. В первом столбце — порядковый номер; во втором столбце показана комбинация частот, на которой наблюдается максимум спектра; в третьем столбце выписано теоретическое значение соответствующего периода, вычисленное по астрономическим данным (годы); в четвертом столбце приведены значения логарифма амплитуды максимума (в единицах мес.²); в пятом столбце показано значение периода, вычисленное по положению максимума спектра вариаций уровня моря (годы); в шестом столбце показано значение логарифма отношения амплитуды максимума спектра к амплитуде на периоде 1 год; в седьмом столбце показано значение логарифма отношения амплитуды максимума спектра вариаций атмосферного давления. Интерпретированные максимумы показаны на спектре на рис. 18в. Максимум на частоте SAR не проанализирован из-за низкого качества интерпретации при таких больших периодах.

Из таблицы 11 видно, что совпадение периодов достаточно хорошее, на лучшее трудно рассчитывать при интервале наблюдения 40 лет. Однако амплитуды максимумов для линий спектра вариаций уровня, которые должны быть ослаблены с точки зрения теории, примерно на порядок величины превышают теоретические оценки. Более того, наблюдается значительное количество линий на частотах, совпадающих с комбинациями частот вращения планет, которые не должны наблюдаться в соответствии с теорией. Это, в частности, относится к линии на частоте $S + 2J$, одной из наиболее сильных линий спектра вариаций уровня.

Таблица 11. Линии спектра, истолкованные по модели А

№	Параметры комбинации частот	Теоретические оценки линии: 1 — период (годы), 2 — логарифм амплитуды	Линии спектра вариаций уровня: 1 — период (годы), 2 — логарифм амплитуды	Логарифм амплитуды спектра давления		
1	2	1 (3)	2 (4)	1 (5)	2 (6)	7
1	J	11,86	-2,51	11,83	-1,90	
2	$2S-V$	2,673	-3,28	2,686	-1,3	-1,98
3	$V-S$	1,599	-1,84	1,63	-1,1	-1,79
4	$S-J$	1,092	-1,04	1,089	-1,33	-1,03
5	$S + SAR$	0,946	—	0,945	-1,09	—
6	$2V-2S$	0,7995	-3,27	0,809	-1,4	-1,94
7	V	0,6152	-3,26	0,618	-1,79	-1,30
8	$2S-2J$	0,546	-3,35	0,545	-2,125	-1,96
9	$3V-3S$	0,533	-4,01	0,531	-2,16	-1,8
10	$2S-J$	0,522	-2,47	0,518	-1,66	-1,73
11	$2V-S$	0,442	-5,075	0,440	-2,4	-1,73

Симметрично ей относительно линии S наблюдается максимум на частоте $S - 2J$. Это свидетельство периодического воздействия на орбиту Земли со стороны Юпитера с периодом $2J$. Такое взаимодействие проанализировано в предыдущем разделе, и оно должно приводить к появлению линий на частотах $S \pm 2J$ с интенсивностью на четыре порядка меньше линии S . Обе эти линии действительно наблюдаются, однако их относительные интенсивности составляют соответственно 0,116 и 0,107. Это более чем на два порядка больше теоретического прогноза.

Такое расхождение хорошо согласуется с наблюдаемой разностью между периодами колебаний радиуса (линия S) и вращения Земли по орбите (удвоенный период линии $2S$). Теоретическое значение этой разности периодов составляет 0,017 дня и практически не должно наблюдаться. Однако эффект наблюдается как четкие вариации сезонного хода, показанные на рис. 14 (линия 6). Реальные значения, определенные посредством интерполяции выведенных значений спектра, составляют: период радиальных колебаний — 365,89 дней; период вращения — 364,98 дней. Различие в периодах в 1 день находится на пределе возможностей анализа ряда наблюдений в 40 лет (реальный предел разрешения — 0,5 дня). Таким образом, с большой степенью достоверности можно утверждать, что теоретическая оценка эффекта занижена в несколько раз. Если это справедливо, то оценка относительных спектральных амплитуд дополнительных линий на периодах планет $S \pm 2\omega_\gamma$ также занижена и должна составлять значение примерно на два порядка меньше, чем амплитуда максимума S . На реальном спектре соответствующие линии наблюдаются. Характеристики этих линий показаны в табл. 12.

