

УДК 523.31-852

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ ЦИКЛЫ В КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ КРЫМА

© 2019 А. Е. Вольвач^{1,2*}, Г. С. Курбасова¹, Л. Н. Вольвач¹

¹Отдел радиоастрономии и геодинамики Крымской астрофизической обсерватории РАН, Ялта, 298688, Россия

²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 5 марта 2018 года; после доработки 15 апреля 2019 года; принята к публикации 15 апреля 2019 года

Анализ временных рядов наблюдений климатических характеристик на полуострове Крым за период 1983–2005 гг. показал ускоренный рост (по сравнению с другими пунктами Крыма) инсоляции поверхности Земли в пункте Кара-Даг и аномальное снижение температуры поверхности Земли в пункте Фонарь. Вычислены параметры геомагнитного поля для пункта Кара-Даг. Для вычисления изменений параметров геомагнитного поля в Крыму использовался калькулятор IGRF-12. Обнаружены регулярные колебания в анализируемых временных рядах наблюдений, периоды которых совпадают с солнечно-земными циклами. Вычислены функции когерентности и определены периоды когерентных вариаций. В результате анализа поправок к вертикальным деформациям поверхности Земли в пункте Качивели выделена сезонная составляющая и вычислены ее параметры.

Ключевые слова: Земля — атмосферные эффекты

1. ВВЕДЕНИЕ

Крымский полуостров расположен вблизи границы Евразийской литосферной плиты, деформации и движения которой на длительном интервале времени оказывают влияние на активизацию внутриземных процессов (землетрясения, вулканическая деятельность, сели). Возросшая за последние десятилетия энергетика внешних и внутриземных природных процессов отражается, часто непредсказуемым образом, на характере изменения локальных геофизических и климатических характеристик Крыма. Для предсказания этих изменений необходимо выявлять их связь с прогнозируемыми глобальными астрономическими процессами, такими как движение полюсов и вращение Земли, изменения параметров системы Земля–Луна, лунно-солнечные приливы, гравитационное взаимодействие планет Солнечной системы, солнечная активность, вариации параметров геомагнитного поля. Проявление этой взаимосвязи в различных точках земного шара имеет особенности, обусловленные локальными условиями, изучение которых возможно на основе сопоставления глобальных астрономических циклов и временных рядов наблюдений локальных климатических и гелиогеофизических характеристик.

Так как надежных методов предсказания природных катаклизмов в настоящее время не существует, исследования ученых направлены на изучение косвенных возможных причин их возникновения, таких как экстремальные события на Солнце, динамика вращения Земли, активизация течения жидких масс внутри Земли, события в атмосфере и магнитосфере, техногенные факторы. Необходимость анализа связи изменяющихся во времени и пространстве гелиогеофизических характеристик и параметров климата способствовала разработке и практическому внедрению робастных математических методов, подходящих для вычисления устойчивых характеристик временных рядов при ограниченной их длительности. К таким методам можно отнести многоканальные процедуры оценки спектральной плотности мощности (СПМ), разработанные для анализа коротких выборок данных, а также частотно-временной вейвлет-анализ. В последние годы эти методы успешно применялись в практике изучения природных процессов [1–9]. По причине своей информативности анализ локальных наблюдений с помощью вейвлетов использовался нами в изучении аномалий инсоляции и температуры в пункте Кара-Даг, на мысе Фонарь, в анализе деформаций поверхности Земли по наблюдениям на Крымском гелиогеодинамическом полигоне, включенном в сеть станций радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ, Very Long Baseline Interferometry — VLBI), Глобальной

*E-mail: volvach@bk.ru

навигационной спутниковой системы (ГНСС, Global Navigation Satellite System — GNSS), лазерной спутниковой дальнометрии (ЛСД, Laser Satellite Ranging — LSR) [2–10]. Приведенные в настоящей работе результаты частотно-временного вейвлет-анализа временных рядов солнечной инсоляции, температуры и деформаций поверхности Земли в отдельных пунктах Крыма демонстрируют пространственно-временную связь солнечных, метеорологических и геофизических процессов с динамикой вращения Земли, солнечной активностью.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

2.1. Солнечная инсоляция, температура поверхности Земли

Для поддержки научных и технических разработок по проблемам возобновляемой энергетики в НАСА разработан и успешно реализован Проект прогноза энергетических ресурсов во всем мире (POWER — Prediction of Worldwide Energy Resource Project). В рамках этого проекта создана база данных параметров наземной метеорологии и солнечной энергии SSE (Surface Meteorology and Solar Energy) [11]. В базе представлены более 200 спутниковых параметров метеорологии и солнечной энергии. Имеющиеся в ней данные об изменениях климата на протяжении 22 лет (июль 1983—июнь 2005 гг.) охватывают всю поверхность Земли с сеткой один градус широты на один градус долготы. Точность спутниковых данных оценивалась с помощью многочисленных наземных измерений. По оценкам НАСА, среднеквадратическая ошибка ежемесячных значений составляет около 13–16%.

