

УДК 523.31-1/-8

## **Сопоставление наземных и спутниковых измерений приземной температуры воздуха с точки зрения наук об экзопланетах**

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

<sup>1</sup> *Отдел радиоастрономии и геодинамики,  
Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация  
volvach@bk.ru*

Получено: 22 сентября 2020 г.

Отрецензировано: 25 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 25 сентября 2020 г.

**Аннотация:** Для понимания влияния активности звезд на (экзо-) планетные системы мы можем рассматривать Солнце и планетную систему в качестве наиболее близкой и наиболее изученной космической лаборатории и исследовать солнечно-планетные связи в ней. В статье обсуждаются результаты анализа измерений среднегодовой приземной температуры воздуха на интервале 1980—2017 гг. Сопоставление данных показало, что расхождения в наземных и космических измерениях приземной температуры воздуха до 1990 г. не превышают погрешности данных ( $s = \pm 0,7$  °C). После 1990 г. наблюдаются наиболее значимые кратковременные расхождения в 2014 г. ( $-1.12$  °C) и 2016 г. ( $1.33$  °C).

**Ключевые слова:** космические измерения; наземные измерения; среднегодовая температура Земли.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Вольвач А. Е., Курбасова Г. С., Вольвач Л. Н. Сопоставление наземных и спутниковых измерений приземной температуры воздуха с точки зрения наук об экзопланетах // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 139—148.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Вольвач, А. Е. Сопоставление наземных и спутниковых измерений приземной температуры воздуха с точки зрения наук об экзопланетах / А. Е. Вольвач, Г. С. Курбасова, Л. Н. Вольвач // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 139—148.

# Comparison of ground-based and satellite measurements of surface air temperature from the point of view of exoplanet sciences

A. E. Volvach<sup>1</sup>, G. S. Kurbasova<sup>1</sup>, and L. N. Volvach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory, Yalta, 298688, Russian Federation  
volvach@bk.ru

Received: September 22, 2020

Peer-reviewed: September 25, 2020

Accepted: September 25, 2020

**Abstract:** To understand the influence of stellar activity on (exo) planetary systems, we can consider the Sun and the planetary system as the closest and most studied space laboratory and investigate the solar-planetary relationships in it. The paper discusses the results of the analysis of measurements of the mean annual surface air temperature in the interval 1980–2017. Comparison of the data showed that the discrepancies in ground-based and space-based measurements of surface air temperature before 1990 do not exceed the data error ( $s=\pm 0.7$  °C). After 1990, the most significant short-term discrepancies are observed in 2014 ( $-1.12$  °C) and 2016 ( $1.33$  °C).

**Keywords:** space measurements; ground measurements; the average annual temperature of the Earth.

**For citation (IEEE):** A. E. Volvach, G. S. Kurbasova, L. N. Volvach, “Comparison of ground-based and satellite measurements of surface air temperature from the point of view of exoplanet sciences,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 139–148.

## 1. Введение

Свойства локальной окружающей среды экзопланеты во многом определяются ее родительской звездой. Отсюда следуют такие хорошо известные характеристики, как равновесная температура экзопланеты, в свою очередь, определяющая зону потенциальной обитаемости планетной системы.

Для понимания влияния активности звезд на (экзо-) планетные системы мы можем рассматривать Солнце и планетную систему в качестве наиболее близкой и наиболее изученной космической лаборатории и исследовать солнечно-планетные связи в ней.

В то же время, в практическом плане прогнозы и сценарии поведения климата Земли в будущем имеют большое прикладное значение, в том числе и в связи с проблемой глобального потепления.

Основными целями исследований является исследование связи солнечной активности и климата Земли. Главным источником изменений климата является Солнце: от угла падения солнечных лучей на Землю зависит изменение климата на планете. При этом наблюдаются кратковременные вариации параметров климата, такие как чередование времен года и даже изменение температуры в течение дня. Вся жизнь на Земле и ее будущие условия непосредственно зависят от интенсивности поступающего интегрального потока излучаемой Солнцем энергии — так называемой астрономической солнечной постоянной. Солнце своей деятельностью задает временные масштабы практически всех физических процессов в системе Солнце — Земля. Интенсивность излучаемого Солнцем потока энергии динамично определяет климат Земли [1].