В таблице 12 представлены параметры линий спектра, истолкованных как следствие действия механизма Б. В первом столбце — порядковый номер; во втором столбце показана комбинация частот, на которой наблюдается максимум спектра; в третьем столбце выписано теоретическое значение соответствующего периода, вычисленное по астрономическим данным (годы); в четвертом столбце приведены значения логарифма отношения $(M_\gamma/M_E)^2 (R_E/R_\gamma)^6$, которому в соответствии с теорией пропорциональна амплитуда спектрального максимума; в пятом столбце показано значение периода, вычисленное по положению максимума спектра вариаций уровня моря (годы); в шестом столбце показано значение логарифма отношения амплитуды максимума спектра к амплитуде на периоде 1 год; в

Таблица 12. Линии спектра, истолкованные по модели Б

№	Параметры комбинации частот	Теоретические оценки линии: 1 — период (годы), 2 — логарифм амплитуды	Линии спектра вариаций уровня: 1 — период (годы), 2 — логарифм амплитуды	Логарифм амплитуды спектра давления		
1	2	1 (3)	2 (4)	1 (5)	2 (6)	7
1	$2M-S$	15,79	-3,56	15,39	-1,35	-2,7
2	$S-2J$	1,202	0,708	1,192	-0,93	-2,05
3	$S-2SAR$	1,120	—	1,119	-1,35	-1,67
4	$S+2SAR$	0,903	—	0,903	-1,54	-2,08
5	$S+2J$	0,8557	-0,708	0,861	-0,97	-2,3
6	$S+2M$	0,484	-3,56	0,486	-2,03	-1,82
8	$2V-S$	0,442	0,668	0,440	-2,04	-1,73

седьмом столбце показано значение логарифма отношения амплитуды максимума спектра вариаций атмосферного давления. Интерпретированные максимумы показаны на спектре на рис. 18в.

Из таблицы 12 видно, что совпадение периодов достаточно хорошее. Амплитуды максимумов для линий спектра вариаций уровня не очень хорошо соответствуют теоретической закономерности. Наибольшие отклонения возникают для линии № 1. Это связано с тем, что линия наблюдается на фоне сильной линии, соответствующей периоду SAR (18,613 лет). В таблицу также включены две линии с периодами $S \pm 2SAR$. Это — модуляция периода колебаний расстояния от Солнца до Земли, связанная с регрессией узлов лунной орбиты. Линии отчетливо выделяются на спектре. Участок спектра вариаций уровня с вычтеными сезонными колебаниями в окрестности линии S показан на рис. 20.

На рисунке 20 показаны положения опознанных линий. Видно, что значительная часть наблюдаемых интенсивных линий находит разумное истолкование на основе рассмотренных в предыдущих разделах теоретических оценок. Если привлечь к анализу расположение линий, связанных с приливными потенциалами, то можно истолковать и положения более мелких максимумов. В качестве примера на рисунке выделена линия $3M - 3S$ приливного потенциала Марса. Ее интенсивность на несколько порядков превосходит теоретическую оценку. Однако многие сильные линии все-таки не удается истолковать. Одна из таких интенсивных линий на рисунке обозначена знаком вопроса. То есть интерпретация линий продолжает оставаться предметом научного исследования, что не должно затенять главного факта: линии — это физическая реальность, описывающая периодические вариации климата; фаза и амплитуда линий может использоваться для долговременного прогноза.

