

ГЛОБАЛЬНЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ: II. РЕЗУЛЬТАТЫ

С. Д. Петров, Н. С. Павловская

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

На основе результатов проекта атмосферного реанализа NCEP/NCAR получено разложение атмосферного давления на поверхности Земли в конечный ряд по сферическим функциям за период с 2000 по 2012 годы. Для всех коэффициентов разложения получены средние значения, а также амплитуды и фазы сезонных вариаций. По коэффициентам разложения давления вычислены коэффициенты Стокса атмосферной части геопотенциала. На основе атмосферных коэффициентов Стокса определен ряд атмосферных геодинимических параметров и их сезонных вариаций, таких как полная масса атмосферы, смещения координат геоцентра, коэффициент формы Земли, сжатие земного эллипсоида, направления осей инерции Земли, сжатие экваториального сечения земного эллипсоида и его ориентация, а также асимметрия распределения воздушных масс относительно экватора. Дана физическая интерпретация полученных величин, выполнено сравнение с результатами других авторов. Сделан вывод о том, что данные проекта атмосферного реанализа NCEP/NCAR позволяют оценивать атмосферные геодинимические параметры с точностью, адекватной современным астрометрическим и геодезическим измерениям. Библиогр. 4 назв. Ил. 4. Табл. 1.

Ключевые слова: гравитационный потенциал атмосферы, смещение геоцентра, коэффициент формы Земли, движение полюсов Земли.

Введение. Учет атмосферных эффектов в редукциях современных астрометрических и геодезических наблюдений требует привлечения более современных и детальных метеорологических данных и моделей. Атмосферные эффекты проявляются, с одной стороны, в связи с рефракцией электромагнитного излучения от естественных и искусственных небесных тел в атмосфере и, с другой стороны, в связи с деформациями твердой Земли и возмущениями ее вращательного движения. В данной работе исследуются деформации земной литосферы, вариации геопотенциала, а также вариации вращения Земли вследствие пространственных и временных изменений атмосферного давления.

Теоретические основы изложены в предыдущей статье [1], где рассмотрен гравитационный потенциал земной атмосферы, получена связь коэффициентов Стокса геопотенциала с коэффициентами разложения поверхностного давления по сферическим функциям, а также детально рассмотрены атмосферные коэффициенты Стокса степеней ноль, один, два и три и дана их физическая интерпретация. В частности, показано, что вариация атмосферного коэффициента Стокса нулевой степени дает изменение массы атмосферы главным образом вследствие сезонного водообмена атмосферы с гидросферой Земли. Изменения атмосферного коэффициента Стокса степени один вызывают вариации положения геоцентра в земной системе координат. Атмосферные коэффициенты Стокса второй степени в свою очередь приводят к изменениям экваториального сжатия Земли, наклонам земных осей инерции в земной системе координат, движениям полюсов, а также к изменению сжатия экваториального сечения геоида. Атмосферный коэффициент Стокса третьей степени первого порядка создает дополнительное нарушение симметрии геопотенциала относительно земного экватора.

Целью данной работы является количественная оценка перечисленных эффектов по метеорологическим данным. В качестве исходных данных использованы результаты проекта глобального реанализа атмосферных данных, предпринятого рядом американских метеорологических организаций. Из массива данных реанализа выбраны значения атмосферного давления на поверхности Земли, заданные на равномерной сетке по широте и долготе четыре раза в сутки на протяжении последних тринадцати лет.

Значения поверхностного атмосферного давления представляются в виде разложения в конечный ряд по сферическим функциям вплоть до степени три. Коэффициенты разложения определяются методом наименьших квадратов. Далее анализируются средние значения и временные изменения коэффициентов давления. Основные вариации коэффициентов ожидаемо сосредоточены на сезонных и суточных частотах. Посредством сглаживания выделены сезонные вариации, для которых методом наименьших квадратов определены амплитуды и фазы.

По формулам, полученным в первой части работы [1], вычисляются средние значения, а также амплитуды и фазы сезонных вариаций атмосферных коэффициентов Стокса геопотенциала степеней ноль, один, два и три. Анализируется их вклад в геопотенциал твердой Земли. Определяются средние значения, амплитуды и фазы сезонных вариаций массы атмосферы, положения геоцентра, сжатия земного эллипсоида, движения полюсов, сжатия экваториального сечения геоида, а также экваториальной асимметрии геоида. Приводится обсуждение и интерпретация результатов, а также сравнение с результатами других авторов.

