

Земли, на расстоянии примерно 4670 км от ее центра [3]. Тело Земли обращается без вращения (поступательно) вокруг «неподвижного» (в системе «Земля – Луна») барицентра. В результате такого движения Земли на все земные частицы действует точно такая центробежная сила, как в центре масс Земли. Сумма векторов центробежной силы и силы притяжения Луны называется *приливной силой Луны*. Аналогично определяется приливная сила Солнца.

Величина приливной силы есть функция склонения и геоцентрического расстояния Луны (или Солнца). Амплитуда месячных колебаний склонения Луны изменяется с периодом 18,61 лет от 29° до 18° из-за прецессии оси (регрессии узлов) лунной орбиты. Перигей лунной орбиты движется с периодом 8,85 лет. Склонение и геоцентрическое расстояние Солнца изменяются с периодом один год. Земля вращается вокруг собственной оси с суточным периодом. В итоге амплитуда колебаний лунно-солнечных приливных сил изменяется во времени с периодами: 18,61 лет, 8,85 лет, 6,0 лет, 1 год, 0,5 года, месячным, полумесячным, недельным, суточным, полусуточным и многими другими, менее значимыми периодами. Все эти периоды колебаний приливной силы действуют на вариации атмосферной циркуляции [6]. Механизм этого воздействия еще не выяснен. Прямое воздействие кажется маловероятным из-за малости лунно-солнечных приливных сил. Наиболее вероятно, по нашему мнению, механизм вынужденной синхронизации вариаций атмосферной циркуляции колебаниями лунно-солнечных приливов.

## 2. Синхронизация колебаний

Напомним, что синхронизация колебаний – это согласование частот, фаз и других характеристик сигналов взаимодействующих колебательных систем (осцилляторов). В нашем случае речь пойдет о синхронизации частот вариаций атмосферной циркуляции (ВАЦ) и частот колебаний лунно-солнечных приливов (КЛСП). Существует два основных типа синхронизации колебаний: взаимный, при котором установившаяся в результате синхронизации частота колебаний близка к среднему значению парциальных частот, и принудительный (или захватывание частоты), при котором частота одного из осцилляторов (называемого синхронизирующим) остается неизменной, а частота

*Н.С. Сидоренков, К.А. Сумерова*

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ КОЛЕБАНИЯМИ ЛУННО-СОЛНЕЧНЫХ ПРИЛИВОВ И ПОДБОР АНАЛОГОВ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ

### 1. Генерация приливов

Земля и Луна обращаются вокруг общего центра тяжести (барицентра) системы «Земля – Луна» с сидерическим (относительно звезд) периодом 27,3 сут. Земля описывает орбиту, которая является зеркальным отображением орбиты Луны, но размеры ее в 81 раз меньше лунной орбиты (рис. 1). Барицентр всегда располагается внутри

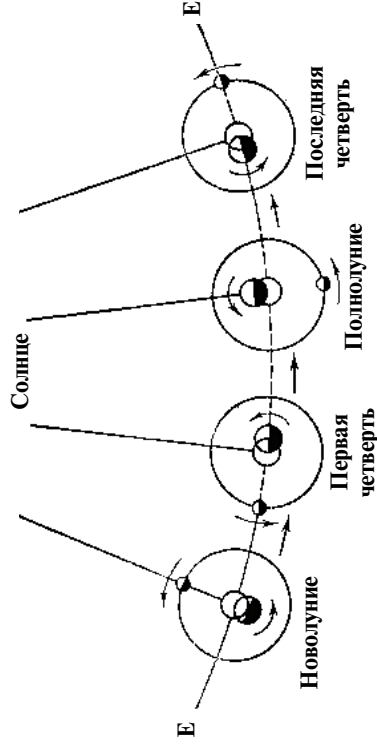


Рис. 1. Движение Земли и Луны вокруг барицентра и фазы Луны. Внешние и внутренние круги изображают орбиты центров масс Луны и Земли соответственно. Дуга ЕЕ изображает траекторию движения барицентра вокруг Солнца

других подстраивается под нее [1]. Для первого типа синхронизации характерно тесное взаимовлияние систем друг на друга, для второго же – одностороннее влияние синхронизирующего осциллятора на остальные осцилляторы и отсутствие обратной связи.