Отметим, что хотя нашей целью являлось доказательство реальности периодических изменений климата, наряду с этим был обнаружен интересный физический факт — значительные различия периодов вращения Земли по орбите и колебания расстояния от Земли до Солнца. Оба эти явления должны давать вклад в

формирование линии S , так что она должна состоять из двух комплексных пиков, т.е. быть похожей на линию Mt , связанную с движениями Луны. Поэтому анализ спектров вариаций уровня по интервалам 100 и 200 лет, возможно, позволит разрешить компоненты этого пика и точно определить величину периода радиальных колебаний, астрономическая оценка которого вызывает сомнение.

7. Заключение

Таким образом, линейчатая структура, наблюдалась при построении спектров вариаций атмосферного давления и атмосферной температуры в диапазоне периодов от 10 дней до 10 лет, является отражением реальных физических процессов, которые сохраняют периодичность (когерентность) на протяжении многих десятков лет.

Спектральные линии должны тщательно выделяться и обсчитываться, что позволит прогнозировать значительную часть вариаций с разрешением по времени в 10 дней, с надежным прогнозом на десятки лет вперед. Практика сглаживания этих линий и подгонки наблюдений под представление посредством случайного процесса ведет к потере этой информации.

Прогноз вариаций давления является надежной основой для прогноза погоды и климата, вариации которых в значительной степени определяются астрономическими факторами. Исследование природы наблюдаемых линий позволяет существенно использовать достижения астрономии по изучению планет для уточнения прогнозов. Существует интенсивное действие на Землю со стороны планет, которое не сводится к гравитационному и которое в первую очередь влияет на атмосферу Земли и вызывает вариации климата планеты. Это действие — модуляция потока солнечной энергии вследствие вариаций положения Земли на орбите вокруг Солнца. Это действие серьезным образом искажается вращением Земли, вследствие которого вызывается дополнительная вариация климата не только на гармониках синодического периода планеты, но также на первой комбинации этих гармоник с частотой вращения Земли вокруг Солнца.

Обнаружен интересный физический факт — значительные различия периодов вращения Земли по орбите и колебания расстояния от Земли до Солнца. Эти процессы приводят к формированию линии S . Это должна быть сложная линия, состоящая из двух комплексных пиков, похожая на линию Mt , связанную с движениями Луны. В целях исследования этого феномена представляется значительный интерес анализ спектров вариаций уровня по интервалам 100 и 200 лет, при котором, возможно, удастся разрешить компоненты этого пика и точно определить величину периода радиальных колебаний, астрономическая оценка которого вызывает сомнение.

Некоторые из приведенных результатов можно использовать в практической научной деятельности.

1. Понимание периодического характера вариаций климата с наиболее интенсивными колебаниями на периодах вращения Юпитера (11,8 лет) и регрессии узлов лунной орбиты (18,6 лет) может быть использовано при анализе голоценовых отложений на возраст для развития методов обнаружения следов доисторических катастроф и определяет претензии работы на научную

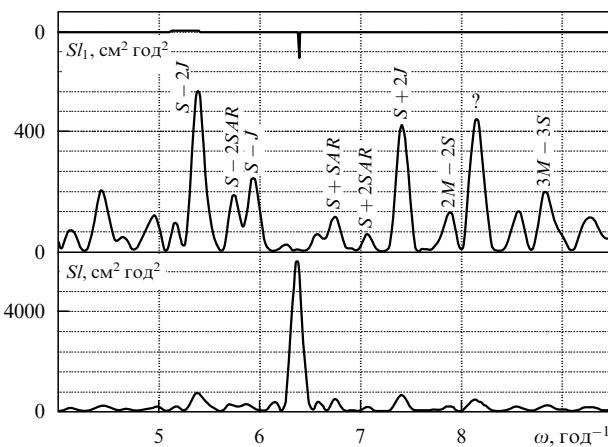


Рис. 20. Спектр вариаций уровня S_1 с вычтеными сезонными вариациями в окрестности пика, соответствующего колебаниям с периодом 1 год. На нижней линии показан спектр без вычитания сезонной компоненты S_1 . Частота ω в год^{-1} .

