

## **МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КЛИМАТА**

### **Введение**

Задача мониторинга климата является важной составной частью Всемирной климатической программы, выполняемой под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) при поддержке ЮНЕП и других межправительственных организаций в рамках Всемирной программы климатических данных и мониторинга климата. Важнейшим климатообразующим фактором является атмосферная циркуляция. Регулярная подготовка данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата является актуальной задачей Росгидромета. До настоящей работы в Росгидромете не было утвержденной методики подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата.

Целью подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы является:

- регулярное слежение за состоянием атмосферной циркуляции, включающее оценки степени аномальности ее текущего состояния и выявление экстремальных режимов;
- оценка наблюдаемых тенденций изменения характеристик общей циркуляции атмосферы и параметров вращения Земли;
- выявление связей изменений климата с режимами атмосферной циркуляции и геодинамическими процессами.

Гидрометцентром России совместно с ВНИИГМИ-МЦД начиная с 1986 года подготавливаются справочно-аналитические материалы с данными наиболее важных крупномасштабных характеристик атмосферной циркуляции и некоторых геодинамических параметров. На основе этих данных по 5-летним периодам (1986–1990, 1991–1995, 1996–2000 гг.) публиковались бюллетени, а в 2012 г. издана обобщающая коллективная монография «Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие» [1].

В соответствии с Планом НИР и ОКР Росгидромета на 2011–2013 гг. (тема 1.3.1.1) в ФГБУ «Гидрометцентр России» создана методика подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата. Список характеристик, за которыми ведется мониторинг, включает индексы квазидвухлетней цикличности зонального ветра в экваториальной стратосфере, компоненты момента импульса атмосферы, индексы Южного

колебания, параметры угловой скорости вращения Земли и движения географических полюсов.

Предложенная методика основана на использовании регулярно пополняемых информационных баз, средств расчета индексов и статистик, средств подготовки выходных материалов мониторинга.

### 1. Квазидвухлетняя цикличность зонального ветра в экваториальной стратосфере

Среди многочисленных несезонных колебаний атмосферной циркуляции квазидвухлетняя цикличность (КДЦ) является наиболее стабильной и значимой. Она четко проявляется в экваториальной стратосфере, где западные ветры сменяются восточными, а восточные в свою очередь – западными через каждые примерно 28 месяцев [2, 6].

Б.С. Чучкаловым был предложен индекс  $\Pi$  квазидвухлетней цикличности экваториальных ветров [3]. Он представляет собой значение потока массы через меридиональное сечение экватора шириной 1 м и высотой от 19 до 31 км (т.е. от 66,63 до 10,07 гПа). Для вычислений необходимы данные о ветре на изобарических поверхностях 70, 50, 30, 20 и 10 гПа. Индекс  $\Pi$  рассчитывается по формуле

$$\Pi = \iint \rho \vec{V} dS = 1 \cdot \int_{19}^{31} \rho u dz = \frac{1}{g} \int_{P=10,07}^{P=66,63} u dp = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^4 u_i \Delta p_i, \quad (1)$$

где  $\vec{V}$  – вектор скорости ветра;  $u$  – средняя скорость зонального ветра на уровне  $P$  в гПа ( $u > 0$  для западного ветра и  $u < 0$  для восточного ветра);  $dS$  – элементарная площадка единичной ширины с высотой  $dz$ ;  $\rho$  – плотность воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P$  – атмосферное давление. Наш опыт работы с индексом  $\Pi$  показал, что он труден для восприятия. Поэтому мы пересчитываем индекс  $\Pi$  в значение средней скорости  $\bar{u}$  зонального ветра в слое от 19 до 31 км [2, 9]. Связь между индексами  $\Pi$  и  $\bar{u}$  такова:

