УДК 550.2

СЕЗОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ И ИНСОЛЯЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

© 2020 г. А. Е. Вольвач^{1, 2, *}, Г. С. Курбасова¹

¹Отдел радиоастрономии и геодинамики, Крымская астрофизическая обсерватория, п. Кацивели, Крым, Россия ²Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

> *volvach@bk.ru Поступила в редакцию 17.12.2018 г. После доработки 04.02.2019 г. Принята к публикации 25.04.2019 г.

В работе исследуется спектральная структура и тенденции в изменении локальных не смоделированных деформаций земли в пункте "Симеиз". В радиоинтерферометрических временных рядах наблюдений дополнений к деформациям поверхности земли, проводимых в рамках Международных проектов, в пункте "Симеиз" обнаружены и смоделированы периодические составляющие. Амплитуда наиболее значимой сезонной составляющей равна 3.34 мм. С помощью частотно-временного вейвлет-преобразования получена информация о временной локализации и изменениях мощности и частоты колебаний за период с 1980 по 2014 гг.

Обнаружены эффекты регулярных солнечных и геодинамических колебаний в спутниковых данных об инсоляции падающей на поверхность земли в пункте Кара-Даг за период с 1983.5 по 2005.5 гг. Определены параметры сезонной составляющей. Обсуждаются возможные причины роста амплитуды сезонной составляющей.

DOI: 10.31857/S0023420620020107

введение

Многофакторность причин геологических процессов, возникающих в результате эволюции Земли как планеты и определяющих движение масс вещества и энергии внутри Земли и в ее внешних твердых оболочках, создает условия, при которых объекты исследования геодинамики недоступны непосредственному изучению и о них удается судить по косвенным признакам, теоретическим построениям и результатам их проявления на поверхности Земли. К таким косвенным признакам относятся аномальные изменения локальных геофизических и климатических характеристик таких как деформации и инсоляция поверхности земли и др. [1].

Достаточно давно было обращено внимание на совпадение длительности крупномасштабных тектонических циклов, установленных еще в самом конце XIX в. французским геологом М. Бертраном, со временем обращения Земли и всей Солнечной системы по галактической орбите. На этом пути Земля пересекает струйные потоки газопылевого галактического вещества, которое может оказывать определенное воздействие на происходящие в ее недрах процессы. Иными словами, речь идет об определенном резонансе между космическими и глубинными геодинамическими процессами.

Одной из главных задач проводимых гелио геодинамических исследований на базе геодезических и космических измерений является создание и ведение каталогов и карт скоростей изменения деформации земной поверхности.

Крымский полуостров расположен вблизи границы Евразийской литосферной плиты. Деформации и движения этой плиты на длительном интервале времени оказывали и оказывают в настоящее время влияние на активизацию внутри земных процессов (землетрясения, вулканы, сели). Об активизации внутри земных процессов свидетельствуют аномалии в смещении поверхности пунктов наблюдений.

Координаты пунктов наблюдений (наземные системы отсчета) содержат информацию о его положении и линейных скоростях. Они изменяются под влиянием постоянно действующих и периодических процессов, связанных с движением Земли вокруг оси и по орбите в Солнечной системе. Тем не менее, на границах между литосферными плитами наблюдаются значительные аномалии линейных скоростей. Кроме того, аномалии в смещении пунктов наблюдений и деформации поверхности земли на границах литосферных плит являются основным источником землетрясений.

Комплексное изучение планетарных, региональных и местных геодинамических процессов является необходимым условием прогноза любых катастрофических природных явлений [2].

Влияние внешних и внутри земных процессов на климат и экологию Крыма по-разному проявляется на различных масштабах времени. Поэтому описание долголетних изменений и прогноз геофизических и климатических характеристик полуострова возможен по непрерывным наземным наблюдениям в течение многих лет.

НАБЛЮДЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Для изучения возникающих и развивающихся деформационных процессов, движений литосферных плит создаются геодинамические полигоны, оснащенные высокоточным экспериментальным оборудованием, на котором реализуется проведение комплексных наблюдений методами радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), лазерной локации искусственных спутников (ЛЛС), спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС.