В нашем случае частоты ВАЦ подстраиваются под синхронизирующие частоты КЛСП. Синхронизация частот свойственна генераторам не только периодических, но и стохастических автоколебаний. Рассмотрим какую-либо бистабильную систему с двумя стабильными состояниями, обладающую к тому же диссипацией энергии. Под влиянием достаточного внешнего воздействия система сможет перейти в другое состояние. Если достаточное внешнее воздействие периодическое, то система также будет периодически переходить из одного состояния в другое. Но недостаточное (подпороговое) воздействие не вызовет отклика другой системы.

Если внешнее воздействие беспорядочно (шум), то система (например ВАЦ) хаотически «блуждает» и спустя некоторое время, средняя величина которого зависит от мощности шума, сможет перескочить из одного состояния в другое. Динамика таких скачков будет беспорядочной.

Рассмотрим теперь суммарный эффект подпорогового периодического и хаотического воздействий. Само по себе подпороговое периодическое воздействие не сможет перебрести систему в другое состояние, однако шум помогает этому, подводя воздействие к «критическому» состоянию. В результате в отклике другой системы проявляется периодичность, как раз определяемая слабым периодическим воздействием. Эмпирически установлено, что оптимальной (приводящей к максимальному отношению сигнала к шуму) является такая мощность шума, при которой характерное время жизни системы в одном состоянии равно половине периода периодического возмущения. Слишком сильный или слишком слабый шум приводит к меньшей чувствительности другой системы к слабому периодическому воздействию (<http://ru.science.wikia.com/wiki>).

### 3. Скорость вращения Земли как индекс приливных колебаний

Приливные деформации Земли оказывают заметное влияние на скорость суточного вращения Земли. Напомним, что из-за вращения

Земля имеет форму эллипсоида вращения со сжатием  $1/298$  (экваториальный радиус Земли превышает полярный на 21 км.). Приливообразующая сила растягивает Землю вдоль прямой, соединяющей ее центр с центром возмущающего тела – Луны или Солнца. При этом величина сжатия Земли увеличивается, когда ось растяжения совпадает с плоскостью экватора, и уменьшается, когда ось растяжения отклоняется к тропикам. Момент инерции сжатой Земли больше, чем недеформированной шарообразной планеты. А поскольку момент импульса Земли (т.е. произведение ее момента инерции на угловую скорость) должен оставаться постоянным, то скорость вращения сжатой Земли меньше, чем недеформированной. Ввиду того, что склонения Луны и Солнца, а также расстояния от Земли до Луны и Солнца постоянно меняются, лунно-солнечная приливообразующая сила колеблется во времени. Соответственно образом меняется сжатие Земли, что в конечном итоге и вызывает приливные колебания скорости вращения Земли.

Теория приливных колебаний скорости вращения Земли основана на теории лунно-солнечного приливного потенциала. В настоящее время для вычисления приливных колебаний скорости вращения Земли в службах времени используются 62 гармоника зонального прилива с периодами от пяти суток до 18,6 лет [3]. Наиболее значительными из них являются колебания с полумесячным, месячным и полугодовым периодами (рис. 2 и 3).

На рис. 2 вычисленные приливные колебания (сплошная кривая) сравниваются с измеренными астрометристами вариациями угловой скорости вращения Земли с 1 октября 2006 г. по 31 декабря 2007 г. (пунктир). Некоторые расхождения в ходе этих кривых возникают из-за влияния атмосферной циркуляции. Если исключить из измеренных вариаций эффект атмосферы, то можно констатировать, что теория хорошо воспроизводит приливные колебания угловой скорости вращения Земли.