Коэффициенты давления. Основная трудность в применении метеорологических данных к задачам геодинамики до недавнего времени состояла в их неоднородности как во времени, так и по поверхности Земли. Однако в конце 90-х годов прошлого века были предприняты проекты повторного анализа, или реанализа метеоданных. Реанализ заключается в систематической переработке всего массива накопленных метеоданных в рамках единой модели динамической циркуляции атмосферы. На выходе получается однородный, равномерный во времени и в пространстве массив информации о состоянии атмосферы.

Первым реализованным проектом реанализа является проект Национальных центров прогнозирования окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) и Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research, NCAR) [2]. Данные проекта реанализа NCEP/NCAR представляют собой непрерывно обновляемый массив информации, описывающей состояние земной атмосферы на основе обработки метеонаблюдений в рамках современной модели глобальной циркуляции, начиная с 1948 года.

В данной работе используются результаты реанализа NCEP/NCAR, размещенные на сервере Исследовательской лаборатории системы Земля Национальной океанографической и атмосферной администрации США (Earth System Research Laboratory of National Oceanic and Atmospheric Administration) [3].

Параметры состояния атмосферы задаются четыре раза в сутки на ноль, шесть, двенадцать и восемнадцать часов Всемирного времени на равномерной сетке по широте и долготе через каждые $2,5^\circ$ на поверхности Земли и на семнадцати изобарических уровнях по высоте. Из этого массива были выбраны значения атмосферного давления на поверхности Земли на период с 01.01.2000 по 31.12.2012 г. В качестве единиц измерения давления приняты миллибары (мб) или гектопаскали.

Коэффициенты давления

		m	0	1		2		3	
l		\bar{c}_{l0}	\bar{c}_{l1}	\bar{s}_{l1}	\bar{c}_{l2}	\bar{s}_{l2}	\bar{c}_{l3}	\bar{s}_{l3}	
3	с	18,77(19)	3,17(06)	6,05(5)	10,43(2)	5,66(1)	-0,40(1)	4,89(01)	
	а	1,19(26)	0,14(09)	0,78(7)	0,54(2)	0,08(2)	0,28(2)	0,03(02)	
	ф	165°(04)	97°(42)	173°(1)	180°(1)	19°(5)	13°(1)	99°(42)	
2	с	-16,26(17)	-0,04(04)	6,55(4)	6,51(2)	2,94(2)			
	а	0,69(24)	0,45(06)	1,00(6)	0,63(2)	0,32(3)			
	ф	294°(20)	331°(04)	193°(1)	178°(1)	196°(2)			
1	с	0,48(12)	-7,22(06)	8,69(6)					
	а	0,25(17)	0,23(09)	0,60(9)					
	ф	345°(27)	70°(21)	181°(1)					
0	с	984,92(01)							
	а	0,16(01)							
	ф	161°(01)							

Примечание: «с» — среднее значение и «а» — амплитуда сезонного колебания в миллибарах, «ф» — фаза сезонного колебания в градусах. В скобках указаны формальные ошибки в единицах последних знаков.

Атмосферное давление p на поверхности Земли в точке с геоцентрическими широтой ϕ и долготой λ представим в виде суммы по сферическим функциям:

$$p = \sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^l (\bar{c}_{sm} \cos m\lambda + \bar{s}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\sin \phi), \quad (1)$$

где \bar{c}_{lm} и \bar{s}_{lm} — 4π -нормированные коэффициенты давления, $\bar{P}_{lm}(\sin \phi) \cos m\lambda$ и $[4] \bar{P}_{lm}(\sin \phi) \sin m\lambda$ — 4π -нормированные сферические функции, $\bar{P}_{lm}(\sin \phi)$ — соответственно нормированные присоединенные полиномы Лежандра. Здесь 4π -нормировка означает, что

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \left[\bar{P}_{lm}(\sin \phi) \begin{Bmatrix} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{Bmatrix} \right]^2 \cos \phi \, d\lambda \, d\phi = 4\pi$$

для любых l от нуля до n и m от нуля до l . Такая нормировка, с одной стороны, является стандартной в физической геодезии, а также позволяет оценивать коэффициенты сферических функций по метеоданным с равными весами.

Поскольку целью работы являются глобальные эффекты атмосферной циркуляции, разложение (1) выполнялось вплоть до степени $l = 3$. Коэффициенты \bar{c}_{lm} и \bar{s}_{lm} оценивались методом наименьших квадратов. В результате были получены временные ряды коэффициентов давления через каждые шесть часов с 01.01.2000 по 31.12.2012.