По вопросам изменения климатических параметров на Земле в настоящее время существует большой объем публикаций, в которых обсуждаются альтернативные предположения о развивающемся процессе потепления, уточняется физическая основа изменения климата, роль астрономических факторов в этом процессе. Авторами настоящей статьи ранее исследовались изменения инсоляции и температуры в различных пунктах Крыма: обнаружены и установлены когерентные колебания между отдельными вариациями в данных об инсоляции и температуры приземного воздуха, параметрами магнитного поля, параметрами вращения Земли и солнечными циклами [2, 3, 4].

Изменения климата происходят постепенно, на протяжении тысячелетий и сопровождается циклическими колебаниями температуры на отдельных интервалах, интенсивность которых возрастает с проявлением экстремальной эндогенной и экзогенной активности в системе Земля [5, 6, 7, 8, 9]. В настоящее время не существует строгой теории генерации и взаимодействия циклов в Солнечной системе. В то же время, солнечные циклы влияют на энергетические изменения в глобальных гелио-геодинамических циклах [10, 11].

## **2. Измерения приземной температуры воздуха**

На основе среднемесячных данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации вычислены среднегодовые величины приземной температуры воздуха с 1981 по 2017 годы в пункте Краснодар [12]. Дискретные статистики ненорми-

рованного белого шума в этих данных определены параметрами: среднее  $\bar{x} = 0.02^\circ\text{C}$ , стандартное отклонение случайной составляющей  $s = \pm 0.7^\circ\text{C}$ .

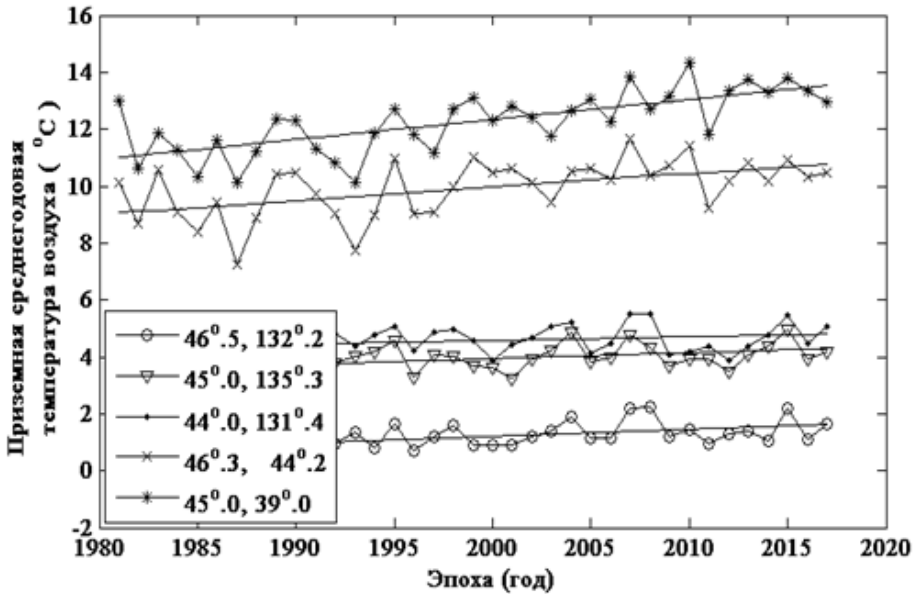


Рис. 1. Графики среднегодовой приземной температуры на 5 станциях России. Для каждой станции приведены графики исходных данных и линейных трендов, величины широт и долгот.

Fig. 1. Graphs of the average annual surface temperature at 5 stations in Russia. For each station, graphs of initial data and linear trends, values of latitudes and longitudes are shown

Космические измерения приземных температур воздуха в виде месячных и усредненных по годам величин получены в рамках программы исследований в области наук о Земле POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) [13].

Графики на рисунке 1 демонстрируют наземные измерения и тренды среднегодовой температуры в 5 пунктах России [10]. Как следует из рисунка 1, смещение в западном направлении по одной и той же параллели приводит к существенному росту температуры.