В данной работе мы анализировали следующие временные ряды из базы данных SSE: инсоляцию на горизонтальную поверхность в кВт час м⁻² сутки⁻¹ и температуру поверхности Земли в градусах Цельсия.

2.2. Вековые вариации геомагнитного поля

Международная ассоциация по геомагнетизму и аэронавигации (The International Association of Geomagnetism and Aeronomy — IAGA) выпустила «Международное геомагнитное аналитическое поле» двенадцатого поколения — IGRF-12 — новую версию стандартного математического описания основного магнитного поля Земли. Для вычисления изменений параметров геомагнитного поля в Крыму мы использовали калькулятор IGRF-12 [12].

2.3. Поправки к деформациям поверхности Земли

В отделе исследований DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) разработан международный проект по поддержке пространственно-временных опорных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе. Целью проекта является разработка квазиинерциальной системы отсчета, реализованной путем согласования положения сети квазаров и земной системы отсчета на основе общего набора параметров, в частности, на основе однородных геофизических моделей: «Океан», «Атмосфера», «Гидрология» [13, 14].

В 2015 г. в Комбинационном центре (CC — Combination Centre) в DGFI-TUM (Deutsches Geodatisches Forschungsinstitut) реализована опорная система ITRS (International Terrestrial Reference System) в виде DTRF2014. Для вычисления DTRF2014 предоставлены временные ряды данных на основе четырех космических геодезических методов ГНСС, РСДБ, ЛСД и Дорис (навигационная система доплеровской орбитографии и спутниковой радиолокации (Doppler Orbitography Radio-positioning Integrated by Satellite — DORIS)). В рамках проекта на Крымском гелиогеодинамическом полигоне (пункт Качивели) проводятся наблюдения с помощью оборудования РСДБ, ЛСД и ГНСС. Для анализа нами использованы данные о поправках к деформациям поверхности земли в пункте Качивели, вычисленные на основе геофизических моделей «Атмосфера» и «Океан» [15].

Кроме того, для сравнительного анализа использовались среднегодовые данные о солнечной активности [16], об аномалиях глобальной температуры [17] и об изменении длительности суток [18].

3. АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ В ХАРАКТЕРИСТИКАХ КЛИМАТА КРЫМА

Климатическая система Земли формируется при активном участии всех геосфер планеты: атмосферы, океана, криосферы, поверхности континентов, литосферы, антропосферы. На ее формирование влияют радиационные, приливные, гравитационные и электромагнитные внешние силы. Наиболее изученным индикатором климатической изменчивости признана температура (приповерхностная температура воздуха и температура поверхности Земли и океана).

В последнее время резко возросла актуальность изучения геодинамических процессов, происходящих в приповерхностных геологических структурах, которые характерны для городов и зон расположения крупных инженерных сооружений на

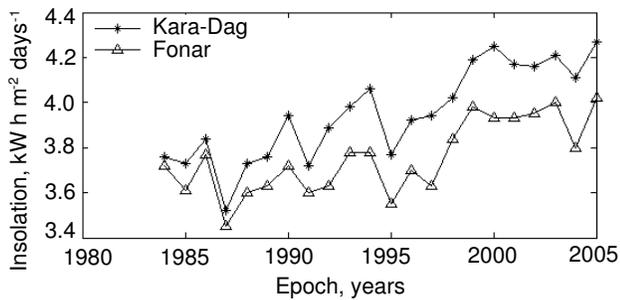


Рис. 1. Среднегодовая инсоляция, поступающая на горизонтальную поверхность Земли в пунктах Кара-Даг и Фонарь (данные SSE).

локальных территориях. При составлении долгосрочных локальных прогнозов особое внимание уделяется использованию спутниковых данных о климатических параметрах, подверженных гелиогеодинамическим воздействиям [19, 20].