Долговременные наблюдательные программы, в которых участвуют десятки стран и многие международные и национальные организации, основаны на достижениях Глобальной навигационной спутниковой системы ГНСС: GPS (США) и ГЛОНАСС (РФ).

На геодинамическом полигоне "Симеиз-Кацивели" наблюдения проводятся несколькими методами (РСДБ, ЛЛС, GPS и ГЛОНАСС), поэтому параметры сезонных колебаний сопоставимы, так как в пределах места совместного размещения, инструменты должны измерять одно и то же физическое движение Земли. Любое несоответствие между определяемыми параметрами сезонных колебаний в этом случае может интерпретироваться как технико-специфические ошибки на одном и том же интервале времени. Кроме того, в сети станций наблюдений, в результате глобальной обработки, уравнивается и стабилизируется точность наблюлений. Учитывая сопоставимость сезонных колебаний в данных полученных разными методами, нами использовались для анализа РСДБ-наблюдения на телескопе PT-22.

РСДБ – это метод, созданный для наблюдений в астрофизике и астрометрии. Позже данный метод реализовался в геодезии в зависимости от наземных и небесных целевых наблюдательных сеансов с точки зрения количества наблюдаемых радиоисточников, а также количества и последовательности наблюдений для радиоисточников. Радиотелескопы, образующие исходные линии в сети станций, довольно устойчиво прикреплены к подстилающей горной породе через их фундаменты. Поверхность Земли, однако, нестабильна. Кроме того, литосфера подвержена различным деформациям. Некоторые из деформаций довольно постоянные или периодические. Другие индивидуальны, эпизодические и прерывистые, например, во время и после сейсмического события.

Вместе с геодинамикой, океанографией, гляциологией, метеорологией и климатологией, геодезия обеспечивает метрическую основу для междисциплинарных исследований в рамках науки о Земле.

Транспортировка масс в глобальных геофизических жидких и газообразных оболочках Земли (атмосфера, океаны, гидрология, приливы, мантия, ядро) влияет на изменения параметров вращения Земли, вызывает изменения гравитационного поля и смещение геоцентра. Кроме того, под влиянием лунно-солнечных приливов необратимо деформируется поверхность Земли. Помимо предсказуемых деформаций, наблюдаются изменения не объяснимые в теории приливов, так называемые не смоделированные добавки к деформациям поверхности твердой земли. В настоящее время проблема достижения миллиметровой точности в определении положений и скоростей смешений наблюдательных инструментов требует учета этих добавок, что стало возможным благодаря скоординированной работе в сети станций наблюдений.

Приведем некоторые результаты выполненного нами анализа данных о дополнениях к деформациям Земли: вертикальных – dUp, северных – dN, восточных – dE в пункте Кацивели, вычисленных по модели "Атмосфера" в отделе исследований в DFG (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) на основе наблюдений в сети РСДБ с участием радиотелескопа РТ-22 станции "Симеиз".

Исходные данные представлены Службой IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) (https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/GeophysicalFluidsData/geoFluids.html) в виде трех временных рядов дополнений к деформациям поверхности Земли: dUp (вертикальные), dN (северные), dE (восточные) с интервалами между отсчетами суток.

Подготовка данных к анализу включала: определение и исключение ненормированного "белого" шума; вычисление дискретных статистик не "белого" шума (среднее равно 0, стандартное отклонение равно 1.10).

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ

Общие положения о непрерывном вейвлетпреобразовании содержатся в обширной литературе [3, 4, 9]. Не существует прямого соответствия между длиной волны Фурье и масштабом вейвлет преобразования *a*. Тем не менее, можно найти коэффициенты преобразования для отдельных вейвлетов, которые дают приблизительное соответствие по частоте шкалы.

