

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 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.

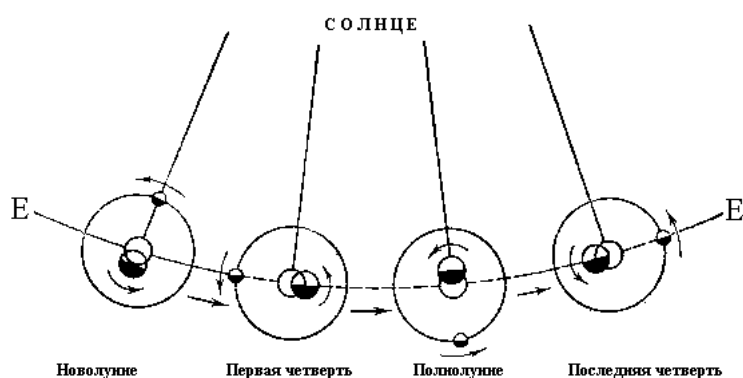


Рис. 1. Движение Земли и Луны вокруг барицентра и фазы Луны. Внешние и внутренние круги изображают орбиты центров масс Луны и Земли соответственно. Дуга ЕЕ изображает траекторию движения барицентра вокруг Солнца

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° 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 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.

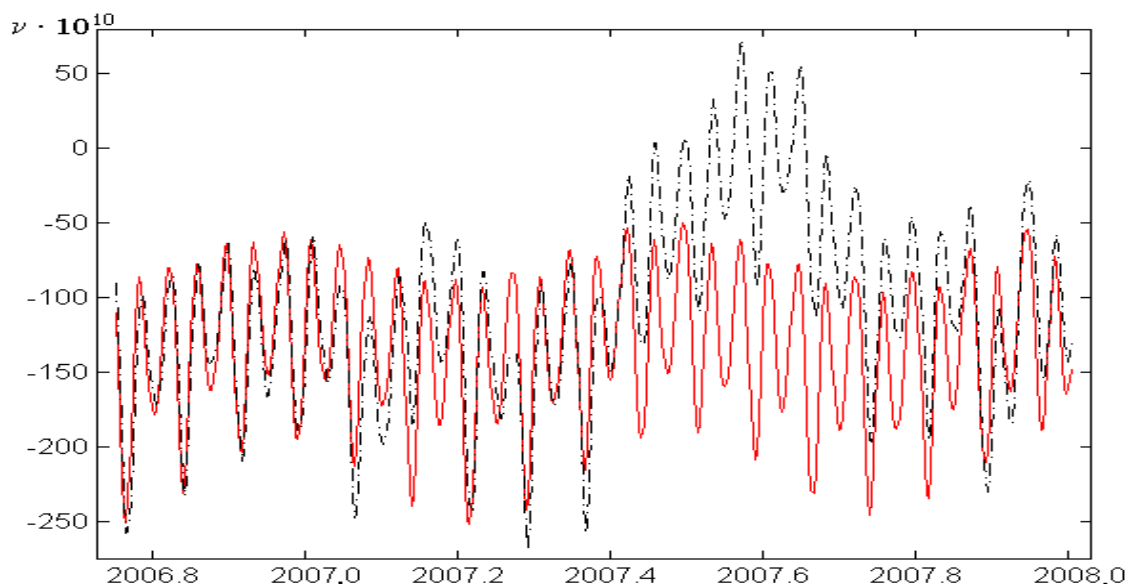


Рис. 2. Измеренные (пунктир) и прогнозируемые (сплошная кривая) приливные колебания скорости вращения Земли с 1 октября 2006 г. по 31 декабря 2007 г. По оси ординат отложены относительные отклонения угловой скорости V в 10^{-10} . Для совпадения масштаба обеих шкал V ко всем измеренным значениям прибавлена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