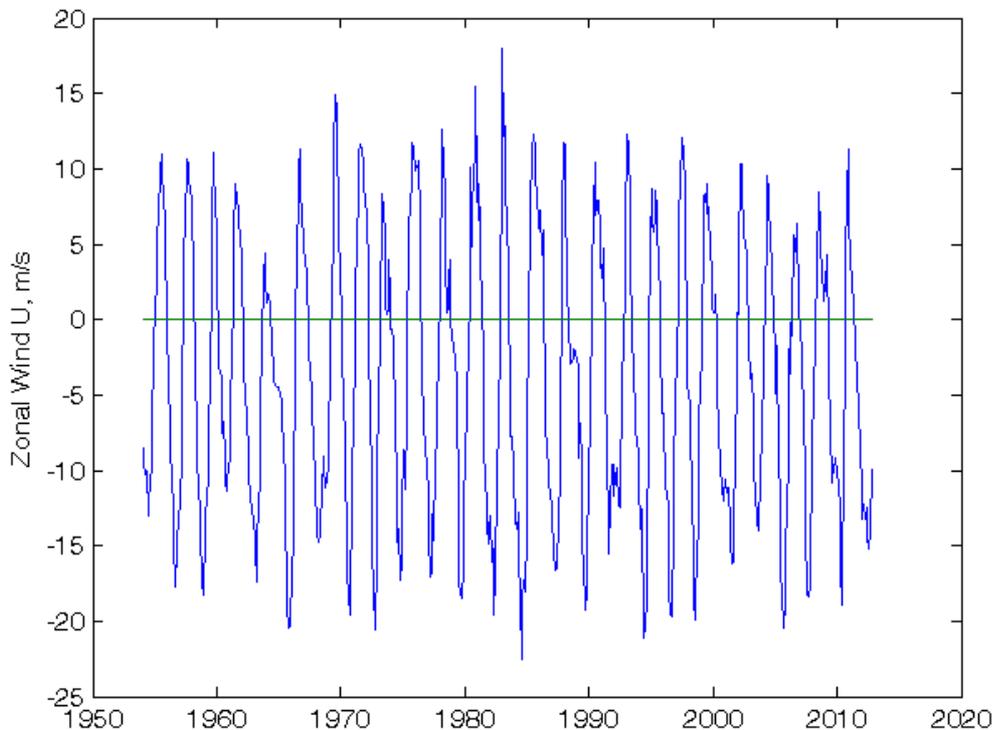
$$\bar{u} = \frac{\frac{1}{g} \int u dp}{\frac{1}{g} \int dp} = \frac{\frac{1}{g} \sum_{i=1}^4 u_i \Delta p_i}{\frac{1}{g} \sum_{i=1}^4 \Delta p_i} = \frac{9,8 \Pi}{56,56} = \frac{\Pi}{577,14}. \quad (2)$$

Таким образом, чтобы получить среднюю скорость  $\bar{u}$  зонального ветра в слое от 19 до 31 км, выраженную в м/с, надо значение индекса  $\Pi$  разделить на постоянную 577,14.

С 70-х гг. Гидрометцентр СССР осуществлял регулярный контроль квазидвухлетней цикличности ветров в экваториальной стратосфере с помощью радиозондовых и ракетных наблюдений. Одновременные наблюдения, проведенные научно-исследовательскими судами в различных точках экватора, показали, что все данные настолько мало отличаются друг от

друга, что для характеристики квазидвухлетней цикличности ветров достаточно наблюдений только в одной точке, близко расположенной к экватору.

В конце 80-х гг. мониторинг квазидвухлетней цикличности, основанный на информации научно-исследовательских судов, сократился, поэтому возникла необходимость в разработке альтернативной технологии мониторинга зонального ветра в экваториальной стратосфере и индекса П, не требующей экспедиционных судовых наблюдений. Была составлена программа для выбора ежедневных наблюдений за 0 и 12 ч Всемирного координированного времени UTC всех аэрологических станций, лежащих вблизи экватора (зона  $\pm 5^\circ$  широты). Эти данные регулярно считываются из телеграмм станций, поступающих в базу SHOT банка данных "Прогноз" Гидрометцентра России, и записываются в специальный массив. По ним вычисляются среднее суточное значение ветра на поверхностях 100, 70, 50, 30, 20 и 10 гПа и среднее суточное значение индекса квазидвухлетней цикличности (КДЦ). По истечении месяца вычисляются средние за месяц значения скоростей ветра и индекса КДЦ. Суточные и среднемесячные значения скоростей ветра и индексов КДЦ выдаются в виде таблицы. Значения индекса КДЦ архивируются. К настоящему времени накоплен 60-летний (с 1954 по 2013 г.) временной ряд среднемесячного индекса КДЦ (рис. 1) [1].



**Рис. 1. Ход средней в слое от 19 до 31 км скорости  $\bar{u}$  зонального ветра на экваторе с 1954 по 2013 г.**

Период КДЦ изменяется от 26 до 30 месяцев, но в среднем он равен 28 месяцам, т.е. удвоенному периоду Чандлера [2, 9]. В спектре колебаний индекса КДЦ доминирует составляющая с периодом около 28 месяцев. Выделяется также составляющая с периодом около 24 месяцев, но ее пик более чем в 5 раз ниже пика 28-месячной составляющей. Сложение этих двух составляющих объясняет амплитудную модуляцию индекса КДЦ [2, 9].