Затем для каждого коэффициента методом наименьших квадратов оценивались среднее значение, линейный тренд, а также амплитуда и фаза сезонной (годовой) синусоиды с периодом, равным тропическому году. Линейный тренд оказался незначимым для всех шестнадцати коэффициентов. Результаты оценивания средних значений, а также амплитуд и фаз сезонной синусоиды для коэффициентов давления приведены в таблице. Изменения коэффициентов давления во времени вместе с их моделями показаны на рис. 1–4. При этом для наглядности ряды коэффициентов, изображенные на рисунках, были сглажены фильтром с гауссовой весовой функцией шириной полумаксимум, равной 70 суткам. Графики всех коэффициентов кроме

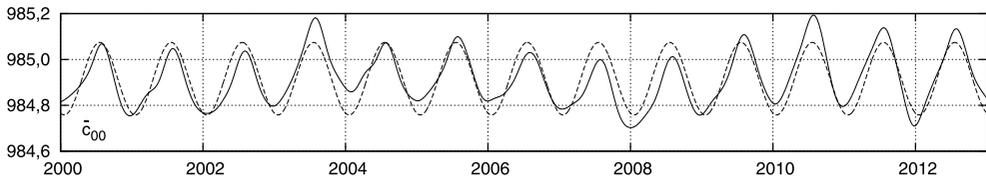


Рис. 1. Коэффициент давления степени 0 в миллибарах (сплошная линия) и его модель (прерывистая линия).

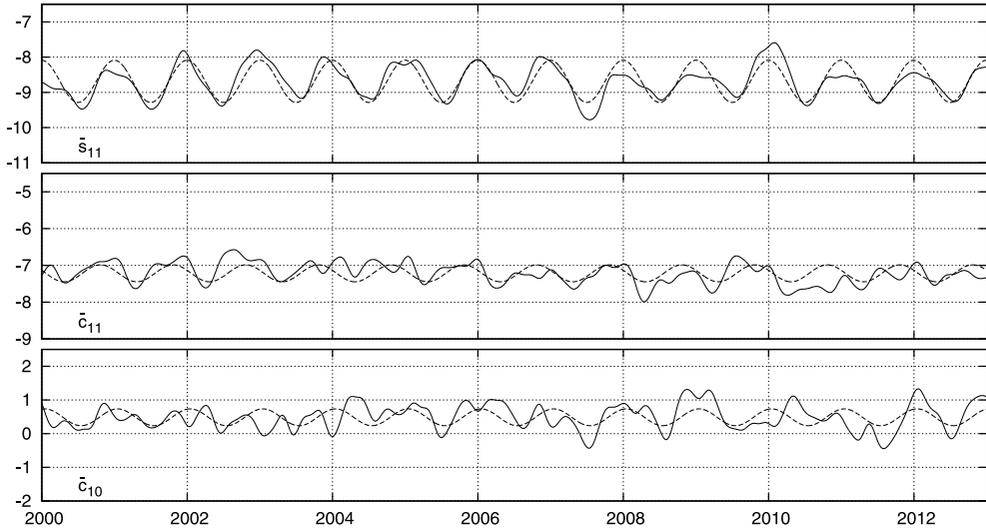


Рис. 2. Коэффициенты давления степени 1 в миллибарах (сплошная линия) и их модели (прерывистая линия).

\bar{c}_{00} построены в одинаковом масштабе. Из приведенных графиков видно, что вариации коэффициента степени ноль значительно, на порядок, меньше вариаций всех остальных коэффициентов. Они не превышают 0,2 мб, тогда как значения остальных изменяются в пределах нескольких миллибар.

Зональный коэффициент степени ноль, очевидно, представляет собой среднее атмосферное давление на поверхности Земли, которое, в свою очередь, пропорционально массе всей атмосферы.

При подстановке в формулу приведенных численных данных, а также зонального коэффициента из таблицы средняя масса атмосферы равна $5,123 \times 10^{18}$ кг, или 5,123 петатонн. Из амплитуды сезонного колебания \bar{c}_{00} следует, что летом атмосфера северного полушария впитывает с поверхности твердой Земли и океанов $8,322 \times 10^{14}$ кг, или 832 гигатонны воды, которую возвращает обратно зимой. На рис. 1 хорошо видны два скачка массы атмосферы летом 2003 и 2010 годов, что объясняет аномально жаркую погоду в эти периоды.