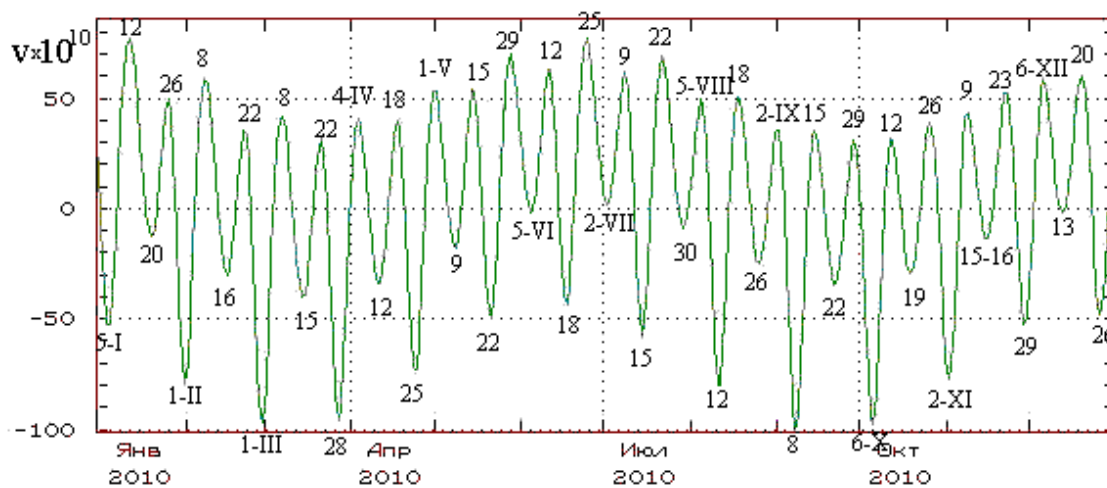


Рис. 3. Прогноз приливных колебаний скорости вращения Земли V на 2010 год.

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 ν .

Был разработан следующий способ прогноза гидрометеорологических характеристик [3]. Колебания скорости вращения Земли ν уверенно вычисляются с любой дискретностью и заблаговременностью на основании теории [3]. По предвычисленным на прогностический период (ближайший год) значениям скорости вращения Земли ν 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 τ выбранного интервала аналога. Он указан в третьем

столбце. В четвертом столбце указаны интервалы времени для оптимальных аналогов (с учетом сдвига τ).

Таблица 1

Периоды-аналоги для прогноза аномалий температуры на 2000 год

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

Периоды аналоги для прогноза аномалий температуры на 2009 год

№	Аналог (сутки)	Сдвиг τ (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	0,21 ±0,20
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	0,43±0,39
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	0,39±0,35
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		0,63±0,33
Прогноз на осень (сентябрь–ноябрь 2009 года)				
1	355	60	415	0,40±0,40
2	382	33	415	0,39±0,38
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.

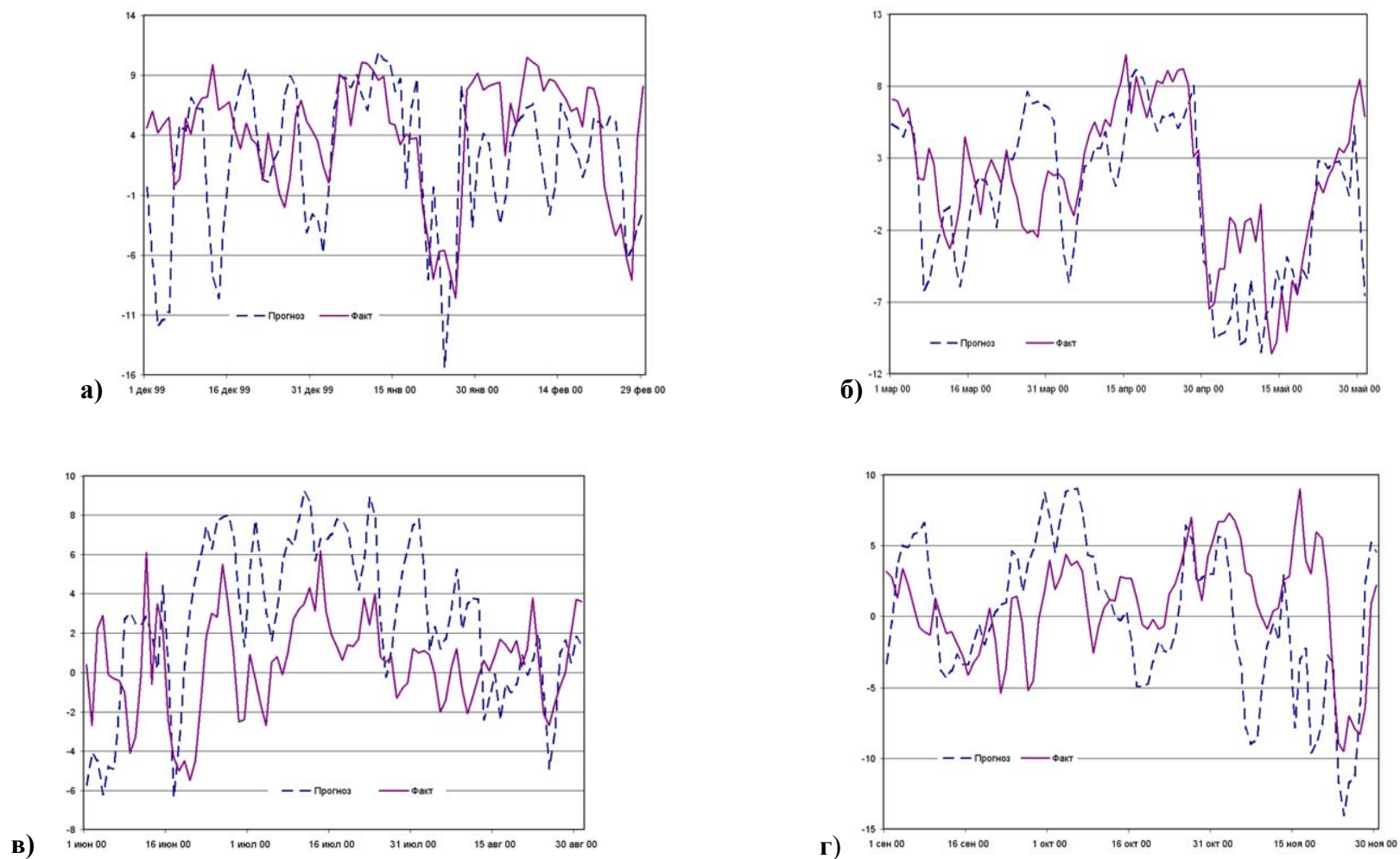
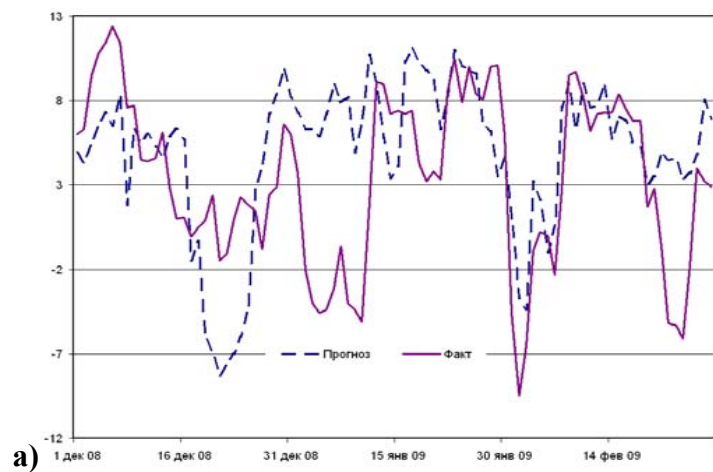


