

## Анализ периодических колебаний инсоляции и температуры земли Крыма

*А. Е. Вольвач<sup>1,2</sup>, Г. С. Курбасова<sup>1</sup>, Л. Н. Вольвач<sup>1</sup>, 2019*

<sup>1</sup> Лаборатория радиоастрономии КрАО, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

<sup>2</sup> Институт прикладной астрономии, Санкт-Петербург, Россия  
Поступила 5 июня 2019 г.

За даними 22-річного ряду кліматології NASA Surface meteorology and Solar Energy наведено результати аналізу часових рядів локальних змін інсоляції і температури земної поверхні та і приземного повітря в Криму. Статистичний і безперервний частотно-часовий вейвлет-аналізи виявили підвищену (порівняно з іншими пунктами Криму) інсоляцію і прогрів земної поверхні в пункті Кара-Даг.

За допомогою частотно-часового безперервного вейвлет-аналізу виявлено в спектральній структурі даних середньодобової інсоляції, що падає на горизонтальну земну поверхню в пункті Кара-Даг, шість регулярних астрономічних коливань, періоди яких можна порівняти з періодами сезонних коливань, місячних і місячно-сонячних приливних хвиль. Періодичні коливання, зіставні з коливаннями сонячної активності і динамікою обертання системи Земля—Місяць, описано синусоїдальними функціями, параметри яких визначено за спостереженнями. У даних середньодобової загальної інсоляції, що падає на земну поверхню в пункті Кара-Даг, виявлено регулярні періодичні коливання на інтервалі періодів  $\sim(87—402)$  діб. Найпотужніші гармонічні коливання виділяються в інтервалі періодів  $\sim(231—452)$  діб; на часовому інтервалі  $\sim 1995—2005$  років спостерігається локальне зростання енергії коливань. Зареєстровано зростання середньої середньорічної температури земної поверхні в Криму у південно-східному напрямку. В окремих пунктах спостерігаються відхилення від загальної тенденції, що може бути пов'язано з локальними геологічними процесами. Найбільше прогрівання земної поверхні спостерігається в пункті Кара-Даг, що відповідає підвищеній загальній інсоляції в цьому пункті.

Методом обчислення функцій взаємної (двоканальної) спектральної щільності потужності встановлено взаємні кореляції між часовими послідовностями спостережень локальних змін інсоляції і змінами тривалості доби, чисел сонячних плям, індексів глобальної температури.

**Ключові слова:** сонячна інсоляція, температура земної поверхні, вейвлет-аналіз, когерентні коливання, модель.

**Введение.** Динамическая система Земля состоит из множества различных компонент. Законы взаимодействия составляющих Землю компонент в настоящее время изучены не в полной мере. В то же время любые события в магнитосфере, атмосфере, литосфере, гидросфере, криосфере и биосфере Земли должны рассматриваться в единой связанной системе. Происходящие в этой системе глобальные изменения не однозначно влияют на локальные климатические, геофизические и экологи-

ческие характеристики. Характер их проявлений зависит от локальных геофизических и экологических условий, расположения локального пункта на поверхности Земного шара. Наша планета изменяется во времени и пространстве. Изучение этих изменений в различных масштабах необходимо для научного понимания системы Земля, ее реагирования на стихийные и антропогенные изменения, улучшения прогнозирования климата, погоды и стихийных бедствий.

Основным источником энергии на Земле является Солнце. Однако физические характеристики Солнца изменяются в различных масштабах времени. Особую значимость для жизни на Земле представляет практически неизменяемая светимость (на уровне 0,1 % в настоящую эпоху). В то же время периодические изменения солнечной активности в сочетании с локальными и глобальными земными процессами определяют вариабельность поступления на Землю солнечной энергии. В период наибольшей солнечной активности ультрафиолетовое, рентгеновское и корпускулярное излучения Солнца влияют на магнитосферу и ионосферы Земли, изменяя межпланетную среду. Одним из показателей энергии, падающей на поверхность Земли, является инсоляция, нормирование и расчет которой в настоящее время являются, пожалуй, наиболее острой светотехнической, экономической и социально-правовой проблемой.