значимость. Он проиллюстрирован в соответствующем месте работы.

2. Анализ тонкой структуры линий спектров приливных колебаний на частоте вращения Луны позволяет уточнить представления о движении Луны и может быть использован в астрономии при исследовании эволюции лунной орбиты [38].

3. Определенную научную значимость имеет также открывшаяся возможность сопоставления амплитуд спектральных линий при исследовании вариаций атмосферного давления и уровня моря. Соотношения амплитуд весьма разнообразны, но группируются около двух значений $1 \text{ мбар}^2 \text{ см}^{-2}$ и $0,3 \text{ мбар}^2 \text{ см}^{-2}$. Классификация линий по этому параметру позволяет уточнить место первичной генерации, расположено ли оно в атмосфере или в океане [39].

Автор благодарен поддержавшему исследования, Д.Ю. Чунгу. (Сеульский национальный университет).

Автор благодарен Аота (Япония, г. Саппоро), С.И. Варламову (Япония, г. Фукуока), В.М. Пицальнику (о. Сахалин, ТИНРО), Ю. Като (Россия, о. Сахалин, Госкомгидромет) и М.И. Стрельцову (о. Сахалин, ИМГиГ, ДВО РАН), предоставившим материалы наблюдения.

Список литературы

1. Боден К Ф *Физическая океанография прибрежных вод* (М.: Мир, 1988)
2. Налимов В В, Драгалина Ж А *Реальность нереального: Вероятностная модель бессознательного* (М.: Мир идей, 1995)
3. Монин А С *Гидродинамика атмосферы, океана и земных недр* (СПб.: Гидрометеоиздат, 1999)
4. Chung J Y, Ivanova K V, Ivanov V V, in *Abstracts of the 1996 Spring Meeting at PUSAN* (Pusan: The Korean Society of Oceanography, 1996) p. 29
5. Evanova E V, Ivanov V V, Chung J Y, in *Proc. of the 10st RIO – RIAM Joint Workshop on "Sea Level Variations in the Adjacent Seas of Korea"* (Seoul: Research Institute of Oceanography, Seoul National University, 1999) p. 3
6. Позжалова О С, Шевченко Г В, в сб. *Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией* Т. VII (Под ред. В.М Кайстренко) (Южно-Сахалинск: Изд-во ДВО РАН, 1999) с. 131
7. Lamb H *Hydrodynamics* (Cambridge: The Univ. Press, 1932)
8. Swarztrauber P, Sweet R "Efficient FORTRAN subprograms for the solution of elliptic partial differential equations", NCAR Tech. Note NCAR-TN/IA-109 (Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research, 1975)
9. Kahaner D K Z. *Angew. Math. Phys.* **29** 397 (1978)
10. Каханер Д, Мулер К, Нэш С *Численные методы и программное обеспечение* (М.: Мир, 2001) с. 481
11. Дьяконов В П *Maple 6*. Учебный курс (СПб.: Питер, 2001)
12. Дьяконов В П *MATHLAB 6*. Учебный курс (СПб.: Питер, 2001)
13. Дьяконов В П *Mathematica 4*. Учебный курс (СПб.: Питер, 2000)
14. Вудворд Ф М *Теория вероятности и теория информации с приложениями к радиолокации* (М.: Сов. радио, 1961)
15. Купер Дж, Макгиллем К *Вероятностные методы анализа сигналов и систем* (М.: Мир, 1989)
16. Марчук Г И, Каган Б А *Динамика океанских приливов* (Л.: Гидрометеоиздат, 1983)
17. Patullo J G et al. *J. Mar. Res.* **14** 88 (1955)
18. Ле Блон П Х, Майес Л А *Волны в океане* (М.: Мир, 1981)
19. Хэмфрис в *Физика воздуха* (М.: ОНТИ, 1936)
20. Струве О, Линдс Б, Пилланс Э *Элементарная астрономия* (М.: Наука, 1964)
21. *Астрономический ежегодник СССР на 1983 год* (Л.: Наука, 1980)
22. Кэй Дж, Лэй Т *Таблицы физических и химических постоянных* (М.: Физматгиз, 1962)
23. Арнольд В И *Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений* (М.: Наука, 1978)