Коэффициенты давления степеней с первой по третью при относительно небольших средних значениях испытывают большие, до нескольких миллибар, колебания. Причем для большинства коэффициентов эти колебания носят ярко выраженный сезонный характер. Оказывается, что все они оказывают значимое влияние на движения и деформации твердой Земли, а также на геопотенциал.

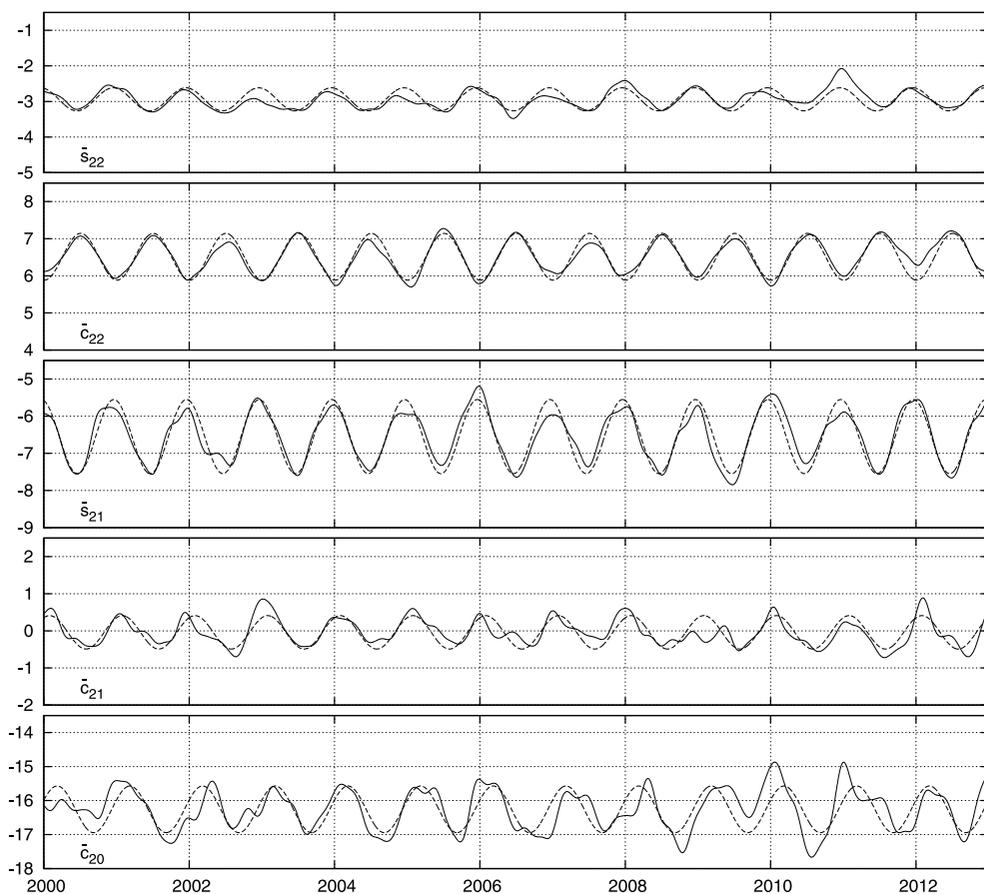


Рис. 3. Коэффициенты давления степени 2 в миллибарах (сплошная линия) и их модели (прерывистая линия).

Геодинамические эффекты атмосферы. Динамическое воздействие атмосферы на твердую Землю можно разделить на гравитационное и нагрузочное. Гравитационное воздействие — это ньютоново притяжение между массами атмосферного воздуха и твердой Землей. Нагрузочное воздействие же проявляется в давлении масс воздуха на литосферу, которое вызывает как деформации твердой Земли, так и смещение ее центра масс и осей инерции. К сожалению, гравитационное и нагрузочные воздействия часто бывает трудно разделить на практике. Авторы работы [4] предложили перейти от рассмотрения динамического взаимодействия атмосферы с твердой Землей к кинематическому его описанию. Предложенный подход оказался результативным и с тех пор повсеместно используется при решении геодинамических задач.