Скорость вращения Земли характеризуется относительной величиной:

$$v \equiv \frac{\delta\omega}{\Omega} = \frac{\omega - \Omega}{\Omega} \approx \frac{\Pi_3 - T}{T} \equiv \frac{\delta\Pi}{T}, \quad (1)$$

где  $\Pi_3$  – длительность земных суток;  $T$  – длительность стандарт-



колебания с полугодовым (182,62 сут.) и годовым (365,25 сут.) периодами. Как видно по ходу огибающей полумесячных колебаний у на рис. 3, максимумы скорости вращения Земли наблюдаются в июне и декабре, но из-за некратности лунного месяца солнечному году от одного декабрьского максимума до другого проходит либо 13, либо 14 лунных сидерических месяцев, то есть лунно-солнечный приливный год имеет длительность либо 355 сут., либо 382 сут. Под лунно-солнечным годом здесь понимается интервал времени, содержащий целое число лунных месяцев и максимально близкий к солнечному году. Большая часть лунно-солнечных приливных лет имеет продолжительность 355 сут., а меньшая — 382 сут. Средняя длительность лунно-солнечного приливного года близка к 368 сут. Помимо лунного года имеются еще более длительные циклы: сарос (223 синодических месяца), Метонов цикл (235 месяцев), инекс (358 месяцев) и т.д.

Синхронный мониторинг приливных колебаний скорости вращения Земли, эволюции синоптических процессов в атмосфере, режимов атмосферной циркуляции и вариаций гидрометеорологических характеристик во времени показал, что большая часть типов синоптических процессов в атмосфере меняется синхронно с приливными изменениями угловой скорости вращения Земли. Между приливными колебаниями скорости вращения Земли и изменениями синоптических процессов в атмосфере имеется статистически значимое синхронное соответствие [2]. Длительности естественных синоптических периодов (ЕСП) и режимов вращения Земли совпадают. Приливные колебания скорости вращения Земли обусловлены лунно-солнечными зональными приливами, следовательно, и изменения ЕСП вызваны приливами. Спектры вариаций момента импульса атмосферы и аномалий температуры воздуха четко показывают преобладание гармоник лунно-солнечных приливов [5].

Таким образом, эволюция синоптических процессов в атмосфере происходит не только за счет внутренней динамики климатической системы, но и под синхронизирующим управлением лунно-солнечных приливов (из-за захвата их частоты). ЕСП синхронизованы колебаниями приливных сил и их смена происходит в соответствии с изменениями знака приливных сил [6].

Приливы влияют на меридиональную циркуляцию воздуха и вариации атмосферного давления. Повышенное давление, вызываемое

лунным приливом, приводит летом к положительным аномалиям температуры воздуха, а зимой — к отрицательным, т.е. аномалии температуры в месячном цикле зависят от сезона года. При анализе и прогнозе температуры необходимо учитывать эту зависимость. Это можно сделать, только выбирая для прогноза интервал времени, содержащий целое число солнечных лет (или близкий к нему интервал, кратный солнечному году).

Возникает вопрос, можно ли учесть влияние Луны на аномалии температуры воздуха путем вычисления средних многолетних норм, аналогичных солнечным годовым нормам для температуры. К сожалению, сделать это практически невозможно. Дело в том, что геоцентрическое расстояние и склонение Луны изменяются не только с месячными, но и, соответственно, с периодами 8,847 и 18,613 лет. Поэтому нормы должны быть вычислены за период, кратный трем периодам (в годах)  $[18,613, 8,847, 1] \approx [186/10, 186/21, 186/186]$ . То есть наименьший период для лунных норм аномалий метеозлементов должен быть не год и даже не 19 лет, а хотя бы 186 лет. Необходимо по меньшей мере десятикратное осреднение этих аномалий для статистической надежности лунных норм. Таким образом, надо иметь 1860-летние ряды наблюдений метеозлементов с суточной дискретностью. Ясно, что таких рядов инструментальных наблюдений нет, и вычислить лунные нормы метеозлементов нам не удастся. Поэтому единственный путь учета приливных эффектов Луны в прогнозах аномалий температуры и других метеозлементов есть путь подбора аналогов по колебаниям приливных сил или приливных колебаний угловой скорости  $\gamma$ .