24. Рой А Э *Движение по орбитам* (М.: Мир, 1981)
25. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Механика* (М.: Наука, 1973)
26. Миланкович М *Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата* (М. - Л.: ГОНТИ, 1939)
27. Монин А С *Вращение Земли и климат* (Л.: Гидрометеоиздат, 1972)
28. Дарвин Дж Г *Приливы и родственные им явления в солнечной системе* (М.: Наука, 1965)
29. Добрэнд В и др. *Программирование на ФОРТРАН* (М.: Статистика, 1973)
30. Шульгин М Ф, Литенко Н Л, Генесина А С *Климат Южно-Сахалинска* (Л.: Гидрометеоиздат, 1982)
31. Климов С М, в сб. *Нестационарные длинноволновые процессы на шельфе Курильских островов* (Отв. ред. В.М Кайстренко, А Б Рабинович) (Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1984) с. 128
32. Aota M. PICES Scientific Report No. 12 (Sidney, B.C., Canada: PICES, 1999) p. 1
33. Рихтер-Бернбург Г, в сб. *Проблемы палеоклиматологии* (Науки о Земле. Фундаментальные труды зарубежных ученых по геологии, геофизике и геохимии, Т. 6, Под ред. АЭМ Нэйрна) (М.: Мир, 1968) с. 336
34. Шостакович Б В, в сб. *Записки Государственного гидрологического института* (Л.: ГГИ, 1934) с. 13
35. Currie R G J. *Coastal Res.* (Special issue 17) 29 (1991)
36. Иванов В В, в сб. *Отчет Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. 1998. Курильская программа* (Южно-Сахалинск: Изд-во ИМГиГ ДВО РАН, 1998) с. 26
37. Igarashi Y et al., in *Proc. of the 16th Intern. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice, 4–8 Feb. 2001, Mombetsu, Hokkaido, Japan* (Mombetsu: Cold Ocean Research Association, 2001) p. 228; Yanagi T, in *Proc. of the 10st RIO-RIAM Joint Workshop ob "Sea Level Variations in the Adjacent Seas of Korea"* (Seoul: Research Institute of Oceanography, Seoul National University, 1999) p. 1
38. Моррисон Л В, в сб. *Приливы и резонансы в солнечной системе* (Под ред. В.Н. Жаркова) (М.: Мир, 1975) с. 273
39. Лаппо С С, Скрипник А В, Лихачева О Н *ДАН СССР* **244** 1475 (1979)

Periodic weather and climate variations

V.V. Ivanov

*Institute of Marine Geology & Geophysics, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Science
ul. Nauki 5, 693002 Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation
Tel. (7-2422) (796154). E-mail: VL-Ivanov@mail.ru*

Variations of meteorological parameters are due in large part to periodic processes and can be forecast for several years. Many such processes are related to astronomical factors such as the gravitational influences of the Moon and the Sun, and the modulation of solar radiation by lunar and planetary motions. The Moon, Jupiter and Venus contribute most strongly in this context. These influences produce lines in the spectra of meteorological variations, which are combinations of the harmonics of the rotations of the planets, the Earth, and the Moon around the Sun with the harmonics of the lunar rotation around the Earth. Due to frequency differences between the orbital and radial motions, fine spectral features of three types appear: line splitting, line profile complications due to radial vibrations, and additional lines due to the combination of radial vibration frequencies with perturbation harmonics.

PACS numbers: 92.10.Hm, 92.60.We, 92.70.Gt

Bibliography — 39 references

Received 29 January 2001, revised 20 October 2001