Уравнение непрерывного преобразования вейвлета с помощью обратного дискретного преобразования Фурье имеет вид [12]:

$$C(a,b;f(t),\psi(t)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) \sqrt{a} \hat{\psi}^*(a\omega) e^{j\omega b} d\omega, \quad (1)$$

где a — параметр масштаба; b — временная переменная в обратном преобразовании Фурье; $\psi(t)$ — вейвлет ; ω — частота.

Последовательность анализируемых данных об инсоляции представляет собой вектор длины N, x(n). Дискретная версия свертки в этом случае представляется в виде:

$$W_a[b] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \hat{\psi}_a[b-n] .$$
 (2)

Основной целью проведения частотно-временного анализа, в нашем случае, является обнаружение периодических составляющих и получение частотно- временных характеристик. Соответствие между длиной волны Фурье и масштабом достигается правильным выбором типа вейвлета. Для случая оценки частот (периодов) гладких функций разработаны и предлагаются пользователям алгоритмы частотно-временного анализа данных с применением вейвлетов 'morle' и 'paul' [13, 14].

Проведенный частотно-временной непрерывный вейвлет-анализ данных о дополнениях к деформациям поверхности Земли в пункте Кацивели (станция РСДБ "Симеиз") демонстрируется на рис. 1. Предварительно нами было установлено соответствие между периодами (частотами) в сутках и параметром масштаба *a*, между параметром смещения по оси времени *b* и эпохой наблюдений. Анализ графиков на рис. 1 не вызывает сомнений в существовании регулярных периодических вариаций в данных о вертикальной и восточной составляющих (см. рис. 1а, 1в) в диапазоне периодов ~(250–500) сут. На этом рисунке интенсивность колебаний отмечена цветовой гаммой и индикатором степени интенсивности справа.

Северная составляющая (рис. 1б) на временном интервале анализа не имеет регулярных колебаний либо амплитуды их не превышают погрешностей анализируемых данных. Наиболее мощное сезонное колебание, амплитуда которого выше 3 стандартных отклонений в очищенных от "белого" шума данных, выделяется в данных о дополнениях к вертикальным деформациям.

В последующем анализе нас будет интересовать приближение гладкой функцией наиболее мощного (сезонного) колебания. В результате проведенного анализа приближения периодических колебаний в анализируемых данных с помощью различных моделей (полиномиальная, сумма функций Фурье, сплайн — функции) наиболее подходящей по точности приближения и физической интерпретации оказалась синусоидальная модель (сумма синусоидальных колебаний). Периодические процессы в данных обычно описывают синусоидальными моделями. При этом глобальная модель периодических колебаний в анализируемых данных имеет вид

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i \sin(b_i x + c_i), \qquad (3)$$

где n – количество синусоид суммируемых в модели; $a_i, b_i, c_i, (i = 1, ..., n)$ – коэффициенты.

Для анализа нами выбрана модель 3 порядка. так как увеличение количества синусоидальных компонент уменьшает среднеквадратическую погрешность приближения (Root Mean Square Error, RMSE) равную для модели 3 порядка 2.335 во втором знаке после запятой вплоть до модели 8 порядка. При этом коэффициент детерминации R^2 (сравнивает дисперсию предсказываемой величины с дисперсией ошибок) равен 0.510. Оценки точности приближения показывают, что используемая нами модель позволяет приблизить данные только на ~50%. Так как увеличение количества синусоид в структуре модели не приводит к существенному изменению погрешности приближения, можно полагать присутствие в данных не периодических, возможно различных по природе, дополнений.

На рис. 2 приведены графики данных dUp очищенные от "белого" шума и их приближение синусоидальной моделью.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ В ИНСОЛЯЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ПУНКТЕ КАРА-ДАГ

Климатическая система Земли формируется при активном участии всех геосфер планеты: атмосферы, океаносферы, криосферы, поверхности континентов, литосферы, антропосферы [2]. На формирование климатической системы влияют внешние силы: радиационные, приливные, гравитационные, электромагнитные.