Одним из главных показателей изменения климата является температура. Причины роста глобальной температуры за последние десятилетия продолжают оставаться предметом активных дискуссий. Поэтому анализ длительных рядов измерений температуры в различных пунктах земной поверхности и атмосферы способствует установлению глобальных причинно-следственных связей.

Под воздействием широкого комплекса взаимосвязанных климатообразующих факторов формируется глобальный и региональный климаты. Возможные изменения этих климатов предсказываются с помощью соответствующих моделей, которые из-за нерешенных вопросов в исследовании причин изменения скорости вращения Земли, механизма солнечно-земных связей, океана, атмосферы, процессов внутри Земли имеют статистический характер и нуждаются в уточнении с помощью наземных и космических наблюдений [Dickey et al., 2011].

**Инсоляция, падающая на поверхность Земли в Крыму.** Для поддержки научных и технических разработок по проблемам

возобновляемой энергетики в НАСА разработан и успешно функционирует в настоящее время проект прогноза энергетических ресурсов во всем мире POVER (Prediction of Worldwide Energy Resource Project), в рамках которого создана база данных параметров наземной метеорологии и солнечной энергии из более 200 спутниковых параметров метеорологии и параметров солнечной энергии. Имеющийся в этой базе 22-летний ряд климатологии (июль 1983—июнь 2005) обеспечивает глобальный охват по поверхности Земли множества данных SSE (NASA Surface meteorology and Solar Energy) [NASA..., 2015]. В настоящих исследованиях использовались данные из этой базы об инсоляции, падающей на поверхность Земли в различных пунктах Крыма. Очищенные от ненормированного «белого» шума данные содержат шумовую компоненту со стандартным отклонением 0.151 (std=0.151).

Согласно рис. 1 максимальный приток солнечной энергии в Крыму за 22 года приходится на площадь 43°—44° с.ш. и 33°—37° в.д. В целом наблюдается рост инсоляции в юго-восточном направлении.

Сопоставим многолетние тенденции изменения инсоляции в отмеченных на рис. 2 пунктах Крыма. Для сравнения выбраны четыре пункта, расположенные на приграничной территории полуострова Крым: северный (1) — Перекоп, восточный (2) — Фонарь, южный (3) — Сарыч, западный (4) — Кара-Мрун, а также пункты Кара-Даг (5) и Симферополь (6) в связи с их геологической историей (зона действия в прошлом мощных ретро вулканов).

Линейные тренды на рис. 2 представляют информацию о линейных тенденциях изменений инсоляции в отдельных пунктах полуострова. Скорость роста инсоляции в п. Кара-Даг по данным 22-летнего линейного тренда составляет 2,69 кВт·(ч/м<sup>2</sup>) за столетие, что более чем в 2 раза превышает рост инсоляции в других районах Крыма.

Нас будут интересовать периодические колебания, сопоставимые с колебаниями солнечной активности и динамикой вращения системы Земля—Луна как наибо-

лее значимые в формировании глобального и локального климата. Пространственно-временные изменения спектральной структуры данных на рассматриваемом интервале получим с помощью непрерывного частотно-временного вейвлет-анализа.

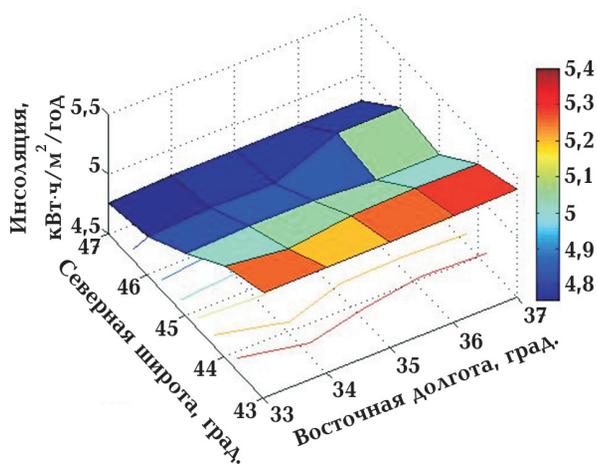


Рис. 1. Средняя за период с 1983 по 2005 г. среднесуточная инсоляция, падающая на поверхность Земли Крыма (по данным SSE).

