

## 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 Земли, на расстоянии примерно 4670 км от её 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.

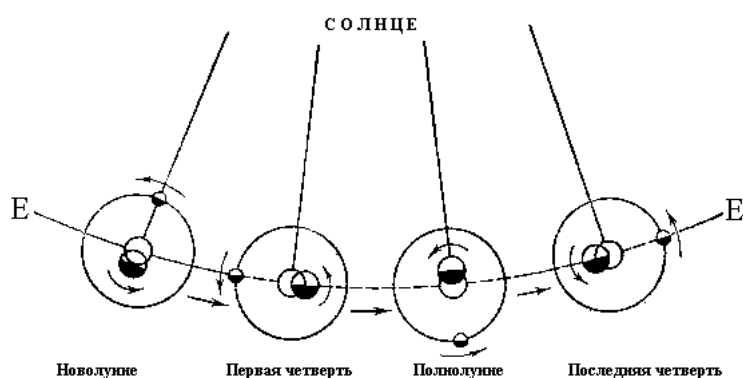


Рис. 1. Движение Земли и Луны вокруг барицентра и фазы Луны. Внешние и внутренние круги изображают орбиты центров масс Луны и Земли соответственно. Дуга ЕЕ изображает траекторию движения барицентра вокруг Солнца

Величина приливной силы есть функция склонения и геоцентрического расстояния Луны (или Солнца). Амплитуда месячных колебаний склонения Луны изменяется с периодом 18,61 лет от  $29^\circ$  до  $18^\circ$  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 1 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 вероятен, 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) остаётся неизменной, а частота других подстраивается под неё [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.

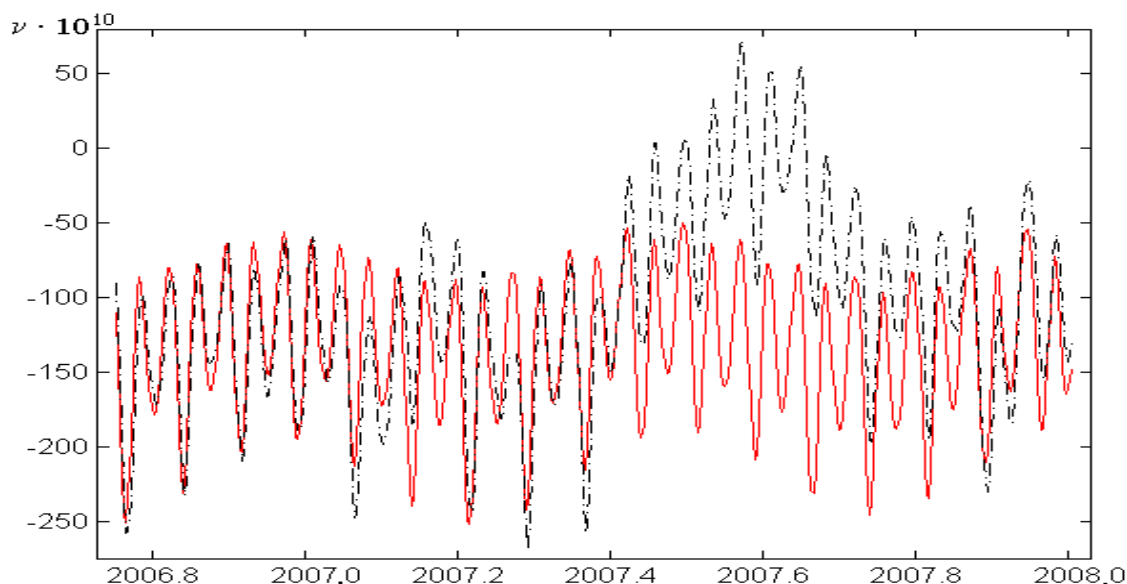
Рассмотрим теперь суммарный эффект подпорогового периодического и хаотического воздействий. Само по себе подпороговое периодическое воздействие не сможет перебросить систему в другое состояние, однако шум помогает этому, подводя воздействие к «критическому» состоянию. В результате в отклике другой системы 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 приводят 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 её 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. Соответствующим 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 гармоники зонального прилива с периодами от 5 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.



**Рис. 2.** Измеренные (пунктир) и прогнозируемые (сплошная кривая) приливные колебания скорости вращения Земли с 1 октября 2006 г. по 31 декабря 2007 г. По оси ординат отложены относительные отклонения угловой скорости  $V$  в  $10^{-10}$ . Для совпадения масштаба обеих шкал  $V$  ко всем измеренным значениям прибавлена постоянная величина  $150 \times 10^{-10}$ .