Анализ данных SSE показал, что локальные геологические особенности, техногенные факторы, а также региональные и глобальные проявления эндогенных процессов Земли способствуют неравномерному распределению инсоляции, поступающей на поверхность Земли на территории Крыма. Ранее мы провели анализ инсоляции земной поверхности в Крыму [9] и обнаружили неравномерное ее распределение и аномальный рост в пункте Кара-Даг.

3.1. Инсоляция поверхности Земли

Анализ многолетних линейных тенденций изменения инсоляции в различных пунктах Крыма показал, что скорость роста инсоляции в пункте Кара-Даг по данным 22-летнего линейного тренда составляет $2.69 \text{ кВт час м}^{-2}$ за столетие и более чем в два раза превышает рост инсоляции в других районах Крыма [20]. Сравнение графиков на рис. 1 демонстрируют расхождение тенденций роста общей инсоляции в пунктах Кара-Даг и Фонарь.

В результате проведенного нами частотно-временного непрерывного вейвлет-анализа мы обнаружили в спектральной структуре данных о среднесуточной инсоляции, поступающей на горизонтальную поверхность Земли в пункте Кара-Даг, по крайней мере пять регулярных астрономических колебаний. Периоды этих колебаний сопоставимы с периодами лунных и лунно-солнечных приливных воздействий. Период наиболее мощного колебания равен 345.3 суток, а амплитуда его существенно возрастает после 1995 г. (более интенсивная окраска на рис. 2). В остальных пунктах Крыма наблюдается умеренный рост амплитуды этого колебания.

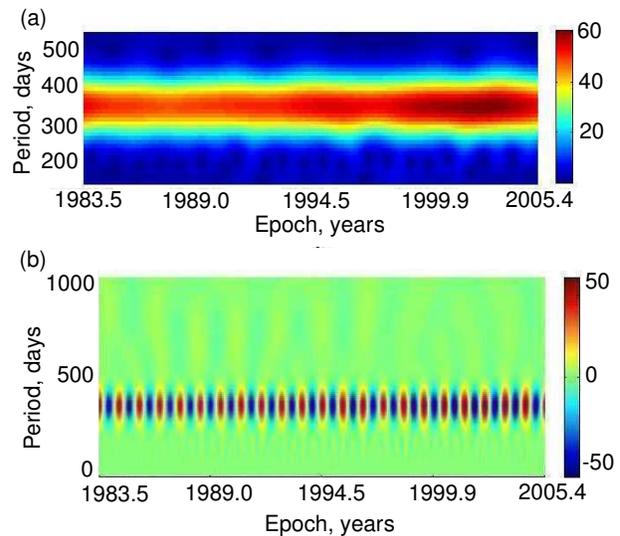


Рис. 2. Частотно-временная характеристика данных о среднесуточной инсоляции, поступающей на горизонтальную земную поверхность в пункте Кара-Даг: (a) — непрерывное частотно-временное вейвлет-преобразование, (b) — выделение периодических колебаний. Вейвлеты «morl».

Период следующего по мощности колебания равен 365 суткам, а его амплитуда стабильна. Высокочастотные колебания, от которых зависит точность краткосрочных прогнозов, неустойчивы и имеют переменную фрактальную структуру. В области низких частот (больших периодов) намечаются следы регулярных колебаний, которые не могут быть достоверно выявлены из-за ограниченной длительности временного интервала определения данных и небольших амплитуд этих колебаний.

3.2. Температура поверхности Земли

Из проведенного нами анализа температуры земной поверхности в Крыму следует, что в крайних пунктах и их окрестностях температура растет с различной скоростью, за исключением мыса Фонарь, где она убывает [8].

Рисунок 3 демонстрирует разницу в тенденциях изменения температуры поверхности Земли в пунктах Кара-Даг и Фонарь. Понижение температуры поверхности Земли в пункте Фонарь за период определения данных SSE наблюдается и в настоящее время. Связь его с геологическими особенностями локального пункта не подлежит сомнению.