## 2. Момент импульса зональных ветров атмосферы

Момент импульса, или угловой момент, зональных ветров является одним из важнейших интегралов движения атмосферы. Он определяется выражением [2, 9]:

$$h = \int_V uR \cos \varphi \rho \, dv, \quad (3)$$

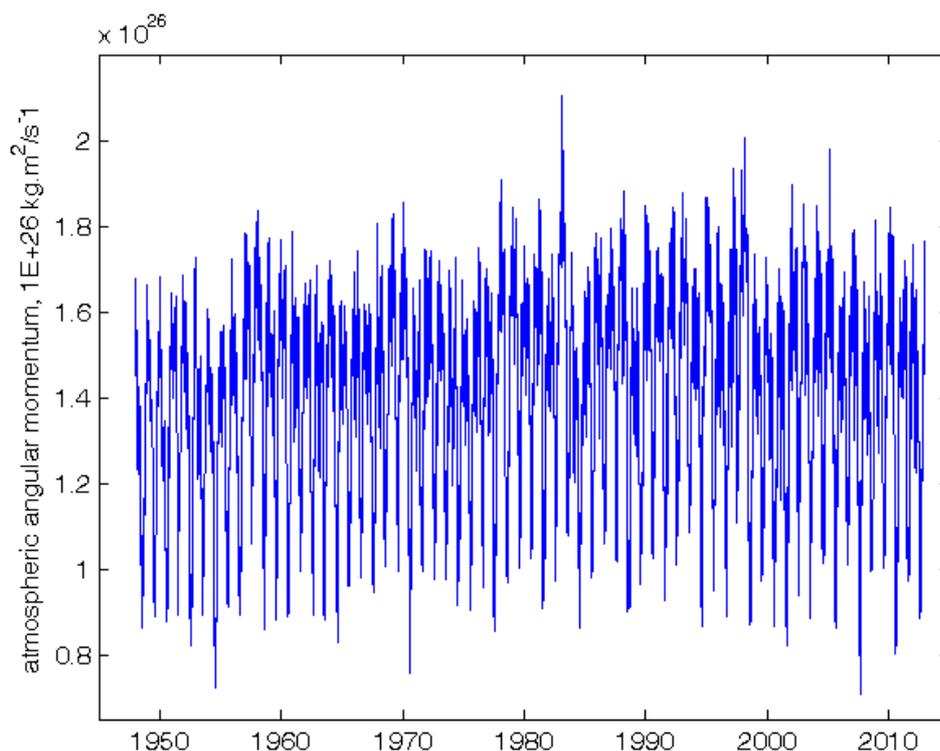
где  $u$  – скорость зонального ветра ( $u > 0$  для западного ветра);  $R$  – радиус Земли;  $\varphi$  – широта;  $\rho$  – плотность воздуха;  $V$  – объем, занятый атмосферой.

Величина  $h$  характеризует интенсивность зональной циркуляции атмосферы. Чем больше величина  $h$ , тем сильнее западные и слабее восточные ветры в атмосфере. Чем меньше момент импульса  $h$ , тем слабее западные и сильнее восточные ветры.

Изменения величины  $h$  во времени отражают те или иные процессы, протекающие в атмосфере, и содержат ценную информацию об этих процессах. Например, по сезонным колебаниям момента импульса  $h$  можно судить о том, как меняется во времени контраст температуры, интенсивность меридиональной циркуляции воздуха и связанные с ней потоки массы, влаги и загрязняющих веществ между Северным и Южным полушариями [2, 9]. Межгодовые колебания величины  $h$  отражают долгопериодные изменения общей циркуляции атмосферы. По 30–60-дневным колебаниям  $h$  можно контролировать сложные процессы в тропической атмосфере. Благодаря этому задача мониторинга момента импульса зональных ветров атмосферы  $h$  является интересной и важной.

За рубежом организованы вычисления величины  $h$  в оперативном режиме [8]. Такая работа ведется ежедневно на основе глобальных объективных анализов полей ветра и давления в Национальном метеорологическом центре (США), в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (Англия) и в Японском метеорологическом агентстве. В нашей стране подобные работы не ведутся. Поэтому мы заимствуем эти данные из Бюро атмосферного углового момента (США) (<ftp://ftp.aer.com>).

В настоящее время накоплены ряды компонент момента импульса атмосферы с 1948 по 2012 г. с шестичасовой, суточной, месячной и годовой дискретностью [1].