### 3. Сопоставление и анализ наземных и космических данных

Приведенные на рисунке 2 графики (а, б) наземных и космических наблюдений приземной среднегодовой температуры воздуха на станции Краснодар демонстрируют хорошую сходимость этих двух методов изме-

рений. График линейного тренда (рис. 2b) имеет не существенный наклон. Его математическое описание имеет вид

$$ftr(x) = p1 \cdot x + p2, \quad (1)$$

где коэффициенты (с 95 % доверительными интервалами — диапазоном значений, внутри которого с вероятностью 95 % лежат значения коэффициентов) в единицах °C равны:

$$\left. \begin{aligned} p1 &= 0.00496 (-0.004489, 0.01441), \\ p2 &= 0.4319 (0.2259, 0.6378). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Присутствие в последовательности измерений приземной температуры воздуха резких импульсов (а они, как правило, непредсказуемы и связаны с экстремальными событиями на Земле, Солнце и в Космосе) важно выявить их величину на фоне гладкого процесса изменения температуры.

В нашем анализе нелинейная тенденция изменения приземной температуры воздуха получена с помощью вейвлет преобразования данных. Метод вейвлет-анализа незаменим в случае нерегулярных изменений пространственно-временных параметров анализируемого процесса и наличия в преобразуемых данных импульсов.

Земля непрерывно получает от Солнца почти неизменный поток энергии, обеспечивающий наблюдаемый уровень освещенности и среднюю температуру ее поверхности. Однако количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, распределяется неравномерно и зависит, прежде всего, от положения Земли на орбите, скорости ее вращения, локальных и региональных условий [14]. Колебания земных условий существенно зависят от солнечной активности [15].

Под активностью Солнца, прежде всего, понимают рост числа солнечных пятен и сопровождающие его процессы. В цепочке солнечно-земных взаимодействий влияние солнечной активности на внешние и внутриземные процессы проявляется в событиях, период повторения которых составляет в среднем 11 лет. На результат воздействия солнечной активности влияют региональные и локальные условия [16].

Колебания среднегодовой температуры приземного воздуха носят импульсный характер. Такого вида нестационарные процессы требуют пространственно-временного анализа. В этом случае сглаживание по 5 годам методом скользящего среднего, принятое в практике анализа подобных природных рядов наблюдений, сглаживает кратковременные скачки температуры и смещает их локализацию во времени (см. рис. 3).

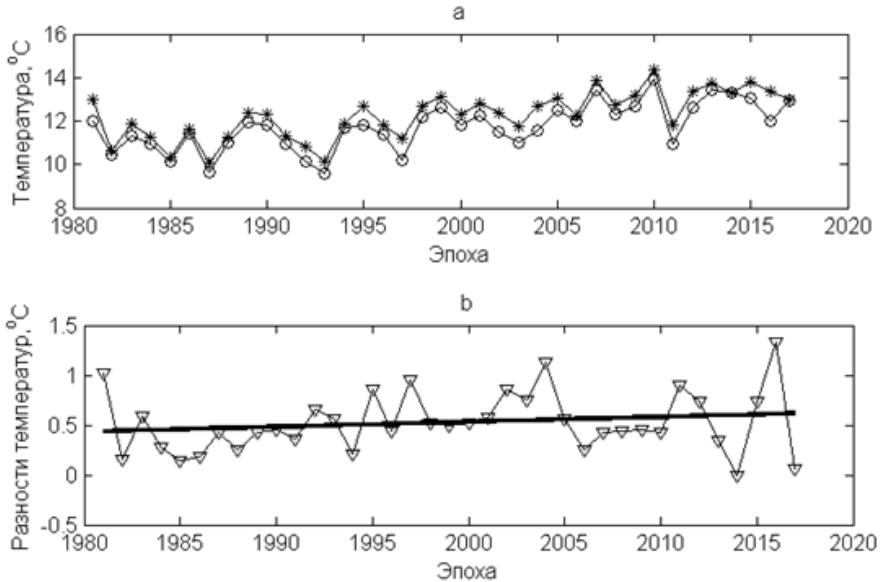


Рис. 2. Сопоставление наземных и космических наблюдений приземной среднегодовой температуры воздуха на станции Краснодар: а — графики наземных измерений (звездочки) и космических измерений (кружки); б — графики разностей между наземными и космическими измерениями приземной температуры (треугольники) и линейного тренда (непрерывная линия).