Рассмотрим развитие этого процесса на фоне глобальных астрономических циклов. Для изучения спектрального состава данных о температуре поверхности Земли в пункте Фонарь мы используем преобразование Фурье [10]. С помощью Фурье-анализа этих данных мы обнаружили всего одно значимое колебание с периодом 372.3 суток. В то

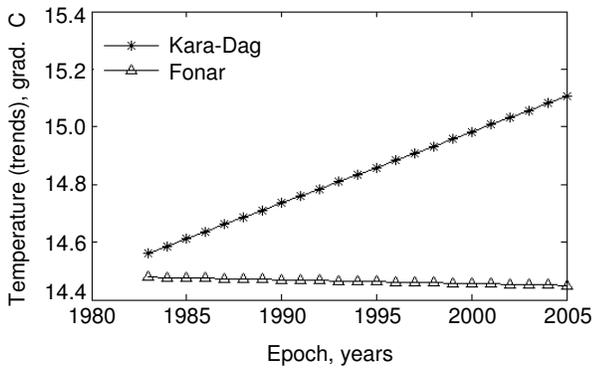


Рис. 3. Среднегодовая температура поверхности земли в пунктах Кара-Даг и Фонарь (линейные тренды).

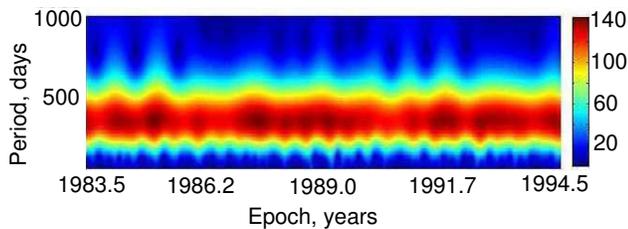


Рис. 4. Частотно-временная характеристика данных о температуре поверхности Земли на мысе Фонарь (данные SSE). Вейвлет-преобразование (вейвлеты «morl»).

же время результаты проведенного нами вейвлет-анализа дают более полную картину спектрального состава исходных данных и его пространственно-временную локализацию. Непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ выявил в вариациях температуры поверхности Земли регулярное колебание с периодом 357 суток, амплитуда которого испытывает модуляцию с периодом порядка 10 ± 2 года (рис. 4). Кроме того, выделяются менее мощные, близкие по частоте регулярные колебания с периодом около 1 года.

4. ПОПРАВКИ К ДЕФОРМАЦИЯМ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ПУНКТЕ КАЦИВЕЛИ

Большинство телескопов и другое экспериментальное оборудование для наблюдений объектов в ближнем и дальнем космическом пространстве расположены на земной поверхности, поэтому при регистрации наблюдательных данных необходимы земные системы отсчета. От точности установления связи между этими системами зависит возможность достоверного обнаружения тонких эффектов в результатах наблюдений. Так как в настоящее время достоверность экспериментальных

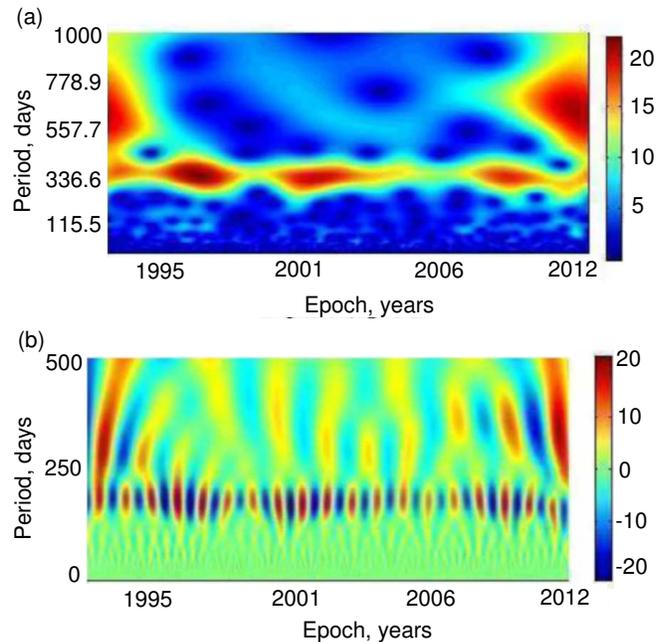


Рис. 5. Непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ (вейвлеты «morl») данных о поправках к вертикальным деформациям поверхности Земли в пункте Кацивели (модель «Океан»): (a) — картина непрерывного частотно-временного вейвлет-преобразования; (b) — выделение периодических колебаний.