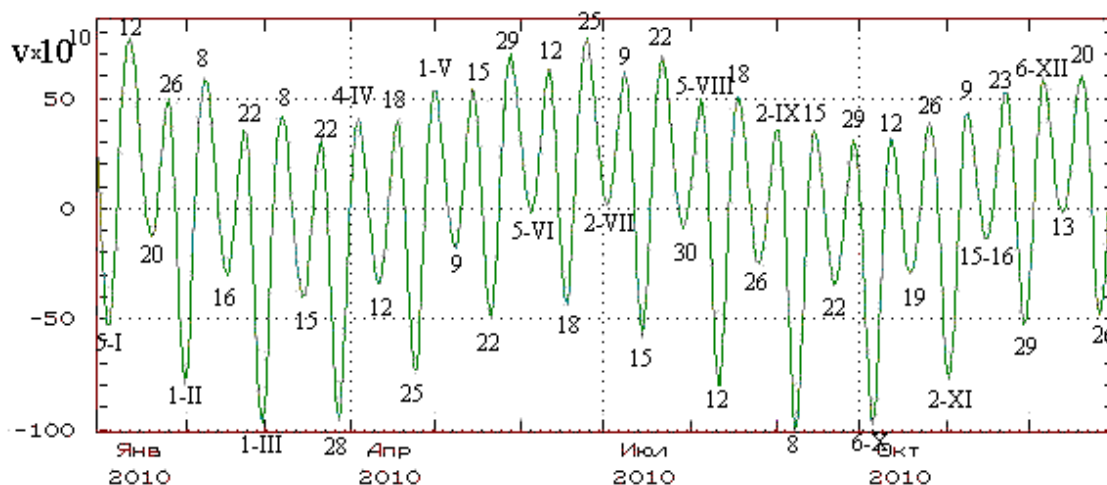
Скорость вращения Земли характеризуется относительной величиной:

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

где  $P_s$  — длительность земных суток;  $T$  — длительность стандартных (атомных или эфемеридных) суток, равная 86400 с;  $\omega = \frac{2\pi}{P_s}$  и  $\Omega = \frac{2\pi}{86400}$  — угловые скорости, рад/с, соответствующие земным и стандартным суткам [3]. Поскольку величина  $\omega$  изменяется только в девятом–восьмом знаке, то значения  $v$  имеют порядок  $10^{-9} - 10^{-8}$ .

Как видно из рис. 3, на протяжении лунного месяца сменяют друг друга четыре режима вращения Земли неравной продолжительности — два периода ускорения длительностью  $m_1$  и  $m_3$  и два периода замедления длительностью  $m_2$  и  $m_4$ . Смена режимов происходит в среднем через  $m_i \approx 27,3/4 = 6,8$  сут. Однако из-за медленного движения перигея и узлов лунной

орбиты этот период варьирует от 5 до 8 сут: Например, в 2010 году с 4 по 12 апреля отмечалось замедление, с 12 по 18 апреля – ускорение, с 18 по 25 апреля – замедление и с 25 апреля по 1 мая – ускорение, то есть лунный месяц сложился из интервалов 8+6+7+6 сут. Внутри месяца возможны любые комбинации значений  $m_i$  в диапазоне от 5 до 8 сут. Неизменным здесь остается лишь месячный период 27,3 сут.



**Рис. 3. Прогноз приливных колебаний скорости вращения Земли  $V$  на 2010 год.**

По оси ординат отложены относительные отклонения угловой скорости  $V$  в  $10^{-10}$ . Цифрами отмечены даты наступления максимумов и минимумов  $V$

Скорость вращения Земли  $v$  варьирует преимущественно внутри сидерического месяца (27,3 сут.). В течение этого периода времени Луна перемещается из своего крайнего положения в Северном полушарии, когда её положительное склонение максимально, к минимальному отрицательному склонению в Южном полушарии и затем снова возвращается в Северное полушарие к максимальному склонению. При этом скорость вращения Земли испытывает два полумесячных колебания с максимумами при максимальном удалении Луны от экватора Земли, как в Северное, так и в Южное полушарие, и минимумами при пересечении Луной экватора. На скорость вращения Земли оказывают влияние и солнечные приливы, связанные с вариациями склонения и геоцентрического расстояния Солнца. Солнечные приливы порождают колебания с полугодовым (182,62 сут.) и годовым (365,25 сут.) периодами. Как видно по ходу огибающей полумесячных колебаний  $v$  на рис. 3, максимумы скорости вращения Земли наблюдаются в июне и в декабре, но из-за не кратности 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 месячным, 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 метеоэлементов 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 метеоэлементов с суточной дискретностью. Ясно, что таких рядов инструментальных наблюдений нет, и вычислить лунные нормы метеоэлементов нам не удастся. Поэтому единственный путь учета приливных эффектов Луны в прогнозах аномалий температуры и других метеоэлементов есть путь подбора аналогов по колебаниям приливных сил или приливных колебаний угловой скорости  $\nu$ .