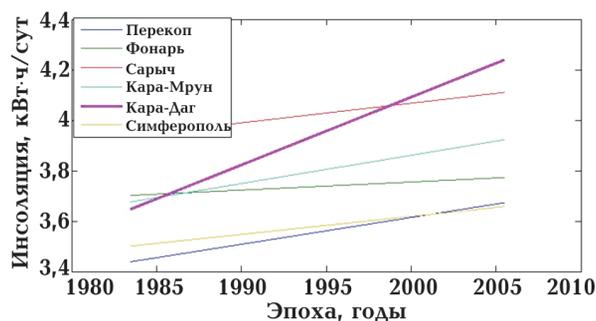


Рис. 2. Среднесуточная инсоляция, падающая на горизонтальную поверхность Земли в пунктах Крыма по спутниковым измерениям (тренды), данные SSE.

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 в этом методе 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* [Torrence, Compo, 1998].

Проведенный частотно-временной непрерывный вейвлет-анализ обнаруживает в спектральной структуре данных о среднесуточной инсоляции, падающей на горизонтальную поверхность Земли в пункте Кара-Даг, по крайней мере шесть регулярных астрономических колебаний. Периоды этих колебаний сопоставимы с периодами сезонного колебания, лунных и лунно-солнечных приливных волн.

Анализ графика на рис. 3 показывает: наиболее мощные гармонические колебания (см. цветовой индикатор справа) выделяются в интервале периодов  $\sim(231—452)$  сут.; на временном интервале  $\sim(1995—2005)$  лет наблюдается нарастающий локальный рост энергии колебаний.

Частотно-временной вейвлет-анализ обнаруживает регулярные периодические колебания в данных, которые могут быть описаны гладкими периодическими функциями. Периодические процессы в данных обычно описывают синусоидальными моделями. При этом глобальная модель периодических колебаний в анализируемых данных имеет вид

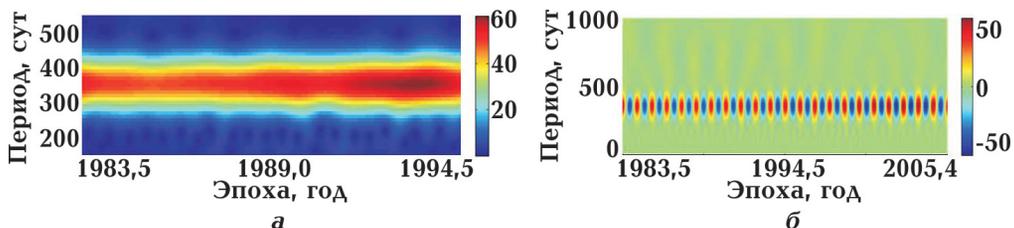


Рис. 3. Частотно-временная характеристика данных о среднесуточной инсоляции, падающей на горизонтальную поверхность Земли в п. Кара-Даг (данные SSE). Вейвлет-преобразование (вейвлеты 'morl'): а — картина непрерывного вейвлет-преобразования; б — выделение периодических колебаний.

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

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

При выборе порядка модели (1) учитывались как результаты вейвлет-анализа (шесть периодических параметров), так и величина среднеквадратической погрешности приближения данных, что определило выбор синусоидальной модели 6 порядка (S6) (табл. 1).

На рис. 4 приведены графики, демонстрирующие выделение периодической составляющей S6.