Был разработан следующий способ прогноза гидрометеорологических характеристик [3]. Колебания скорости вращения Земли  $\gamma$  уверенно вычисляются с любой дискретностью и заблаговременностью на основании теории [3]. По предвычисленным на прогностический период (ближайший год) значениям скорости вращения Земли  $\gamma$  с помощью корреляционного анализа определяется аналогичный период в прошлом с таким же примерно режимом скорости вращения Земли. Предполагается, что расписание синоптических процессов и ход аномалий гидрометеорологических характеристик в прогностическом отрезке времени будет таким же, как, в периоде аналога. Аномалии гидрометеорологических характеристик, наблюдавшиеся в границах

периода аналога, принимаются за ожидаемые. Затем к ним прибавляются соответствующие *нормы*, и таким образом вычисляется прогноз гидрометеорологических характеристик. Один аналог не может отразить весь спектр изменчивости рассматриваемой характеристики. Много аналогов приведут к нулевым аномалиям. Поэтому необходимы исследования по оптимизации выбора аналогов, например, путем вычисления и анализа взаимных корреляционных функций.

В этой статье представлены результаты исследования успешности возможных аналогов для прогноза аномалий температуры в 2000 и 2009 гг. по пункту ВДНХ в г. Москве. По рядам фактических аномалий температуры за эти годы были найдены максимальные коэффициенты корреляции  $r$  между рядом аномалий температуры в периоде аналога и рядом фактических аномалий температуры в прогностическом отрезке времени. За периоды-аналоги принимались обособленные выше интервалы времени, удаленные от прогностических сроков в прошлое на 355–382 суток либо на 19 лет. Результаты исследований приведены в табл. 1 и 2. Наиболее успешные аналоги (столбец 2) или их комбинации (для годового интервала времени – иногда с весами) выделены полужирным шрифтом. Чем выше коэффициент корреляции  $r$ , тем лучше аналог. Максимальный коэффициент корреляции  $r$  (последний столбец) достигается при некотором сдвиге  $\tau$  выбранного интервала аналога. Он указан в третьем столбце. В четвертом столбце указаны интервалы времени для оптимальных аналогов (с учетом сдвига  $\tau$ ).

Анализ таблиц показывает, что в 2000 и 2009 гг. единый аналог для прогноза на год около 367 сут. Он дал максимальную корреляцию  $0,27 \pm 0,21$  в 2000 году и  $0,21 \pm 0,20$  в 2009 году. Более высокие корреляции получаются, если подбирать аналоги для сезонов. Оказывается, что они меняются от сезона к сезону. Так, в 2000 году лучшим аналогом для зимы был 356 сут. (рис. 4а), для весны и осени – около 367 сут. (рис. 4б и 4г), а летом – 382 сут. (рис. 4в). В 2009 г. аналогами были 350 сут. – для зимы (рис. 5а), 395 сут. – для весны (рис. 5б) и 19 лет – для лета (рис. 5в). Для осени 2009 года аналогов, дающих значимую корреляцию, найти не удалось.

Таким образом, синхронизация цикличности синоптических процессов и аномалий температуры происходит преимущественно