В последнее время резко возросла актуальность изучения гелио- геодинамических процессов, происходящих в приповерхностных геологических структурах на локальных территориях, которые характерны для городов и зон расположения крупных инженерных сооружений. При этом особое внимание в составлении долговременных локальных прогнозов уделяется использованию спутниковых климатических параметров подверженных гелио — геодинамическим воздействиям [10, 11]. Анализ изменений в структуре долговременных



Рис. 1. Непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ (вейвлеты 'morl') временных рядов дополнений к деформациям поверхности земли РСДБ-станции "Симеиз" (модель "Атмосфера").

непрерывных рядов наблюдений устанавливает присутствие аномалий.

Любые энергетические изменения в глобальных гелио-геодинамических циклах сказываются на атмосферных процессах и влияют на климатические параметры [5]. Причем, локальные эффекты этого влияния зависят от локальных геологогеофизических характеристик и местоположения пункта на Земном шаре.

Наблюдения и анализ изменений локальной инсоляции поверхности земли со строгим учетом астрономических факторов, связанных с враще-

нием Земли вокруг оси и ее движением по орбите, позволяет обнаруживать аномалии, связанные с непрогнозируемыми внешними и внутри земными факторами.

Аномальное усиление солнечной инсоляции поверхности земли может вызвать в локальных пунктах ответную реакцию при наличии в ее недрах очагов возбуждения. К таким очагам относятся, прежде всего, недавние и прошлые (ретро) вулканы.

На полуострове Крым есть несколько ретро вулканов. Один из них, особо опасный по эколо-



Рис. 2. Данные о вертикальных дополнениях к деформациям поверхности земли РСДБ-станции "Симеиз" (модель "Атмосфера") после удаления ненормированного "белого шума" (отмечены звездочками *); кривая приближения сезонной составляющей с периодом 365.3 сут (красная, сплошная линия), вычисленная с помощью синусоидальной модели 3 порядка.

гическим последствиям, действовал в пункте Kapa-Даг.

В настоящее время не существует методов предсказания их "пробуждения". Существует ряд косвенных признаков возможной активизации землетрясений и вулканов. К ним относятся такие как экстремальные события на Солнце, динамика вращения Земли, активизация течения жидких масс внутри Земли, события в атмосфере и магнитосфере. Нарушения теплового баланса, необъяснимый периодически протекающими процессами приток энергии в локальном месте поверхности земли, служат сигналом нестабильности экологической обстановки.

На протяжении нескольких последних лет авторами настоящей работы изучались изменения локальных геофизических и климатических характеристик Крыма под влиянием глобальных и региональных геодинамических процессов [6–8]. При этом особый интерес представляет обнаруженный авторами повышенный рост инсоляции на поверхность земли в пункте Кара-Даг.

Для анализа использовались данные о параметрах наземной метеорологии и солнечной энергии (NASA, SSE – Surface meteorology and Solar Energy). Имеющийся в базе данных 22-летний ряд климатологии (июль 1983–июнь 2005) обеспечивает глобальный охват по поверхности Земли (на сетке 0.5° широты на 0.5° долготы) множества данных SSE (Surface meteorology and Solar Energy).

Предварительно из данных был удален ненормированный "белый" шум с помощью метода вейвлет-преобразования (вейвлеты "haar"), который позволяет учитывать изменения статистических параметров шума по оси времени. Очищенные от "белого" шума данные содержат не "белый" шум, уровень которого оценивается стандартным отклонением 0.151 (std = 0.151).

Изучение периодических процессов в данных об инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг нами проведено с помощью частотно-временного непрерывного вейвлет-анализа, результаты которого приведены на рис. 3.

Анализ графика на рис. 3 показывает: наиболее мощные гармонические колебания выделяются в интервале периодов ~(231–452) сут; на временном интервале ~(1995–2005) лет наблюдается нарастающий локальный рост энергии колебаний.

Частотно-временной вейвлет-анализ обнаруживает регулярные периодические колебания в данных, которые могут быть описаны гладкими периодическими функциями.