**Температура воздуха и поверхности Земли в Крыму** — одна из главных характеристик климата — зависит от количества солнечной энергии, поступающей на Землю. Циклические процессы на Солнце,

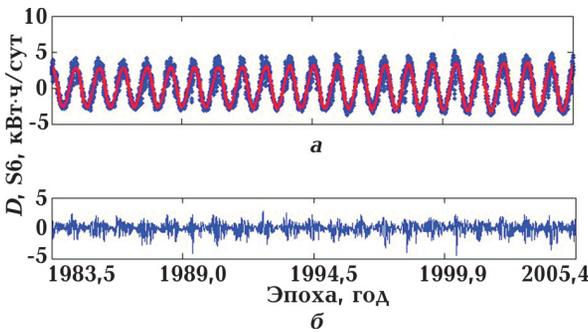


Рис. 4. Среднесуточная общая инсоляция, падающая на поверхность Земли в п. Кара-Даг по данным SSE: а — график исходных данных D (синие звездочки) и смоделированная по этим данным функция S6 (гладкая красная линия); б — несмоделированные разности D-S6.

**Т а б л и ц а 1.** Параметры периодических колебаний в данных об инсоляции, падающей на поверхность Земли в п. Кара-Даг (модель S6)

Составляющие модели S6, кВт·ч/м <sup>2</sup> за сут.	Периоды, сут.	Амплитуды, кВт·ч/м <sup>2</sup> за сут.	$c_n$ , рад.
S1	365,3015	6,34	0,7667
S2	182,1741	0,2031	0,1069
S3	344,6618	0,07307	1,501
S4	365,7267	4,854	-2,77
S5	87,2301	0,1065	1,666
S6	402,2526	0,04031	0,644

астрономические и геофизические факторы определяют циклический характер ее изменений. Эти изменения предсказуемы [Берри, 1991]. Неравномерное вращение Земли вокруг оси и геофизические процес-

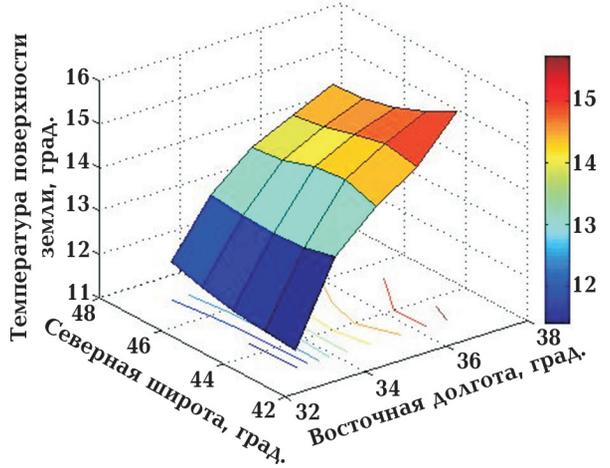


Рис. 5. Средняя за период с 1983 по 2005 г. среднегодовая температура поверхности Земли в Крыму по данным SSE.

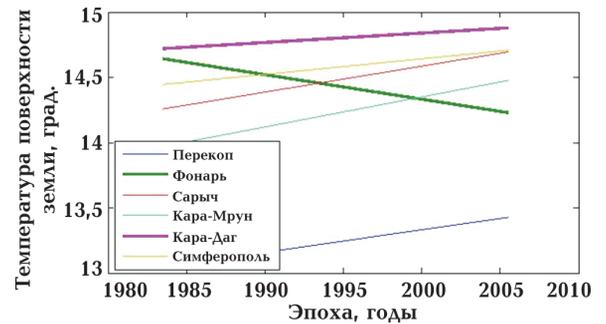


Рис. 6. Среднесуточная температура поверхности Земли в пунктах Крыма по спутниковым измерениям (тренды), данные SSE.

сы глобального и регионального происхождения (вулканы, землетрясения, явление Эль-Ниньо, аномалии гравитационного и геомагнитного полей и пр.) порождают вариации локальных климатических характеристик на ограниченных интервалах времени, отличные от изменений глобальных характеристик.

График на рис. 5 демонстрирует рост средней за 22-летний период среднегодовой температуры поверхности Земли в Крыму в юго-восточном направлении. Однако в отдельных пунктах наблюдаются отклонения от общей тенденции, что может быть связано с локальными геологическими процессами.

