

УДК 550.3

ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ: АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И СОЛНЕЧНЫХ СЕРИЙ

© 2023 г. Г. С. Курбасова¹, А. Е. Вольвач¹, *, Л. Н. Вольвач¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Кацивели, Крым, Россия

*volvach@bk.ru

Поступила в редакцию 17.02.2022 г.

После доработки 30.01.2023 г.

Принята к публикации 14.03.2023 г.

Рассмотрен круг вопросов, посвященных результатам анализа некоторых метеорологических и солнечных рядов спутниковых наблюдений в местности Кара-Даг (Крым). Представлена качественная и количественная картина изменения общей инсоляции, падающей на поверхность земли, температуры воздуха на высоте 2 м и температуры поверхности земли в Кара-Даге за последние 38 лет. Построена численная модель, позволяющая прогнозировать в анализируемых данных наиболее мощное колебание с периодом в один год. В работе использовались: метод вейвлет анализа, статистические методы выделения гауссовского и не гауссовского шумов, итерационный метод построения и оценок точности приближения моделей. Когерентные вариации в анализируемых и некоторых глобальных геодинимических и солнечных временных рядах были установлены при помощи двухканального авторегрессионного анализа. Качественная характеристика процесса изменения основных вариаций в анализируемых временных рядах получена с использованием анализа фазовых траекторий на плоскости Пуанкаре.

DOI: 10.31857/S0023420623700097, EDN: UMRXAA

ВВЕДЕНИЕ

Планета Земля (от внутреннего ядра до твердой оболочки), ее магнитосфера, атмосфера, гидросфера и биосфера составляют единую систему, в которой происходит круговорот энергии и вещества, вызванный солнечной радиацией. Перераспределение энергии в этой системе и пространственно-временные закономерности этого процесса изучены в настоящее время далеко не полностью. В частности, это относится к взаимосвязям и процессу перераспределения энергии вследствие сейсмической и вулканической активности Земли.

В.Е. Хаин и Э.Н. Халилов в своей монографии о пространственно-временной закономерности сейсмической и вулканической активности Земли отмечают следующее: “Вулканизм и сейсмичность, тектонические вертикальные и горизонтальные движения литосферы и ее составляющих, глубинное строение и энергетическое состояние земной коры, формирование и размещение месторождений полезных ископаемых, динамика флюидов и т.д., являются различными элементами общей системы, теснейшим образом взаимосвязанными между собой, а

также с процессами в гидросфере, атмосфере и космосе” [1].

Вращение Земли вокруг своей оси, ее движение в Солнечной системе, кроме известных гравитационных взаимодействий, подвергается влиянию ротационных факторов, связанных с другими, часто малоизученными, механизмами движения веществ, расположенных как внутри Земли, так и за ее пределами. К таким процессам относятся, например, плюмы — восходящие мантийные струи, выступающие на поверхность в “горячих точках” поверхности Земли. Плюмы ответственны за бурные вулканические процессы, которые приводят к обширным извержениям [2]. И хотя в проблеме плюмов остается много неясного, их роль в транспортировке энергии в “горячих точках” доказана [2]. Кроме того, в теории тектоники литосферных плит в качестве одного из движущих механизмов энергетических обменных процессов указывается мантийная конвекция.

Тепловая составляющая, несомненно, играет если не исключительную, то ведущую роль, и это подтверждается успешным компьютерным моделированием кинематики плит [3, 4]. Восходящие мантийные струйные потоки и тепловая конвекция наряду с другими факторами участву-

ют в долговременном процессе формирования геологической структуры и климата в локальных точках Земли.

Крымский полуостров находится недалеко от границы Евразийской литосферной плиты, деформации и движения которой на длительном интервале времени оказывали и оказывают непосредственное влияние на активизацию внутриземных процессов (землетрясения, вулканы, сели), на формирование локальных геофизических и климатических характеристик Крыма.