**Рис. 2. Изменения момента импульса зональных ветров атмосферы в 1948–2012 гг.**

### **3. Эль-Ниньо – Южное колебание**

Среди явлений планетарного масштаба, протекающих в системе Земля-атмосфера-океан, Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) в последние годы привлекает большой интерес. Под ним понимают межгодовые изменения полей приземного атмосферного давления, ветра и осадков, имеющих противоположные знаки аномалий в тропических зонах восточного и западного полушарий. Особенно отчетливо Южное колебание проявляется в обмене воздухом между Индийским и Тихим океанами. При росте атмосферного давления в центральной и восточной частях тропической зоны Тихого океана наблюдается падение давления в тропиках Индийского океана, а также в районах Австралии и Индонезии. Имеются своего рода два центра действия Южного колебания: с одной стороны – австралийско-индонезийский, с другой – южно-тихоокеанский. Оба эти центра действия противоположного знака расположены в тропиках Южного полушария. Наиболее четкая отрицательная корреляция значений давления ( $r \approx -0,8$ ) отмечается между районами Индонезии и Австралии с одной стороны, и островами Общества в центре Тихого океана – с другой. С Южным колебанием атмосферы неразрывно связаны явления Эль-Ниньо и Ла-

Нинья в Мировом океане [2, 9]. Поэтому в первом приближении их рассматривают как единое явление ЭНЮК.

Существует несколько индексов для мониторинга ЭНЮК [2, 9]. Обычно в них учитывается давление на уровне моря одной станции или комбинации нескольких станций, расположенных в западной и восточной частях Тихого океана. Одним из наиболее обоснованных является индекс, использующий значения атмосферного давления станций Таити и Дарвин, так как они расположены вблизи очагов наиболее высокой отрицательной корреляции давления. Дисперсии значений среднемесячного атмосферного давления на станциях Таити и Дарвин различны. Поэтому, чтобы представить южно-тихоокеанский и австралийско-индонезийский центры действия в равной мере, нужно использовать нормализованные аномалии давления на этих станциях. Можно предложить несколько вариантов вычислений индекса. Однако в целях унификации и возможности последующего сравнения было решено остановиться на методике, которая уже используется в Центре климатических анализов Мирового метеорологического центра США [4, 7]. Она сводится к следующему.

Берутся временные ряды средних месячных значений атмосферного давления на уровне моря станций Таити и Дарвин. По ним вычисляется временной ряд разностей нормализованных аномалий давления этих станций

$$\delta_{gm} = \left[ \frac{P_{gm} - \bar{P}_m}{\varepsilon} \right]_{Ta} - \left[ \frac{P_{gm} - \bar{P}_m}{\varepsilon} \right]_{Da}, \quad (4)$$

где  $P_{gm}$  – фактическое давление;  $\bar{P}_m$  – среднее многолетнее значение (норма);  $\varepsilon$  – стандартное отклонение, вычисленное по всем значениям аномалий давления за период 1951–1980 гг.;  $g$  и  $m$  – год и месяц.

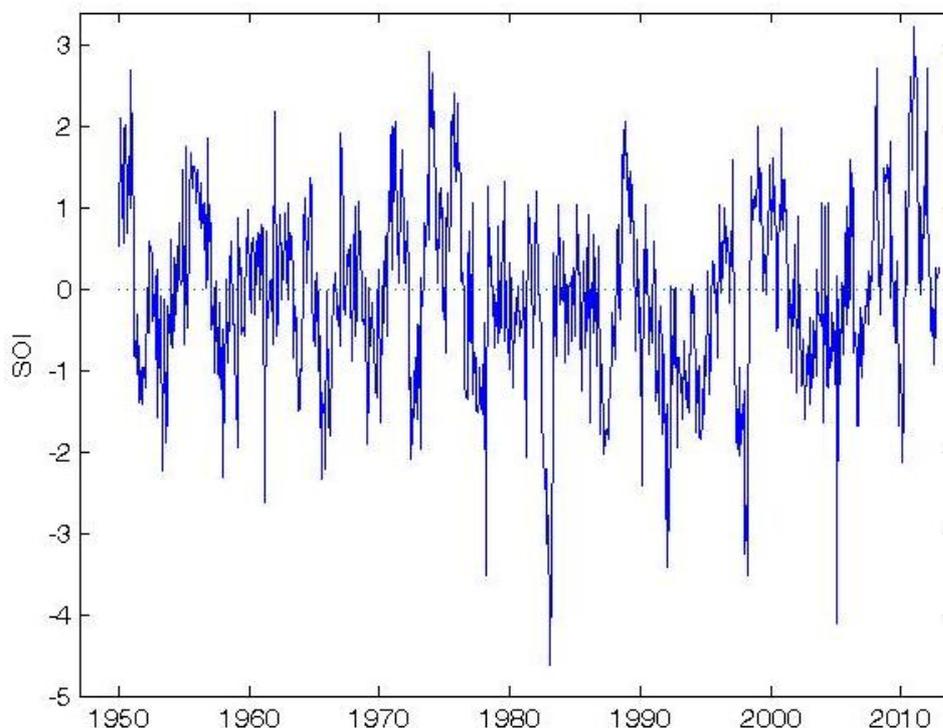
Нормы  $\bar{P}_m$  и стандартные отклонения  $\varepsilon$  вычисляются по средним месячным данным за период 1951–1980 гг. После этого вычисляются значения индекса Южного колебания  $SOI$ :