На рис. 6 приведены графики линейных трендов среднесуточной температуры Земли в шести пунктах Крыма за период с 1983 по 2005 г. В пяти пунктах наблюдаются положительные тенденции (темпе-

ратура поверхности Земли растет). В то же время в крайнем пункте на востоке полуострова (мыс Фонарь) температура понижается. Наибольшее прогревание поверхности Земли наблюдается в п. Кара-Даг, что соответствует повышенной общей инсоляции в этом пункте.

Тенденции изменения локальных климатических параметров могут отличаться от тенденций соответствующего глобального процесса.

На рис. 7 приведены графики исходных и сглаженных данных о приземной температуре воздуха в п. «Никитский сад» и аномалиях глобальной приземной температуры воздуха, вычисленных на базе только наземных наблюдений в интервале с 1950 по 2014 г. Как следует из сопоставления графиков (рис. 7, а и рис. 7, б), совпадение характера тенденций наблюдается только после 1990 г.

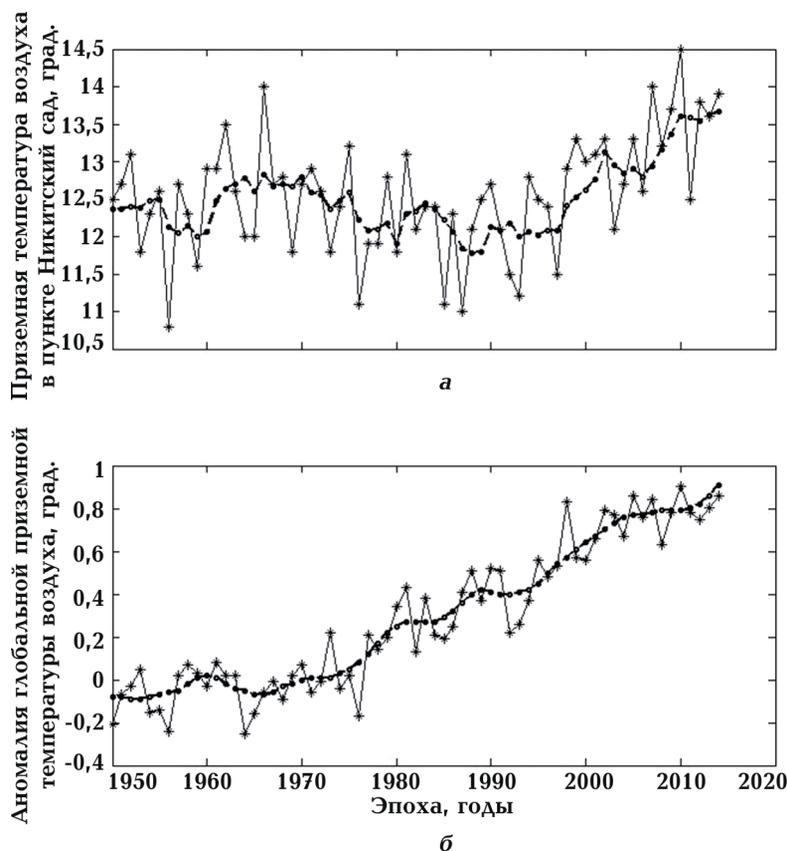


Рис. 7. Графики исходных и сглаженных данных на интервале с 1950 по 2014 г.: а — приземная температура воздуха в п. «Никитский сад»; б — аномалии глобальной приземной температуры воздуха [<http://data.giss.nasa.gov>]. На графиках исходные данные отмечены звездочками, сглаженные данные методом скользящего среднего ( $h = 5$  лет) — кружками.

**Когерентные связи.** В анализе когерентных связей использовался метод спектральных оценок, обладающих высоким разрешением для ограниченных последовательностей данных [Марпл, 1990]. Согласно этому методу установление взаимной корреляции между двумя (одноканальными) процессами заключается в вычислении функции взаимной (двухканальной) спектральной плотности мощности, которая представляет собой дискретно-временное преобразование Фурье взаимной корреляционной функции:

$$P_{xy}(f) = T \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} r_{xy}[k] \exp(-j2\pi f k T), \quad (2)$$

$$F_{xy}(f) = P_{xy}(f) / \sqrt{P_{xx}(f)} \sqrt{P_{yy}(f)}, \quad (3)$$

где  $x, y$  — одноканальные процессы,  $f$  — частота,  $T$  — интервал времени.