результатов часто опережает точность существующих физических моделей, и достоверность пространственных геодезических наблюдений гораздо выше, чем надежность существующих реализаций опорной сети, проблема определения и регулярного корректирования по наблюдениям систем отсчета является одной из главных задач как фундаментальных, так и прикладных исследований.

Нелинейные движения станций наблюдений являются основным источником ошибок в текущих реализациях систем отсчета. Причины появления и методы учета этих смещений могут быть различными. Одна из них — неучтенные при моделировании опорных сетей эффекты влияния гидрофизических оболочек: океана, атмосферы, гидросферы.

Как показал проведенный нами анализ, данные о поправках к деформациям поверхности Земли в пункте Кацивели, вычисленные на основе геофизических моделей «Атмосфера» и «Океан», содержат периодические компоненты (рис. 5).

Анализ и моделирование периодических колебаний в данных о поправках к вертикальным деформациям по модели «Атмосфера» представлены в нашей публикации [4]. В результате анализа наибольших по абсолютной величине поправок к вертикальным деформациям по модели «Атмосфера» обнаружена сезонная составляющая. Период этого

колебания равен 365.3 суток с 95% доверительными границами (365.3; 365.1) суток; амплитуда равна 3.37 мм с 95% доверительными границами (3.33; 3.40) мм.

Рисунок 5 демонстрирует тот факт, что сезонное колебание обнаруживается и в данных о поправках по модели «Океан». Более того, в этом случае наблюдаются колебания с более длинными периодами (2 ± 0.5 года).

5. УСТАНОВЛЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СВЯЗЕЙ

В анализе спектрального состава исходных данных нами использовался метод спектральных оценок, обладающий высокой разрешающей способностью для ограниченных последовательностей данных [21].

Согласно этому методу, установление взаимной корреляции между двумя (одноканальными) процессами состоит в вычислении функции взаимной (двухканальной) спектральной плотности мощности (СПМ), которая представляет собой дискретно-временное преобразование Фурье взаимной корреляционной функции r_{xy} в виде:

$$P_{xy}(f) = T \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} r_{xy}[k] e^{-j2\pi f k T}, \quad (1)$$

где x и y — одноканальные процессы, f — частота, T — интервал времени. Комплексное безразмерное выражение функции когерентности имеет вид

$$F_{xy}(f) = \frac{P_{xy}(f)}{\sqrt{P_{xx}(f)} \sqrt{P_{yy}(f)}}. \quad (2)$$

Для измерения сходства (как функции частоты) двух сигналов вычисляем квадрат модуля когерентности (coherence modulus square — CMS) в виде

$$\text{CMS}(f) = |F_{xy}(f)|^2 \quad (3)$$

и фазовый спектр когерентности

$$\Theta(f) = \arctg \frac{\text{Im}(F_{xy}(f))}{\text{Re}(F_{xy}(f))}. \quad (4)$$

Величина CMS (формула (3)) заключена между 0 (для частот, на которых отсутствует когерентность между каналами) и 1 (для частот, на которых каналы полностью когерентны). Фаза когерентности (формула (4)) характеризует отставание или опережение в канале x по отношению к каналу y как функцию частоты.

Тенденции к синхронизации глобальных и локальных процессов в природе в настоящее время не подлежат сомнению [22].

Приведем результаты установления когерентных вариаций между некоторыми данными о глобальных процессах, таких как солнечная активность и изменение длительности суток, и локальными климатическими и геофизическими характеристиками в Крыму.

Солнце — основной источник энергии на Земле. Однако физические характеристики Солнца меняются в различных масштабах времени. Особую значимость для жизни на Земле представляет практически неизменная светимость (на уровне 0.1% в настоящую эпоху). В период наибольшей солнечной активности ультрафиолетовое, рентгеновское и корпускулярное излучения Солнца влияют на магнитосферу и ионосферу Земли, изменяя межпланетную среду. До недавнего времени единственной характеристикой переменности солнечной активности было изменение количества солнечных пятен. Изменение солнечной активности в числах Вольфа (и в других индексах) носит циклический характер со средней продолжительностью циклов 11.2 года (цикл Швабе). Мы используем данные об изменении чисел Вольфа [16] для определения когерентных колебаний.

Одним из основных глобальных геодинамических процессов, влияющих на изменения локальных геофизических и атмосферных характеристик, является вращение Земли вокруг своей оси и ее положение на орбите. Для установления когерентных колебаний мы сопоставляем вычисленные [12] данные о геомагнитных характеристиках в пункте Кара-Даг (напряженность общего геомагнитного поля F , горизонтальная составляющая H) и среднегодовые величины отклонений длительностей суток от стандартных (86 400 с) LOD (length of day), публикуемые Международной службой вращения Земли [15].