$$SOI = \frac{\delta_{gm}}{\sigma}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение всех разностей  $\delta_{gm}$  за период 1951–1980 гг.

Для оперативного мониторинга явления ЭНЮК индекс  $SOI$  вычисляется за каждый истекший месяц в первых числах текущего месяца. Значения среднемесячного атмосферного давления на уровне моря станций Таити и Дарвин считываются с сайтов <ftp://ftp.bom.gov.au/anon/home/ncc/www/sco/soi/darwinmslp.html> и <ftp://ftp.bom.gov.au/anon/home/ncc/www/sco/soi/tahitimslp.html>. Вычисленные величины

индекса *SOI* архивируются. Непрерывный и однородный ряд среднемесячных значений *SOI* с 1935 г. приведен в [2]. Средние месячные индексы *SOI* за 1950-2013 гг. приведены в [1, табл. 8] и на рис. 3.



**Рис. 3. Ход индекса Южного колебания *SOI* с 1950 по 2013 г.**

**По оси ординат отложены величины индекса *SOI*, выраженные в стандартных отклонениях от нормы.**

Наблюдения на станциях Таити и Дарвин велись и ранее. Однако долгое время эти данные были недоступны, так как находились в архивах различных учреждений. Кропотливые поиски, предпринятые разными учеными, позволили восстановить непрерывные ряды атмосферного давления по этим станциям с 1866 по 1934 г. [4, 7]. В итоге в настоящее время имеется непрерывный ряд среднемесячного индекса *SOI* с 1866 г. по настоящее время [2].

#### **4. Скорость вращения и движения полюсов Земли**

##### **4.1. Скорость суточного вращения Земли**

Неравномерность суточного вращения Земли обусловлена процессами, протекающими в атмосфере и гидросфере. Являясь отражением этих процессов, неравномерность вращения Земли содержит ценную информацию о них и позволяет решать ряд научных и практических задач гидрометеорологии [2, 9].

Скорость вращения Земли принято характеризовать безразмерной величиной:

$$v = \frac{(\omega - \Omega)}{\omega} = -\frac{(T - P)}{P}, \quad (6)$$

где  $T$  – длительность земных суток;  $P$  – длительность атомных суток, равная 86400 с СИ;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  и  $\Omega = \frac{2\pi}{P}$  – угловые скорости, соответствующие земным и атомным суткам.

По данным наблюдений за Луной, Солнцем и планетами, известны скорости вращения Земли с XVII столетия. Мы располагаем рядом среднегодовых уклонений длительности суток  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  с 1656 г. по настоящее время [2, 9]. Точность этого ряда в XVII и XVIII вв. очень низкая. Лишь с XIX столетия наблюдения имеют удовлетворительную точность.

В 1955 году стали вводиться атомные часы. Сравнение их показаний с ходом Всемирного времени позволяет вычислить значения  $(T-P)$  или  $v$  с гораздо большей точностью. Появилась возможность вычислять среднемесячные или даже среднепентадные значения  $v$ . Для вычисления текущих характеристик угловой скорости вращения Земли мы используем разности шкал Всемирного и Атомного времени и координаты полюса, которые публикует Международная служба вращения Земли (IERS) (<ftp://hpiers.obspm.fr>).