История возникновения полуострова Крым, как и прогнозирование его эволюции в будущем, составляет предмет научных гипотез и не обоснованных фактическими данными предположений. В то же время структура и расположение горных массивов может служить свидетельством о прошлом Крыма. Известный исследователь Крыма П. Паллас писал в 1795 г.: “Взирая на эту бесконечную цепь бесчисленных слоев, лежащую один подле другого, и по большей части косою чашею наклоненных к юго-востоку, или к югу, то есть к своему обрезу, или к утесам, можно из этого сделать двоякое заключение: или что эта цепь гор опустилась в морскую бездну; или, что вся эта громада слоев поднята выше моря чрезвычайною какою-нибудь силою, действующею на величайшей глубине” [5].

На полуострове Крым, одной из сейсмически активных зон Земли, есть несколько потухших вулканов. Один из них, наиболее опасный по экологическим последствиям, носит название Кара-Даг. В настоящее время не существует методов предсказания его “пробуждения”. Однако существует ряд косвенных признаков, указывающих на вероятность активизации землетрясений и вулканов. К ним относятся экстремальные события на Солнце, динамика вращения Земли, активизация течения жидких масс внутри Земли, события в атмосфере и магнитосфере. Нарушение теплового баланса, необъяснимый с точки зрения периодически протекающих процессов локальный приток энергии в поверхности земли, служит сигналом нестабильности экологической обстановки.

Обнаруженное нами ранее [6, 7] повышенное по сравнению с другими районами Крыма прогревание поверхности и рост общей инсоляции, падающей на поверхность Земли в местности Кара-Даг, требуют в связи с возможными экологическими последствиями тщательного анализа временных рядов наблюдений этого явления. В публикациях [8–11] нами обсуждались результаты анализа коротких временных рядов спутниковых измерений — локальных параметров тем-

пературы и общей инсоляции в различных районах Крыма (до 2005 г.). В последнее время появилась возможность использовать длинные временные ряды космических измерений (параметры температуры поверхности земли, температуры воздуха на высоте двух метров и общей инсоляции падающей на поверхность земли в Кара-Даге) для анализа среднегодовых данных за период с 1983 по 2019 гг. и ежедневных (суточных) за период с 1.I.1982 по 13.V.2019. Результаты анализа этих временных рядов обсуждаются в настоящей работе.

С учетом предположения, что прогнозируемые изменения метеорологических и солнечных данных в Кара-Даге могут быть описаны периодическими функциями, нами построены численные модели колебаний с периодом один год.

ИСТОЧНИКИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В рамках программы в области наук о Земле НАСА уже давно поддерживает спутниковые системы и исследования, предоставляя научному сообществу данные, важные для изучения климата и климатических процессов. Эти данные включают долгосрочные усредненные климатические оценки метеорологических величин и поверхностных потоков солнечной энергии. В настоящее время функционирует проект прогноза энергетических ресурсов во всем мире (Prediction of Worldwide Energy Resource Project, POWER), в рамках которого создана база данных, объединяющая более 200 параметров наземной метеорологии и солнечной энергии.

С июня 2018 г. новый проект POWER включает улучшенные солнечные и метеорологические данные со всеми параметрами, доступными на глобальной сетке 0.5° широты и 0.5° долготы. Для анализа нами использовались следующие временные ряды параметров поверхностной и солнечной энергии (Sfuresces and Solar Energy, SSE): общая инсоляция, падающая на поверхность земли (All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface, ALLSI), температура поверхности земли (Earth Skin Temperature, TS), температура воздуха на высоте 2 м (Temperature at 2 Meters, T2M). Длительность непрерывных рядов составляет: суточные на интервале с 1.I.1982 по 15.V.2019 и среднегодовые на интервале с 1983 по 2017 гг. [<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse>]. Сокращения TS, T2M, ALLSI введены для обозначения анализируемых временных рядов.