На рис. 6а приведен график функции квадрата модуля когерентности между данными об общей инсоляции в пункте Кара-Даг и изменениями длительности суток (LOD). Максимальное значение CMS (86%) соответствует вариациям с периодом 11.7 года.

Функция когерентности (рис. 6б) содержит три существенных когерентных колебания с периодами: 10.5 лет (CMS = 0.82), 3.6 года (CMS = 0.85) и 2.5 лет (CMS = 0.79). На рис. 6с выделяются колебания с периодами 6.9 лет (CMS = 0.70) и колебание с периодом 3.5 года (CMS = 0.93).

В цепочке солнечно-земных взаимодействий влияние солнечной активности на внешние и внутривоздушные процессы проявляется в событиях, период повторения которых составляет в среднем 11 лет. Региональные и локальные условия являются дополнительным воздействующим фактором. Мы обнаружили высокую когерентность

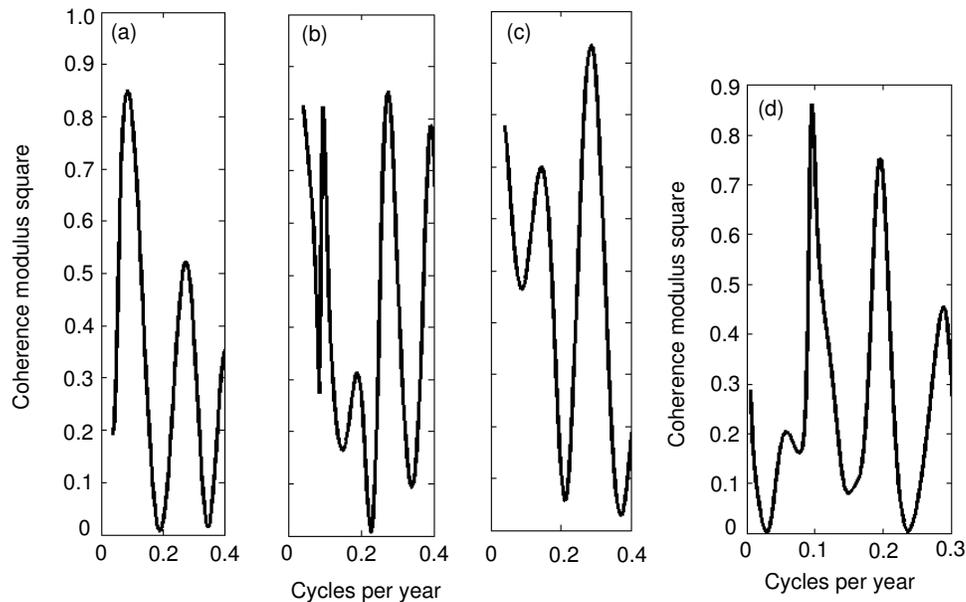


Рис. 6. Функции когерентности колебаний CMS между изменениями из года в год общей инсоляции в пункте Кара-Даг (a), чисел Вольфа (b), индексов глобальной температуры (c) и отклонениями длительности суток от стандартных; между изменениями из года в год среднегодовых данных геомагнитного склонения в пункте Кара-Даг и среднегодового числа солнечных пятен [16](d).

изменения из года в год напряженности общего магнитного поля в пункте Кара-Даг с изменениями числа солнечных пятен. На рис. 6d максимальное значение CMS соответствует вариациям с периодом 10.5 лет. Десятилетние вариации обнаружены ранее в экспериментальных данных при исследовании некоторых геодинамических, геофизических и гелиофизических процессов [24]. Их когерентность с вариациями в данных о локальном геомагнитном поле Крыма обсуждается впервые.

Связь локальных климатических и геофизических характеристик с многолетними изменениями глобальной температуры Земли в настоящее время является предметом дискуссий. Отсутствие знаний о многолетнем механизме этой связи дополняется гипотезами и анализом эмпирических данных. Установленная нами когерентная связь вариаций среднегодовых данных об изменениях из года в год глобальных аномалий температуры и общей напряженности геомагнитного поля в пункте Кара-Даг согласуется с выводами об общем источнике генерации этого колебания [23].