Был разработан следующий способ прогноза гидрометеорологических характеристик [3]. Колебания скорости вращения Земли  $\nu$  уверенно вычисляются с любой дискретностью и заблаговременностью на основании теории [3]. По предвычисленным на прогностический период (ближайший год) значениям скорости вращения Земли  $\nu$  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 году 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 обоснованные 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  $\tau$ ).

Таблица 1

Периоды-аналоги для прогноза аномалий температуры на 2000 год

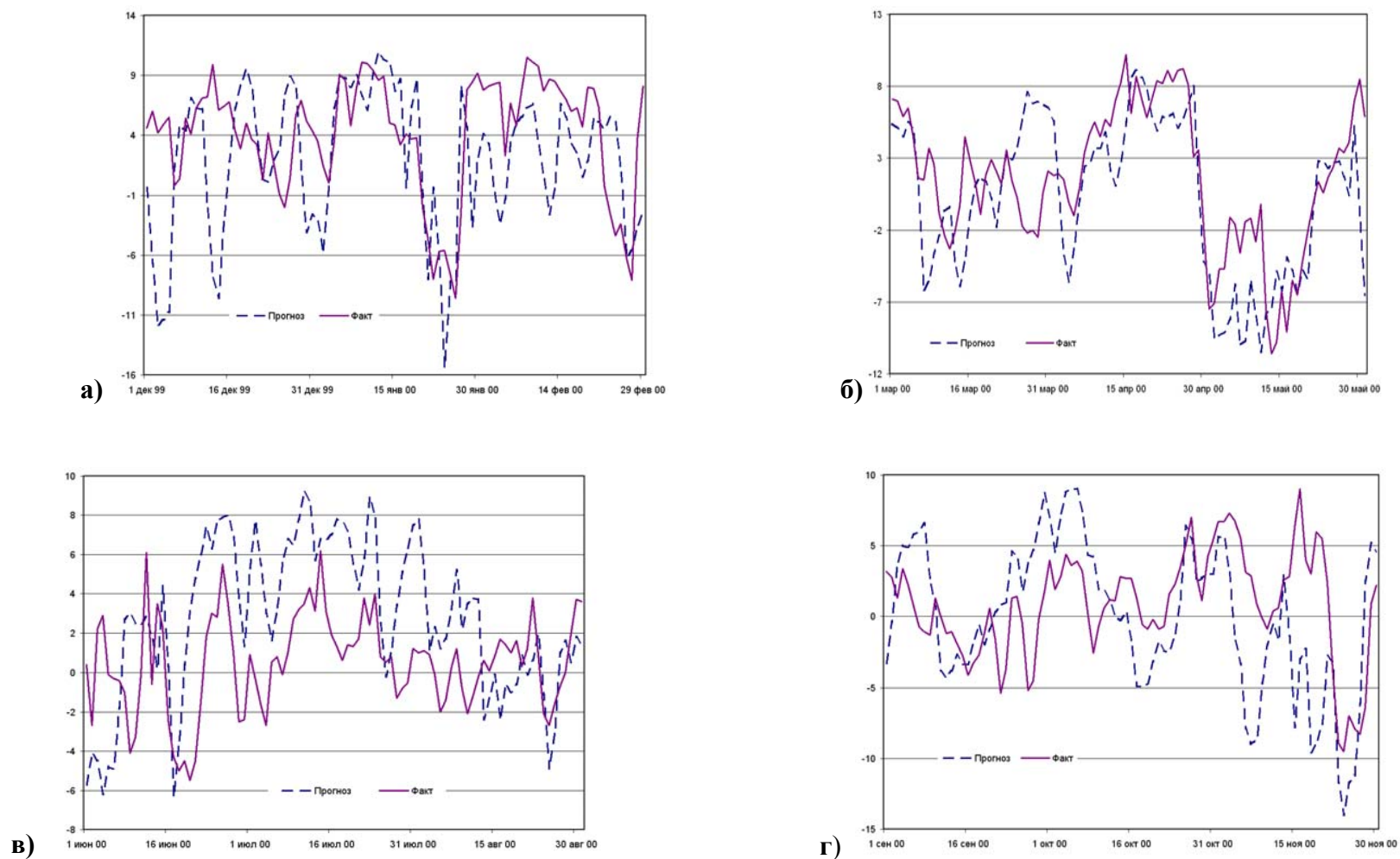
№	Аналог (сутки)	Сдвиг $\tau$ (сутки)	Оптимальный аналог	Корреляция с фактом $r$
<b>Прогноз на год</b>				
1	355	12	367	0,25 ± 0,21
2	382	-15	367	0,28 ± 0,21
<b>3</b>	<b>365</b>	<b>2</b>	<b>367</b>	<b>0,27 ± 0,21</b>
4	19 лет	15		0,21 ± 0,20
5	355+1/2(382)	13		0,17 ± 0,20
6	зима и лето – 355+1/2(382),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



## Периоды аналоги для прогноза аномалий температуры на 2009 год

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

Анализ таблиц показывает, что в 2000 и 2009 году единый аналог для прогноза на год около 367 сут. Он дал максимальную корреляцию 0,27±0,21 в 2000 году и 0,21±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.