Как показано в [1], атмосферные коэффициенты Стокса первой степени определяют смещение геоцентра за счет распределения воздуха по земной поверхности. Подстановкой данных из таблицы в формулы для координат геоцентра получаем следующие величины. Геоцентр смещается по оси x в направлении Гринвича на 0,89 см с амплитудой сезонной вариации 0,46 см. По оси y смещение составляет $-13,36$ см с амплитудой 0,43 см. Столь большое смещение в сторону американского континента

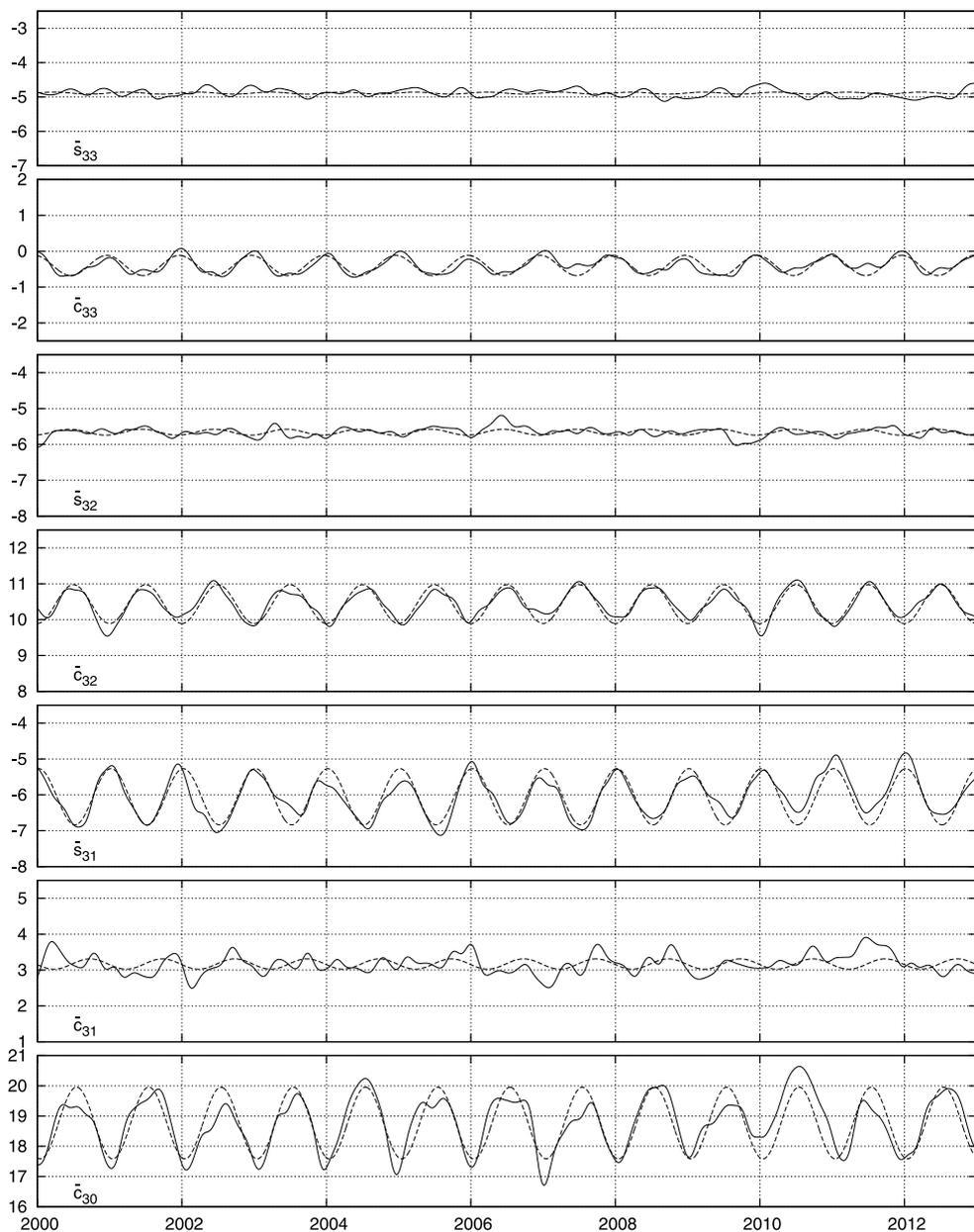


Рис. 4. Коэффициенты давления степени 3 в миллибарах (сплошная линия) и их модели (прерывистая линия).

вызвано вытеснением воздуха огромным Тибетским плато. По оси z геоцентр смещается к югу на $-16,08$ см с амплитудой сезонного колебания $1,11$ см. Большая величина постоянного смещения объясняется обширной зоной повышенного давления над Антарктидой, а относительно большая сезонная амплитуда вызвана тем, что зимой большие массы воздуха накапливаются в зоне Сибирского антициклона.