6. ВЫВОДЫ

1. Анализ проявлений астрономических циклов в локальных климатических и геофизических характеристиках Крыма допускает мысль о тенденции к синхронизации процессов различной физической природы даже при слабой их связи.

2. Установленные в настоящей работе когерентные вариации с периодами около 10–12 лет обнаруживаются в различных по своей физической природе процессах и могут быть отнесены к глобальным циклам в Солнечной системе, проявление которых в климатических и геофизических локальных процессах является результатом общей тенденции к синхронизации. При этом возможны появления когерентных вариаций с кратными или соизмеримыми частотами.

3. В результате выполненного нами анализа данных о поправках к вертикальным деформациям земли в пункте Качивели, вычисленных по модели «Атмосфера», обнаружено сезонное колебание с амплитудой 3.37 мм и определены параметры аналитической модели.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа частично поддержана Программой 28 РАН и грантом РФФИ 19-42-910002.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. M. Astafieva, *Physics—Uspekhi* **166**, 1145 (1996).
2. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, *Космическая наука и технология* **20**, 42 (2014).
3. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач *Вейвлеты в практике анализа одномерных временных рядов наблюдений* (Запорожский нац. унив., Запорожье, 2016).
4. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, *Международный научно-исследовательский журнал* **50**, № 8, Часть 2, 63 (2016).
5. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, *Естественные и математические науки в современном мире* **25**, № 1, 184 (2015).
6. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, *Естественные и математические науки в современном мире* **27**, № 3, 84 (2015).
7. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, *Естественные и математические науки в современном мире* **28**, № 4, 62 (2015).
8. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, С. П. Корсакова, *Естественные и математические науки в современном мире* **29**, № 5, 205 (2015).
9. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, *Наука вчера, сегодня, завтра* **26**, № 4, 79 (2015).
10. <https://in.mathworks.com/help/wavelet/gs/from-fourier-analysis-to-wavelet-analysis.html>
11. <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
12. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
13. M. Seitz, M. Blossfeld, D. Angermann, et al., *Deutsches Geodatisches Forschungsinstitut* (PANGAEA, 2016).
14. A. E. Volvach, L. N. Volvach, A. M. Kutkin, et al., *Astronomy Reports* **54**, 28 (2010).
15. А. Е. Вольвач, Ю. Ю. Юровский, Л. Н. Вольвач, И. Д. Стрепка, в: *Труды 17 Междунар. конф. по СВЧ-технике и телекоммуникационным технологиям* (Севастополь, 2007) с.824.
16. <http://www.sidc.be/silso/datafiles>.
17. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata>.
18. IERS Web site map, Data Products, URL: <http://hpiers.obspm.fr/> (2017).
19. Н. С. Сидоренков, *Природа* № 2, 23 (2008).
20. G. S. Kurbasova and A. E. Volvach, in: *Proc. of the 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014)* Vol.2 (IEEE, Sevastopol, 2014), p. 1085.
21. S. L. Marple, Jr., *Digital Spectral Analysis with Applications* (Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, 1986).
22. Б. Л. Берри, *Вестник МГУ* **5**, № 1, 20 (1991).
23. J. O. Dickey, L. M. Steven, *J. Climate* **24**, 569 (2011).
24. G. S. Kurbasova, A. A. Korsun, L. V. Rykhlova, et al., *Astronomy Reports* **41**, 128 (1997).

Solar-Terrestrial Cycles in the Climatic and Geophysical Properties of Crimea

A. E. Volvach, G. S. Kurbasova, and L. N. Volvach

Analysis of the time series of climatic characteristics of the Crimean peninsula for the period of 1983–2005 showed an enhanced growth (compared to other points of the Crimea) of the insolation of the Earth's surface at Kara-Dag and an anomalous temperature decrease of the Earth's surface at the Cape Fonar. The parameters of the geomagnetic field of the Kara-Dag mount were estimated. To derive the geomagnetic field variations in Crimea, the IGRF-12 online calculator was used. Regular oscillations were found in the analyzed time series, whose periods coincide with the solar-terrestrial cycles. The coherence functions were calculated and the periods of coherent variations were determined. As a result of the analysis of corrections to the vertical deformations of the Earth's surface, a seasonal component was selected at Katsiveli and its parameters were calculated.

Keywords: *Earth—atmospheric effects*