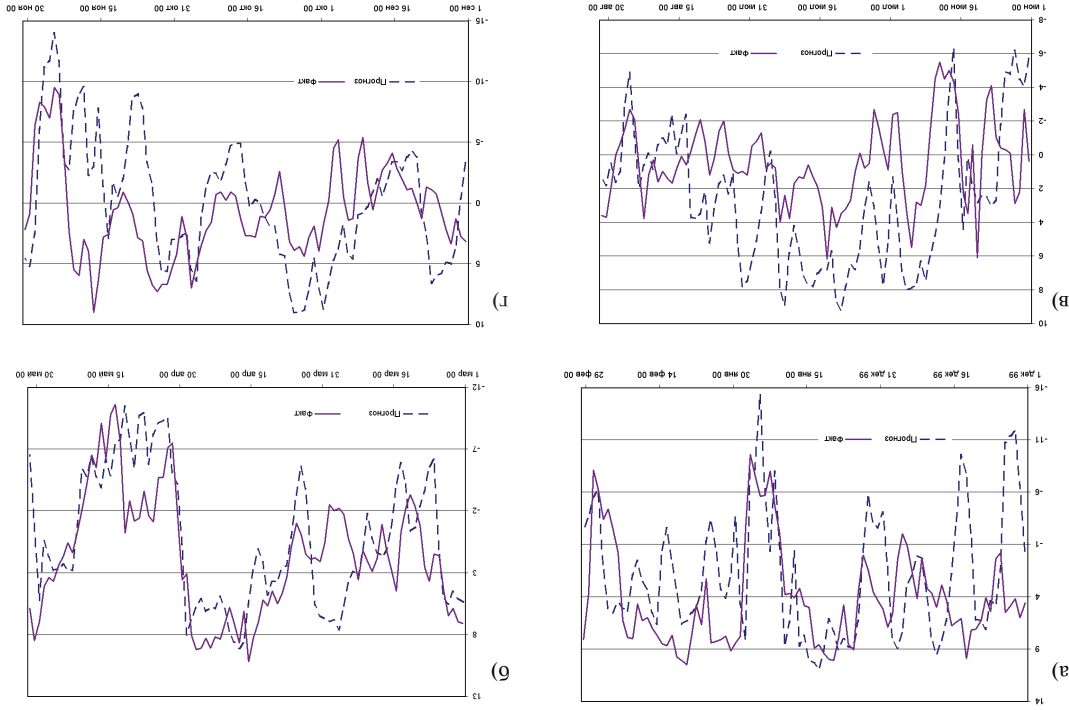
Таблица 1  
Периоды-аналоги для прогноза аномалий температуры на 2000 год

№	Аналог (сутки)	Сдвиг $\tau$ (сутки)	Оптимальный аналог	Корреляция с фактом $r$
Прогноз на год				
1	355	12	367	$0,25 \pm 0,21$
2	382	-15	367	$0,28 \pm 0,21$
<b>3</b>	<b>365</b>	<b>2</b>	<b>367</b>	<b><math>0,27 \pm 0,21</math></b>
4	19 лет	15		$0,21 \pm 0,20$
5	$355 + 1/2(382)$	13		$0,17 \pm 0,20$
6	зима и лето – $355 + 1/2(382)$ , весна и осень – 365	1		$0,38 \pm 0,21$
7	382+365	2		$0,18 \pm 0,20$
8	382, лето 365	5		$0,25 \pm 0,21$
Прогноз на зиму 1999–2000 года (декабрь-1999 г. – февраль 2000 г.)				
<b>1</b>	<b>355</b>	<b>1</b>	<b>356</b>	<b><math>0,38 \pm 0,33</math></b>
2	382	-26	356	$0,27 \pm 0,35$
3	365	-9	356	$0,36 \pm 0,33$
4	19 лет	14		$0,40 \pm 0,38$
Прогноз на весну (март–май 2000 года)				
1	355	11	365	$0,62 \pm 0,50$
2	382	-17	365	$0,56 \pm 0,48$
<b>3</b>	<b>365</b>	<b>0</b>	<b>365</b>	<b><math>0,67 \pm 0,50</math></b>
4	19 лет	23		$0,46 \pm 0,40$
Прогноз на лето (июнь–август 2000 года)				
1	355	27	382	$0,23 \pm 0,29$
<b>2</b>	<b>382</b>	<b>0</b>	<b>382</b>	<b><math>0,37 \pm 0,30</math></b>
3	365	17	382	$0,33 \pm 0,29$
4	19 лет	17		$0,28 \pm 0,31$
Прогноз на осень (сентябрь–ноябрь 2000 года)				
1	355	12	367	$0,40 \pm 0,40$
2	382	-15	367	$0,39 \pm 0,38$
<b>3</b>	<b>365</b>	<b>2</b>	<b>367</b>	<b><math>0,39 \pm 0,40</math></b>
4	19 лет	9		$0,33 \pm 0,37$