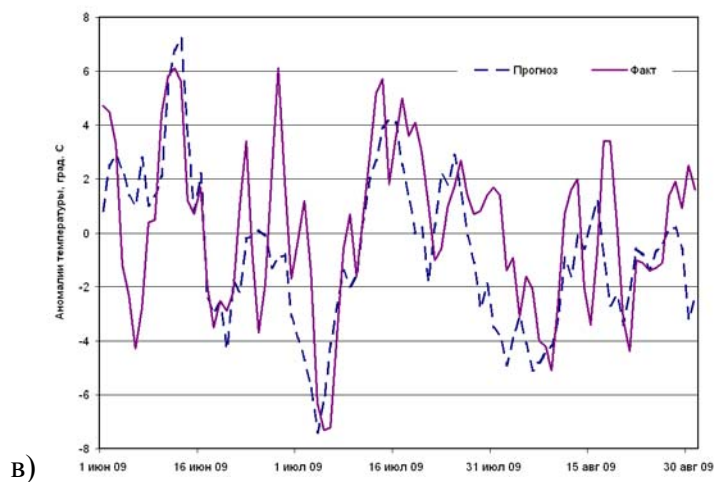
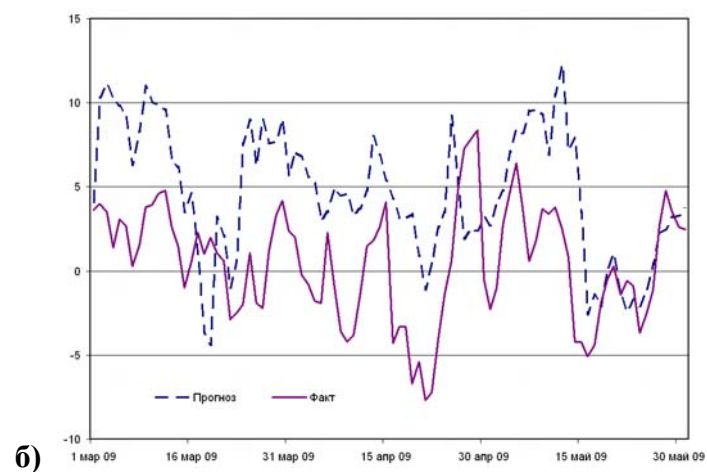
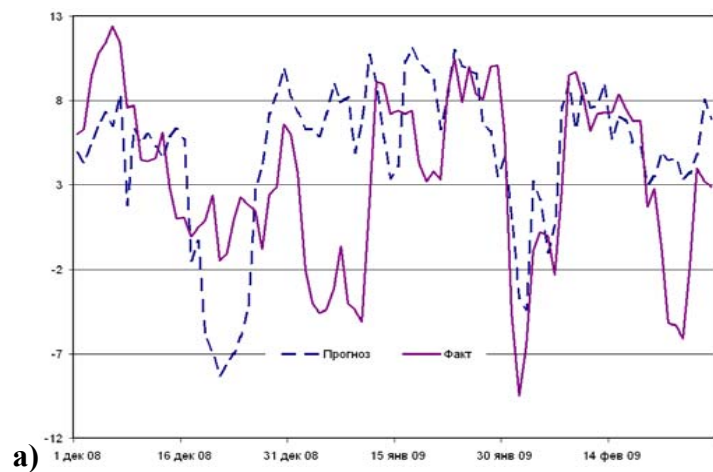


**Рис. 4. Ход фактических и прогностических аномалий температуры в 2000 году.**

**(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 – аномалии температуры в градусах Цельсия



**Рис. 5. Ход фактических и прогностических аномалий температуры в 2009 году.**

**(а) Зимой 2008–2009 г. Аналог 350 сут. (б) Весной 2009 г. Аналог 395 сут.**

**(в) Летом 2009 г. Аналог 19 лет.**

По оси ординат – аномалии температуры в градусах Цельсия

Таким образом, синхронизация цикличности синоптических процессов и аномалий температуры происходит преимущественно на лунных циклах (355, 367, 382 сут.), близких к солнечному году. Возможна также синхронизация вблизи цикла Метона – 19 лет.

В отклике системы ВАЦ проявляется периодичность, определяемая слабым периодическим воздействием КЛСП. Наиболее вероятна 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 г.
5. *Сидоренков Н.С., Сумерова К.А.* Геодинамика и гидрометеорологические прогнозы // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 254–263.
6. *Sidorenkov N.S.* The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim. – 2009. – 305 p.