Fig. 2. Comparison of ground-based and space-based observations of the surface average annual air temperature at Krasnodar station: a – graphs of ground measurements (asterisks) and space measurements (circles); b – plots of differences between ground-based and space-based measurements of surface temperature (triangles) and a linear trend (continuous line)

Сопоставление наземных и космических измерений, создание численных моделей и изучение тенденций в изменениях локальной температуры способствует созданию прогноза ее изменения на ближайшие годы. Этот прогноз может отличаться от глобального, но может быть более достоверным и полезным для данного пункта. Для построения численных моделей изменения параметров климата в отдельно взятом пункте необходимы как наземные, так и космические наблюдения.

Построим численную модель долгопериодического тренда (рис. 3) в виде суммы трех гармоник ряда Фурье. Математическое описание этой модели соответствует наилучшим оценкам качества приближения нелинейного тренда и имеет вид

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^3 (a_i \cos(ivx) + b_i \sin(ivx)), \quad (3)$$

где  $x$  — временной интервал, отсчитываемый в годах от начала моделируемого временного ряда;  $i$  — номер гармоники.

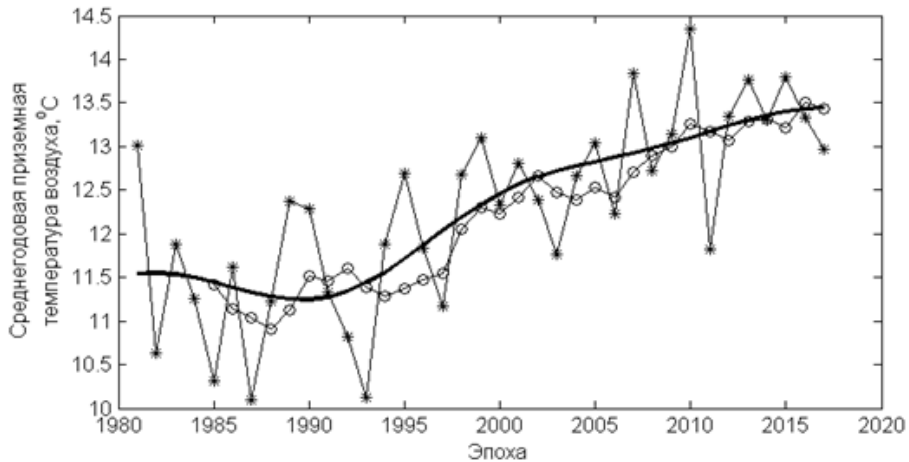


Рис. 3. Графики данных о приземной среднегодовой температуре воздуха на станции Краснодар: исходные наземные наблюдения (отмечены звездочками); сглаженные методом скользящего среднего на 5-летних интервалах величины (отмечены кружками); сплошная кривая — гладкий нелинейный тренд, получен с помощью вейвлет преобразования исходных данных.

Fig. 3. Graphs of data on the surface mean annual air temperature at Krasnodar station: initial ground observations (marked with asterisks); values smoothed by the moving average method on 5-year intervals (marked with circles); solid curve – smooth nonlinear trend, obtained using the wavelet transform of the original data

Коэффициенты (с 95 % доверительными интервалами), вычисленные по наземным наблюдениям в единицах °С, равны:

$$\left. \begin{aligned}
 a_0 &= 12.04 \text{ (11.83, 12.26)}, \\
 a_1 &= -1.108 \text{ (-1.289, -0.9273)}, \\
 b_1 &= -0.06834 \text{ (-0.5709, 0.4342)}, \\
 a_2 &= 0.2561 \text{ (-0.01327, 0.5254)}, \\
 b_2 &= 0.2986 \text{ (0.1702, 0.427)}, \\
 a_3 &= 0.3104 \text{ (0.2164, 0.4044)}, \\
 b_3 &= 0.001608 \text{ (-0.138, 0.1413)}, \\
 \nu &= 0.1044 \text{ (0.09735, 0.1114)},
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $a_0$  — постоянный член;  $\nu$  — частота главной гармоники, соответствует периоду 60,18 лет. Оценки точности приближения нелинейного

тренда этой моделью:  $R$  квадрат равен 1; среднеквадратическая погрешность ( $RMSE$ ) равна  $\pm 6.358 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Аналогичная численная модель получена по данным о космических измерениях среднегодовых температур на станции Краснодар.