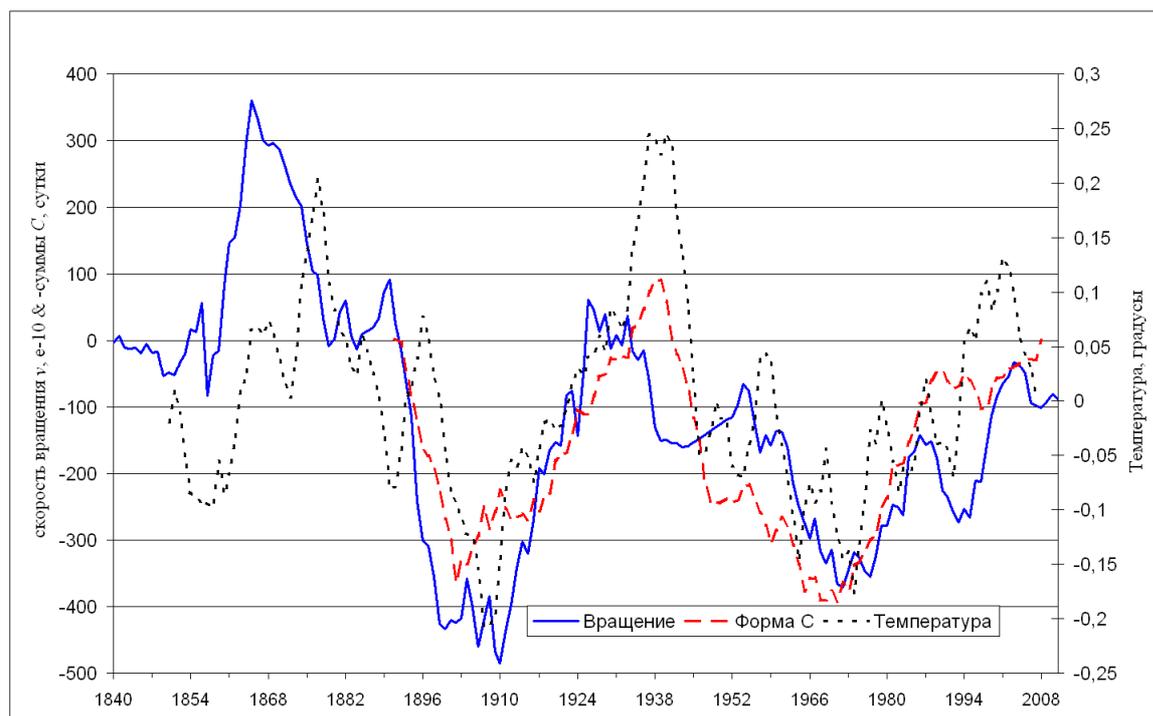
В настоящее время накоплены данные о скорости вращения Земли с годовой дискретностью с 1654 года, с месячной дискретностью – с 1955 года (рис. 4) и с суточной дискретностью – с 1962 года [1, 2, 9].

По декадным вариациям вращения Земли можно следить за изменениями глобальной и полушарной температуры воздуха, чередованием эпох атмосферной циркуляции, эволюцией ледниковых щитов и других климатических характеристик. Например, смена режима вращения Земли в 2004 году указывает на начало новой эпохи атмосферной циркуляции и на переход к тенденции понижения глобальной и полушарной температуры воздуха в ее квазисемидесятилетнем колебании.

В Гидрометцентре России разработана программа для расчета приливных колебаний скорости вращения Земли с суточной дискретностью для любого момента времени. По ней регулярно рассчитываются графики приливных колебаний угловой скорости на наступающий год (рис. 5) и размещаются на сайте <http://geoastro.ru>.

Приливные колебания скорости вращения Земли являются отличным индексом особенностей месячного обращения Земли вокруг барицентра системы Земля–Луна и изменений лунно-солнечных приливных сил во времени. С ними согласуются квазинедельные и полумесячные вариации атмосферных процессов и зависящие от них локальные аномалии температуры воздуха, давления, облачности, осадков. С приливными колебаниями скорости вращения Земли коррелируют опасные явления погоды,

геомагнитные вариации, геофизические процессы [2, 9]. Н.С. Шаповалова нашла связи техногенных катастроф, поведения людей, течения болезней и смертности с квазинедельными экстремумами приливных колебаний скорости вращения Земли. Установлено, что естественные синоптические периоды (ЕСП) в атмосфере синхронизованы с приливными колебаниями угловой скорости вращения Земли [2, 9]. Смена ЕСП происходит вблизи экстремумов приливных колебаний  $V$ . Это можно проследить по совпадению изменений метеорологических характеристик (температура, давление) в Москве и Владивостоке с минимумами или максимумами  $V$  на сайте <http://geoastro.ru>.



**Рис. 4.** Скорость вращения Земли  $v$  (сплошная), накопленные суммы аномалий формы циркуляции Г.Я. Вангенгейма  $S$  с обратным знаком (штриховая) и аномалии глобальной температуры воздуха по данным HadCRUT3 после исключения параболического тренда и скользящего пятилетнего сглаживания (точечная).