Учитывая уравнения (2), для измерения сходства (как функции частоты) двух сигналов вычисляем квадрат модуля когерентности (КМК) в виде

$$\text{КМК}(f) = |F_{xy}(f)|^2 \quad (4)$$

и фазовый спектр когерентности

$$\theta(f) = \text{arctg} \left[ \frac{\text{Im} \{ F_{xy}(f) \}}{\text{Re} \{ F_{xy}(f) \}} \right]. \quad (5)$$

Размер КМК (3) заключен между 0 (для частот, на которых отсутствует когерентность между каналами) и 1 (для частот, на которых каналы полностью когерентные). Фаза когерентности (4) характеризует отставание или опережение по фазе события в канале  $x$  относительно события в канале  $y$ . Этим методом проведен двухканальный анализ спектральной плотности мощности и установлены периоды когерентных вариаций.

На рис. 8 приведены графики функций когерентности. Причем наиболее значимые когерентные связи установлены между вариациями с периодами: 11,8 лет (рис. 8, а), 10,5 и 3,6 лет (рис. 8, б), 2,3 и 3,5 лет (рис. 8, в).

**Выводы.** 1. Проведенный анализ климатических характеристик на п-ове Крым

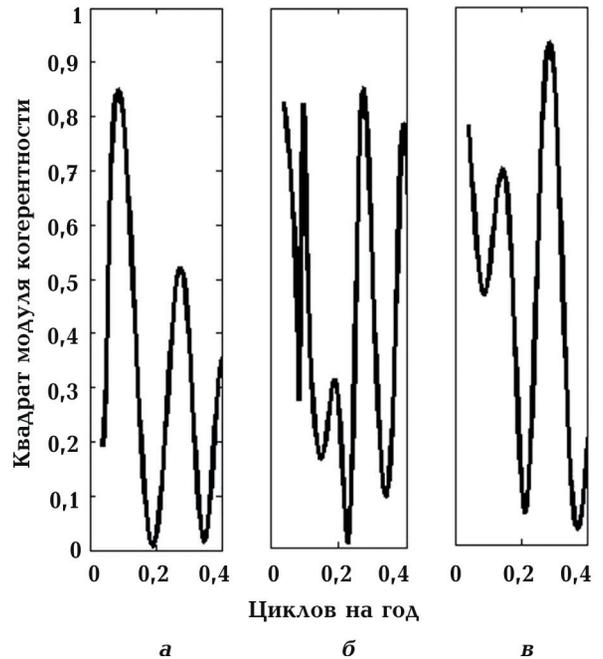


Рис. 8. Когерентность между вариациями в среднегодовых данных об инсоляции, падающей на поверхность Земли в п. Кара-Даг, и вариациями в среднегодовых данных: а — о длительности суток (LOD), б — о числах солнечных пятен (Вольфа), в — об индексах глобальной температуры.

обнаружил повышенную (по сравнению с другими пунктами Крыма) инсоляцию и прогрев поверхности Земли в п. Кара-Даг. Вопрос о причинах этого явления остается открытым и требует комплексного подхода к выявлению причин подобной аномалии.

2. В данных о среднесуточной общей инсоляции, падающей на поверхность Земли в п. Кара-Даг, обнаружены регулярные периодические колебания на интервале периодов  $\sim(87-402)$  сут., которые могут быть описаны гладкими периодическими функциями.

3. Анализ графиков на рис. 8 показывает различие тенденций изменения глобальной и локальной приземных температур воздуха в п. «Никитский сад». Для сравнения были использованы данные об аномалиях глобальной приземной температуры воздуха, основанные только на наземных наблюдениях (Global Surface Air Temperature Anomaly (C) based on land Station Data only), [http://data.giss.nasa.gov].