## 5. Заключение

1. Для понимания влияния активности звезд на (экзо-) планетные системы мы можем рассматривать Солнце и планетную систему в качестве наиболее близкой и наиболее изученной космической лаборатории и в ней исследовать солнечно-планетные связи.

2. Временное осреднение в анализе наблюдений позволяет выделить долговременные колебания, игнорируя влияние кратковременных вариаций и единичных выбросов, которые могут быть рассмотрены отдельно и предсказание которых часто невозможно из-за недостатка знаний о порождающих их явлениях.

3. Анализ отклонений измеренных приземных температур воздуха от модели не обнаруживает долговременной систематической компоненты.

4. Анализ прогноза приземной среднегодовой температуры указывает на постепенное снижение среднегодовой приземной температуры воздуха даже при наличии кратковременных скачков.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта 13.1902.21.0039 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции вне-солнечных планетных систем их характеристик экзопланет» (А.Е.В., Л.Н.В.).

## Список литературы

1. Абдусаматов Х. И. Солнце определяет климат Земли. СПб. : Логос, 2009. 197 с.
2. Дайсон Ф. Публичная лекция фонда «Династия», 23 марта 2009 года / Москва, ФИАН ; Институт перспективных исследований, Принстон, Нью-Джерси, США. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elementy.ru/lib/430801> (дата обращения: 20.08.2020).
3. Кокорин А. О. Изменение климата : обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М. : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 80 с.
4. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Геомагнитное поле и климат Кара-Дага : когерентные колебания // Естественные и математические науки в современном мире. 2015. №3 (27). С. 84—90.



5. Ефанов В. А., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С. Обзор внегалактических радиоисточников на длине волны 1,35 см // Изв. Крым. астрофиз. Обсерватории. 1979. Т. 60. С. 3—13.
6. Баренбаум А. А. Мегацикличность геологических процессов и эволюция Галактики. В кн. : Циклы природных процессов, опасных явлений и экологическое прогнозирование. Вып. 1 / Ред. С. Л. Афанасьев, Б. Л. Бери, О. Л. Кузнецов. М. : Ассоциация «Прогнозы и циклы», 1991. С. 27—43.
7. Белов С. В., Шестопалов И. П., Харин Е. П. О взаимосвязях эндогенной активности земли с солнечной и геомагнитной активностью // ДАН. 2009. Т. 428, № 1. С. 104—108.
8. Берри Б. Л. Синхронные процессы в оболочках Земли и их космические причины // Вестник МГУ. 1991. Сер. 5, № 1. С. 20—27.
9. Борисенков Е. П., Пасецкий В. М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М. : Мысль, 1988. 522 с.
10. Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. М. : Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 1996. 188 с.
11. Авсюк Ю. Н. Глобальные изменения среды и климата в сопоставлении с приливной моделью эволюции системы Земля — Луна // В кн. Геофизика на рубеже веков. М. : ГЕОС, 1999. С. 93—106.
12. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2014621485. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (дата обращения: 22.08.2020).
13. Stackhouse P. W. et al. POWER Release 8 (with GIS Applications) Methodology [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/391325308/POWER-Data-v8-Methodology> (дата обращения: 24.08.2020).
14. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Сезонные колебания в наблюдениях параметров солнечной энергии и деформаций земли в Крыму // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 3. С. 253—265.
15. Вольвач А. Е., Якубовская И. В. Исследование солнечной активности радиотелескопами Службы Солнца KRIM // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 3. С. 266—274.
16. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Геомагнитное поле Крыма : изменения отдельных компонентов за период 1900—2014 гг. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 4. С. 331—340.

### Информация об авторах

**Вольвач Лариса Николаевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

**Вольвач Александр Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

**Курбасова Галина Сергеевна**, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией геодинамики ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

### Information about the authors

**Larisa N. Volvach**, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

**Alexandr E. Volvach**, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

**Galina S. Kurbasova**, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.