Приближение процесса периодических изменений инсоляции со временем выполнено нами в виде суммы 6 синусоид с периодами: 365.3, 182.2, 344.7, 365.7, 87.2, 402.2 сут. При выборе модели возможных периодических колебаний в данных учитывались погрешность приближения синусоидальной моделью различного порядка и условие наименьшего количества коэффициентов в соответствии с требованиями статистики, чтобы избежать переопределения. Погрешность приближения синусоидальной моделью данных об инсоляции оценивается параметрами: $R^2 = 0.8947 - сравнивает$ дисперсию предсказываемой величины с дисперсией ошибок; скорректированный $R^2 = 0.8946$, в котором используются несмещенные оценки дисперсий, позволяет сравнивать модели с разным числом факторов; среднеквадратичная ошибка (Root



Рис. 3. Непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ (вейвлеты 'morl') данных о среднесуточной инсоляции, падающей на горизонтальную поверхность земли в пункте Кара-Даг (данные SSE).



Рис. 4. Данные об инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг за период 1983–2005 гг. после удаления ненормированного "белого шума" (отмечены звездочками *); кривая приближения периодической составляющей в данных (сплошная линия), вычисленная с помощью синусоидальной модели 6 порядка. После 2005.4 – прогноз.

Mean Square Error, RMSE) = 0.7419, показывает, насколько точно используемая модель позволяет приблизить последовательность данных.

Амплитуды наиболее значимых колебаний с периодами 365.3, 365.7 сут соответственно равны 6.34 и 4.8 кВ · ч/сутки. Величины амплитуд остальных периодических колебаний в модели 6 порядка находятся в пределах погрешности приближаемых данных. Например, амплитуда полугодового колебания с периодом 182.2 сут равна 0.2 кВ · ч/сут. Отсюда следует, что основной периодический процесс (сезонная составляющая) обусловлен суммой двух сдвинутых по фазе волн с периодами ~365 сут.

Исключим регулярные колебания, вычисленные с помощью синусоидальной модели 6 порядка и выполним частотно-временной вейвлет — анализ.

Частотно-временная характеристика данных на рис. 5 исключает возможность существования не учтенных синусоидальной моделью стационарных, периодических на рассматриваемом интервале, колебаний. В то же время, после 1995 г. появляется кратковременное мощное колебание, локализующееся в области высоких частот. Аналогичное явление наблюдается в области низких частот после 1986 г.

выводы

1. Изучение местных регулярных и нерегулярных изменений земной поверхности Крыма, а также сопровождающих эти деформации разрушения различных объектов жизнеобеспечения людей и ухудшение экологической обстановки, является необходимым в связи с прогрессирующим нарастанием различного рода критических деформаций земной поверхности Крыма. Проводимые много лет на полигоне "Симеиз-Кацивели" наблюдения по согласованным международным программам в настоящее время служат основой для проведения как научных, так и прикладных исследований. В то же время положение Крыма вблизи разлома Евразийской плиты и усиленное



Рис. 5. Частотно-временная характеристика данных об инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг после удаления вычисленных с помощью синусоидальной модели 6 порядка. Вейвлет-преобразование (вейвлеты 'morl').

освоение территории полуострова строительными комплексами требует создания комплексной сети локальных геодинамических станций, прогнозирующих возможности и экологическую безопасность для проведения геодезических, строительных и сельскохозяйственных работ. Изучение местных нерегулярных изменений фигуры Земли, гравитационных, магнитных и сейсмических полей, местных и общих деформаций земной коры необходимо для прогноза землетрясений путем выявления района с аномальными значениями этих параметров.

2. Помимо предсказуемых деформаций, наблюдаются изменения не объяснимые в теории приливов, так называемые не смоделированные добавки к деформациям поверхности твердой земли. В настоящее время проблема достижения миллиметровой точности в определении положений и скоростей смещений наблюдательных инструментов требует учета этих добавок, что стало возможным благодаря скоординированной работе в сети станций наблюдений. Вследствие суточного вращения Земли и движения Земли, Луны и Солнца по своим орбитам приливообразующая сила в каждой точке на поверхности Земли непрерывно меняется во времени, никогда точно не повторяясь. Земля не является абсолютно твердым телом: под действием внешних сил расстояние между двумя произвольными точками изменяется. Если действие внешних сил прекращается, то точки не возвращаются в первоначальное положение, т.е. Земля остается в деформированном состоянии. Полученная нами информация о сезонных дополнениях к деформациям земли на станции РСДБ "Симеиз" служит для уточнения сезонных смещений координат станции.