#### 4.2. Движение географических полюсов Земли

Изменяется не только угловая скорость вращения Земли, но и координаты географических полюсов. Траектория движения полюсов имеет вид спирали, которая периодически то закручивается, то раскручивается. Самое большое удаление мгновенного полюса от среднего положения (радиус траектории) не превышает 15 м. Закручивание и раскручивание траектории полюса объясняется тем, что полюс совершает два периодических движения: свободное с периодом Чандлера (около 14 мес.) и вынужденное с годовым периодом.

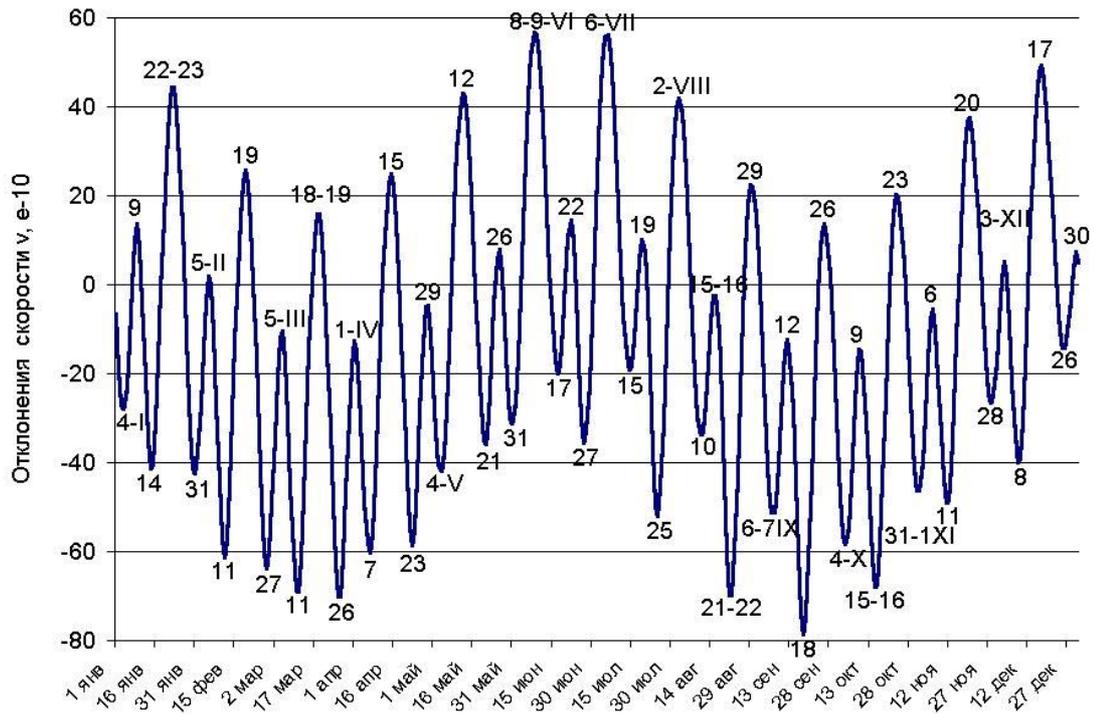


Рис. 5. Приливные колебания скорости вращения Земли  $v$  в 2013 г.

По оси ординат отложены относительные отклонения угловой скорости  $v$  в  $10^{-10}$ .

Цифрами отмечены даты наступления максимумов и минимумов  $v$ .