4. Установленные когерентные вариации

отражают реально существующую связь инсоляции, падающей на поверхность Зем-

ли, с вращением Земли, солнечной активностью и ростом глобальной температуры.

### Список литературы:

- Берри Б. Л. Синхронные процессы в оболочках Земли и их космические причины. Вестник МГУ. Сер. 5. 1991. № 1. С. 20—27.
- Марпл С. Л. мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва: Мир, 1990. 584 с.
- Сидоренков Н. С. Атмосферные процессы и вращение Земли. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2002. 200 с.
- Dickey, J. O., Marcus, S. L., & de Viron, O. (2011). Air Temperature and Anthropogenic Forcing: Insights from the Solid Earth. *Journal of Climate*, (24), 569—574. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3500.1>.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61—78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- Global Land — Ocean Temperature Index. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://data.giss.nasa.gov/>.
- IERS Data. (2015). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.iers.org>.
- NASA Surface meteorology and Solar Energy. Annual Monthly Averaged Earth Skin Temperature. (2015). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/>.
- NGDC Geomagnetic Calculators. (2015). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov>.

## Analysis of periodical variability of insolation and soil temperature in the Crimea

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

According to the 22-year-old series of climatology NASA Surface meteorology and Solar Energy, the results of the analysis of the temporal series of local changes in insolation and the temperature of the earth and ground air in the Crimea are carried out. A statistical analysis was carried out and a continuous time-frequency wavelet analysis revealed increased (compared to other Crimean points) insolation and heating of the earth's surface at Kara-Dag.

Using the time-and-frequency continuous wavelet analysis, six regular astronomical fluctuations, the periods of which are comparable with the periods of seasonal fluctuations, lunar and lunar-solar tidal waves, were found in the spectral structure of data on the average daily insolation incident on the horizontal surface of the earth at Kara-Dag. Periodic oscillations comparable with fluctuations in solar activity and the dynamics of rotation of the Earth-Moon system are described by sinusoidal functions, the parameters of which are determined from observations. In the data on the average daily total insolation falling on the surface of the earth at the Kara-Dag point, regular periodic fluctuations were found over an interval of periods of  $\sim(87—402)$  days. The most powerful harmonic oscillations are distinguished in the interval of periods  $\sim(231—452)$  days; in the time interval  $\sim(1995—2005)$  years, an increasing local increase in the vibrational energy is observed. An increase in the average annual average surface temperature in the Crimea in a southeastern direction has been recorded. In individual points, deviations from the general trend are observed, which may be associated with local geological processes. The greatest warming

of the earth's surface is observed at Kara-Dag, which corresponds to increased general insolation at this point.

Using the method of calculating the functions of the mutual (two-channel) power spectral density, we established mutual correlations between the time sequences of observations of local changes in insolation and changes in the length of the day, the number of sunspots, and global temperature indices.

**Key words:** solar insolation, temperature of the Earth's surface, wavelet-analysis, coherent oscillations, model.

### References

- Berry, B. L. (1991). Synchronous processes in the shells of the Earth and their cosmic causes. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 5, (1)*, 20—27 (in Russian).
- Marple, S. L. ml. (1990). *Digital spectral analysis and its applications*. Moscow: Mir, 584 p. (in Russian).
- Sidorenkov, N. S. (2002). Atmospheric processes and the rotation of the Earth. Sankt-Petersburg: Gidrometeoizdat, 200 p. (in Russian).
- Dickey, J. O., Marcus, S. L., & de Viron, O. (2011). Air Temperature and Anthropogenic Forcing: Insights from the Solid Earth. *Journal of Climate*, (24), 569—574. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3500.1>.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61—78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- Global Land — Ocean Temperature Index. Retrieved from <http://data.giss.nasa.gov/>.
- IERS Data. (2015). Retrieved from <http://www.iers.org>.
- NASA Surface meteorology and Solar Energy. Annual Monthly Averaged Earth Skin Temperature. (2015). Retrieved from <https://eosweb.larc.nasa.gov/>.
- NGDC Geomagnetic Calculators. (2015). Retrieved from <http://www.ngdc.noaa.gov>.