3. Периоды стабильных колебаний гелио-геофизических процессов зависят от физических, динамических и геометрических характеристик Солнечной системы, от существующих соизмеримостей в периодах вращения и обращения небесных тел. Колебания земных условий зависят от солнечной активности. солнечно-лунных приливных сил, от собственных движений в газообразных, жидких и твердых слоях Земли. При этом наблюдаются обратные связи, которые при неблагоприятных внешних условиях (повышение солнечной активности, космические факторы) и наличии внутри земного очага, который, можно предположить существует под горой вулканического происхождения Кара-Даг, непредсказуемым образом могут отразиться на экологии и жизнедеятельности всего полуострова. Выполненный нами анализ по данным SSE за период июль 1983 г.-июнь 2005 г. инсоляции падающей на поверхность земли в различных пунктах Крыма обнаруживает положительную тенденцию. Тем не менее, рост инсоляции и температуры поверхности земли в пункте Кара-Даг выше по сравнению с другими пунктами Крыма.

4. Рост амплитуды колебаний сезонной составляющей в данных об инсоляции падающей на поверхность земли в Крыму можно объяснить процессом сложения двух колебаний с периодами ~365 сут. В то же время, регулярное превышение инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг по сравнению с другими пунктами Крыма возможно связаны исключительно с геолого- структурными свойствами горы Кара-Даг. Отличие состоит в том, что после удаления периодических колебаний в данных об инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг остаются следы кратковременных энергетических воздействий в области низких частот по-

сле 1986 и после 1995 гг., возможно, связанные с особой реакцией геологической структуры горы Кара-Даг на космические воздействия. Работа частично поддержана проектом КП19-270 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996.
- 2. *Берри Б.Л.* Синхронные процессы в оболочках Земли и их космические причины // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1991. № 1. С. 20–27.
- 3. *Daubechies I.* CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics, Lectures delivered at the CBMS conference on wavelets, University of Lowell, Mass., June 1990, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1992.
- Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech. 1992. V. 24. P. 395–457.
- 5. Курбасова Г.С., Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н. Астрономические циклы в климатических и геофизических характеристиках Крыма // Космич. исслед. 2019. Т. 57. № 4. С. 260–268. (Cosmic Research. P. 243)

- 6. Вольвач А.Е., Курбасова Г.С., Вольвач Л.Н. Модель "атмосфера": анализ временных рядов дополнений к деформациям поверхности земли // Астрофиз. Бюллетень. 2018. Т. 73. № 4. С. 514–520.
- 7. Вольвач А.Е., Курбасова Г.С. Вековые вариации геомагнитного склонения в пункте Кара-Даг и глобальные гелио- геодинамические процессы // Геофизический журн. 2019. Т. 41. № 1. С. 192–199.
- 8. *Volvach A., Kurbasova G.* Model of insolation of the earth surface in the Kara-Dag locality according to SSE data // Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology. 2019. V. 2. № 85. P. 51–58.
- Mallat S. Applied mathematics meets signal processing. Doc. Math. (Bielefeld) Extra Vol. ICM Berlin, 1998. V. I. P. 319–338.
- 10. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002.
- 11. *Сидоренков Н.С.* Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы // Природа, 2008. № 2. С. 23–31.
- Shyu H.C., Sun Y.S. Construction of a Morlet Wavelet Power Spectrum // Multidimensional systems and signal processing. 2002. V. 13. Issue 1. P. 101–111.
- 13. *Torrence C., Compo G.P.* A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V. 79. № 1. P. 61–78.
- 14. *Kurbasova G.S., Volvach A.E.* Wavelet analysis of terrestrial and space measurements of local insolation // Space Science and Technology. 2014. V. 20. № 4. P. 42–49.