Рис. 4. Ход фактических и прогностических аномалий температуры в 2000 году.

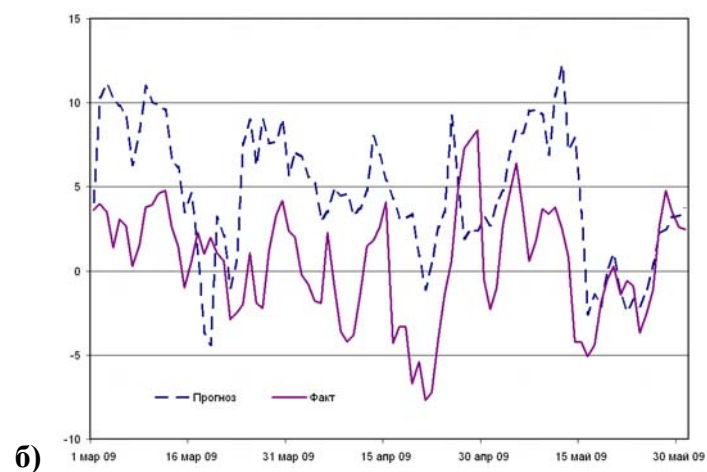
(а) Зимой 1999–2000 г. Аналог 356 сут. (б) Весной 2000 г. Аналог 365 сут.

(в) Летом 2000 г. Аналог 382 сут. (г) Осенью 2000 г. Аналог 367 сут.

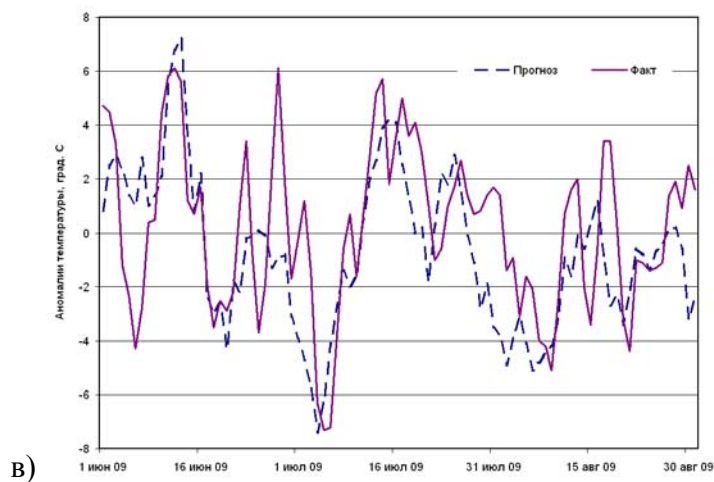
По оси ординат – аномалии температуры в градусах Цельсия



а)



б)



в)

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.