Таблица 2  
Периоды-аналоги для прогноза аномалий температуры на 2009 год

№	Аналог (сутки)	Сдвиг $\tau$ (сутки)	Оптимальный аналог	Корреляция с фактом $r$
Прогноз на год				
1	355	10	365	0,21±0,20
2	382	-17	365	0,21±0,20
3	365	0	365	<b>0,21±0,20</b>
4	19 лет	-5		0,19±0,20
5	355+1/2(382)	13		0,21±0,21
6	355+1/2(382), лето 365	13		0,22±0,21
7	382+365	-15		0,21±0,21
8	382, лето 365	13		0,23±0,21
Прогноз на зиму 2008–2009 года (декабрь 2008 г. – февраль 2009 г.)				
1	355	-5	350	<b>0,43±0,39</b>
2	382	-32	350	0,43±0,39
3	365	-15	350	0,43±0,39
4	19 лет	14		0,22±0,36
Прогноз на весну (март–май 2009 года)				
1	355	40	395	0,39±0,35
2	382	13	395	<b>0,39±0,35</b>
3	365	30	395	0,39±0,35
4	19 лет	11		0,24±0,33
Прогноз на лето (июнь–август 2009 года)				
1	355	-24	331	0,32±0,33
2	382	-51	331	0,32±0,33
3	365	-34	331	0,32±0,32
4	19 лет	25		<b>0,63±0,33</b>
Прогноз на осень (сентябрь–ноябрь 2009 года)				
1	355	60	415	0,40±0,40
2	382	33	415	<b>0,39±0,38</b>
3	365	50	415	0,39±0,40
4	19 лет	8		0,33±0,37

Рис. 4. Ход фактических и прогнозных аномалий температуры в 2000 году: а) зимой 1999–2000 г., аналог 356 сут.; б) весной 2000 г., аналог 365 сут.; в) летом 2000 г., аналог 382 сут.; г) осенью 2000 г., аналог 367 сут. По оси ординат – аномалия температуры в °С



на лунных циклах (355, 367, 382 сут.), близких к солнечному году. Возможно также синхронизация вблизи цикла Метона — 19 лет.

В отклике системы ВАЦ проявляется периодичность, определяемая слабым периодическим воздействием КЛСП. Наиболее вероятная схема суммарного эффекта подпорогового периодического воздействия КЛСП и хаотического воздействия климатической системы, описанная в разделе 2.

### Список литературы

1. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. — М.: Наука, Физматлит, 1981.
2. Сидоренков Н.С. Приливные колебания атмосферной циркуляции // Труды Гидрометцентра России. — 2000. — Вып. 331. — С. 49—63.
3. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. — СПб.: Гидрометеиздат, 2002. — 366 с.
4. Сидоренков Н.С., Сидоренков П.Н. Способ прогноза гидрометеорологических характеристик. Патент на изобретение № 2182344 от 10 мая 2002 года.
5. Сидоренков Н.С., Сумерова К.А. Геодинамика и гидрометеорологические прогнозы // 80 лет Гидрометцентру России. — М.: Триада ЛТД, 2010. — С. 254—263.
6. Sidoronkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim. — 2009. — 305 p.

Рис. 5. Ход фактических и прогнозных аномалий температуры в 2009 году: а) зимой 2008—2009 г., аналог 2009 г.; б) весной 2009 г., аналог 395 сут.; в) летом 2009 г.; аналог 19 лет. По оси ординат — аномалия температуры в °С