Атмосферный коэффициент Стокса второй степени нулевого порядка дает вклад в коэффициент формы Земли $J_{2\oplus}$. Согласно таблице дополнительное динамическое сжатие Земли за счет атмосферы $J_2 = 2,83 \times 10^{-9}$. Такой эффект, очевидно, вызван концентрацией атмосферного воздуха к экватору. Как известно, высота тропосферы возрастает от полюсов к экватору. По формуле (10) из работы [1] получаем вклад атмосферы в сжатие земного эллипсоида $f = 4,25 \times 10^{-9}$, что соответствует увеличению за счет атмосферы экваториального радиуса Земли на 2,70 см.

Коэффициенты C_{21} и S_{21} определяют смещение полюса инерции относительно твердой Земли. Согласно расчетам за счет атмосферы ось инерции Земли смещается практически вдоль оси y в направлении американского континента на угол 0,2 угловых секунды, что соответствует шести метрам на поверхности Земли. Кроме того, ось инерции испытывает сезонные колебания амплитудой 0,03 угловых секунды или один метр. Это колебание, как хорошо известно, в свою очередь вызывает сезонное движение полюса мира.

По формулам (12) работы [1] вычислим сжатие экваториального сечения земного эллипсоида за счет атмосферы, получим $f_e = 1,2 \times 10^{-12}$. Большая полуось экваториального эллипса ориентирована в направлении 5,7 градусов западной долготы.

Заключение. В работе на основе данных атмосферного реанализа получено разложение поля давления на поверхности Земли в конечный ряд по сферическим функциям. По коэффициентам разложения вычислены атмосферные коэффициенты Стокса геопотенциала, их средние значения и сезонные вариации. Дана геофизическая интерпретация результатов. Вычислены средние значения и сезонные изменения следующих величин: массы атмосферы, атмосферных смещений геоцентра, коэффициента формы и сжатия Земли, смещения полюса инерции Земли, сжатия экваториального ее сечения и ориентации экваториального эллипса, а также асимметрии массы относительно экватора. Полученные величины сопоставлены с результатами других авторов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Исследовательской лаборатории системы Земля Национальной океанографической и атмосферной администрации США за предоставление доступа к данным проекта атмосферного реанализа, а также рецензенту В. В. Витязеву, чьи замечания помогли значительно улучшить текст статьи.

Литература

1. Петров С. Д., Павловская Н. С. Глобальные геодинамические эффекты вариаций атмосферного давления: I. Теория // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 1. 2013. Вып. 3. С. 152–159.
2. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Т. 77. С. 437–471.
3. NCEP/NCAR Reanalysis data products. NOAA/ESRL PSD. Boulder, Colorado, USA. 2013. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: [4] 01.02.2013).
4. Barnes R. T. H., Hide R., White A. A. et al. Atmospheric angular momentum fluctuations, length-of-day changes and polar motion // Proc. R. Soc. London. Ser. A. 1983. Т. 387. С. 31–73.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2014 г.

Сведения об авторах

Петров Сергей Дмитриевич — кандидат физико-математических наук, доцент; serge.petrov@gmail.com

Петровская Наталья Сергеевна — аспирант; ne_bo@list.ru

GLOBAL GEODYNAMIC EFFECTS OF THE ATMOSPHERIC PRESSURE VARIATIONS: II. RESULTS

Sergey D. Petrov, Natalia S. Petrovskaya

St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7-9, St.Petersburg, 199034, Russian Federation;
serge.petrov@gmail.com, ne_boo@list.ru

On the basis of the NCEP/NCAR atmospheric reanalysis project results, expansion of the Earth surface atmospheric pressure into a final series of spherical harmonics is computed for the period from 2000 to 2012. Mean values as well as seasonal amplitudes and phases are estimated for all the expansion coefficients. On the basis of the atmospheric pressure expansion coefficients a number of atmospheric geodynamical parameters and their seasonal variations are obtained including: the full atmospheric mass, geocenter displacements, the Earth form factor, flattening of the Earth ellipsoid, directions of the Earth inertia axes, flattening of the equatorial section of the Earth ellipsoid and its orientation, as well as the asymmetric atmospheric mass distribution with respect to the equator. A physical interpretation of the estimated values is provided. A comparison with results of other authors is done. It is concluded that the NCEP/NCAR atmospheric reanalysis data are reliable enough for estimation of atmospheric geodynamical parameters with an accuracy adequate to modern astrometric and geodetic measurements. Refs 4. Figs 4. Tables 1.

Keywords: atmospheric gravitational potential, geocenter displacements, Earth form factor, polar motion.