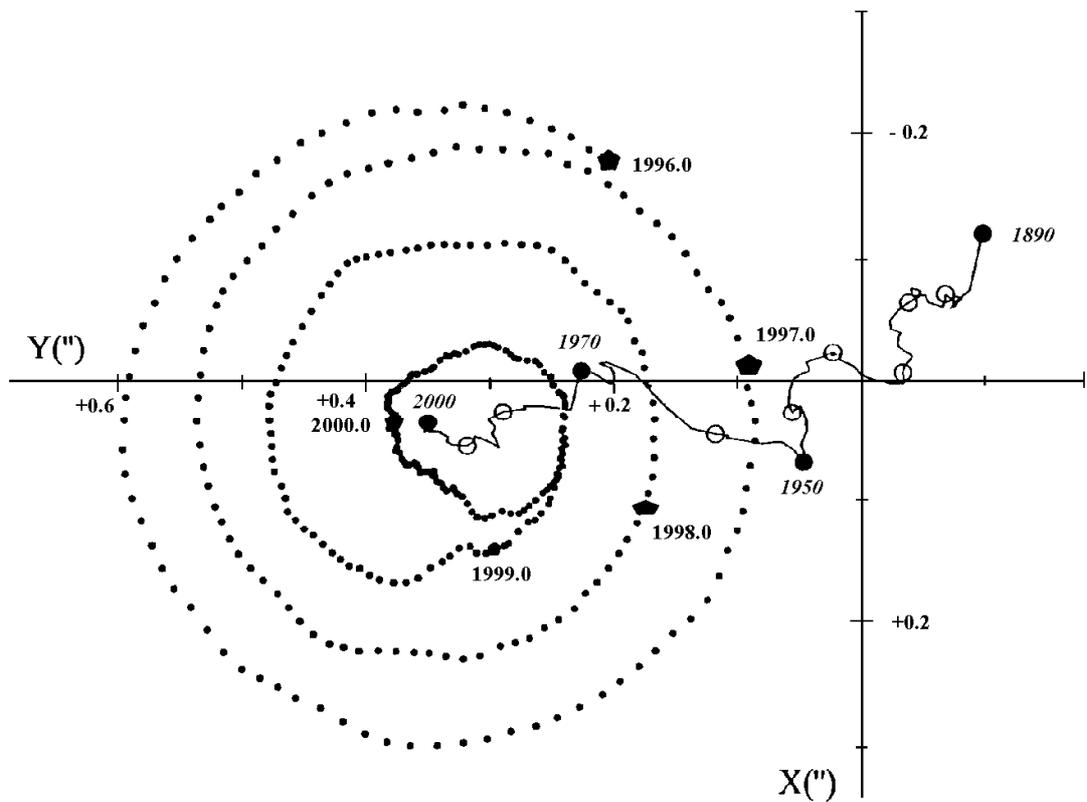


Рис. 6. Траектория движения Северного географического полюса Земли в 1996–2001 гг. по данным [5].

В настоящее время имеется ряд координат полюса с 1891 по 2013 г. с дискретностью 0,05 г. (<ftp://hpiers.obspm.fr>).

В аспекте межгодовых изменений интересной особенностью является сильное затухание движения полюса в 1925–1940 гг. и столь же сильные его "раскрутки" в 1905–1915 и 1950–1960 гг. Каждая из двух координат полюса испытывает шестилетние биения. Амплитуда чандлеровского движения полюса меняется с периодом около 50 лет. Параметры годового движения полюса меняются сравнительно мало.

Замечена связь между движением полюсов и шестилетними колебаниями угловой скорости  $v$ . Когда мгновенный полюс удаляется от своего среднего положения, значение  $v$  уменьшается (вращение Земли замедляется), и наоборот. Эти колебания скорости вращения Земли отражают шестилетние колебания момента импульса зональных ветров противоположного знака, которые в свою очередь вызываются событиями Эль-Ниньо.

Спектральный анализ радиуса траектории движения полюса  $R$  показал большой максимум на периоде 6,2 года. Это указывает на то, что в возбуждении движения полюса существенную роль играет прецессия оси лунной орбиты. Период ее 18,61 года кратен периоду  $R$  в отношении 3:1, т.е. между прецессией лунной орбиты и движением географического полюса существует нелинейный резонанс.

### **Рекомендация о внедрении**

ЦМКП Росгидромета на заседании 8 октября 2013 г. одобрила работу ФГБУ «Гидрометцентр России» по разработке методики подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата и рекомендовала использовать методику подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата в качестве основной в ФГБУ «Гидрометцентр России».

### **Список литературы**

1. *Неушкин А.И., Сидоренков Н.С., Бережная Т.В. и др.* Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие / под редакцией Р.М. Вильфанда и А.И. Неушкина. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 123 с.
2. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 366 с.
3. *Чучалов Б.С.* Оперативный контроль общей циркуляции атмосферы // Шестьдесят лет Центру гидрометеорологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.
4. *Allan R.J., Nicholls N., Jones P.D., Butterworth I.J.* A Further Extension of the Tahiti-Darwin SOI, Early ENSO and Darwin Pressure // *J. Climate*. – 1991. – Vol. 4. – P. 743–749.

5. IERS Annual Report. International Earth Rotation Service. Observatoire de Paris. – 2000. – 144 p.
6. *Reed R.V.* The present status of the 26-month oscillation // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 1965. – Vol. 46. – P. 374-387.
7. *Ropelewski C.F., Jones P.D.* An Extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index // *Mon. Wea. Rev.* –1987. – Vol. 115. – P. 2161–2165.
8. *Rosen R.D., Salstein D.A.* Variations in atmospheric angular momentum on global and regional scales and the length of day // *J. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. 88. – P. 5451–5470.
9. *Sidorenkov N.S.* The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. – 317 p.