Точность спутниковых измерений NASA оценивалась с помощью многочисленных наземных измерений. Хотя надежность наземных измере-

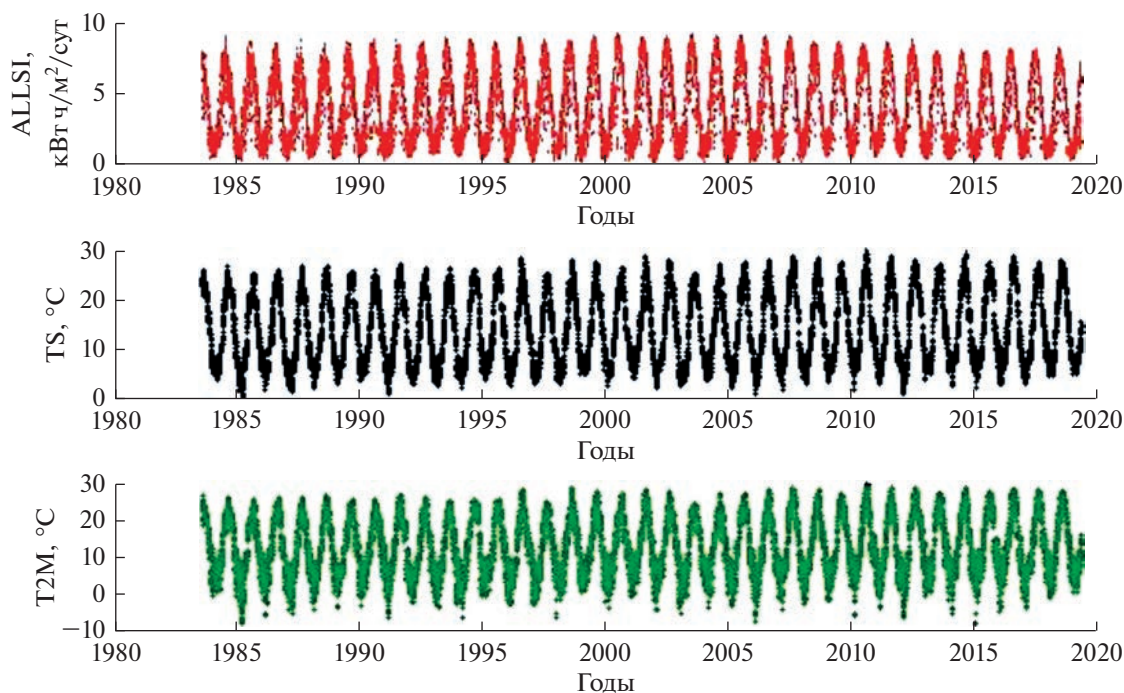


Рис. 1. Серии данных ALLSI, TS, T2M. Единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

ний сама по себе не всегда достаточно точна, по оценкам NASA среднеквадратическая ошибка ежемесячных значений составляет около 8–10%, а средняя ошибка отклонений от наземных наблюдений лежит между -2 и $+0.7\%$ [<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse>].

Для двухканального авторегрессионного анализа использовались среднегодовые данные о длительности суток (Length of Day, LOD) [<https://www.sidc.be/silso/datafiles>], о солнечной активности [<http://www.sidc.be/silso/datafiles>]; об индексах глобальной температуры [<http://data.giss.nasa.gov>].

На рис. 1 приведены графики анализируемых серий TS, T2M, ALLSI.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Метод вейвлет-анализа. Вейвлет-анализ представляет собой новый метод, несмотря на то, что математические корни его заложены в работах Жозефа Фурье в девятнадцатом веке. Одним из первых обратил внимание на недостаточную информативность Фурье-анализа Хаар и в 1910 г. опубликовал систему базисных функций, обладающую основными свойствами вейвлетов [12].

Вейвлет-преобразование предоставило возможность анализировать свойства сигнала одновременно в физическом (время, координата) и частотном пространстве и может быть использо-

вано для анализа временных серий, содержащих *нестационарную мощность* на многих различных частотах [13, 14].

Вейвлет-анализ, разбивая временной ряд на время–частоту–пространство, позволяет определить доминирующие режимы изменчивости и информацию о том, как эти режимы изменяются во времени. В настоящее время вейвлет-преобразование используется во многих исследованиях в области геофизики, астрономии, космологии и других.

Последовательности наблюдений природных параметров, в том числе и анализируемые в настоящей статье, имеют сложные частотно-временные характеристики. Как правило, они состоят из близких по времени, кратковременных высокочастотных компонентов и долговременных, близких по частоте низкочастотных компонентов. Присущая природным временным рядам изменчивость локализации частот не может быть обнаружена обычным методом преобразования Фурье.

Одним из способов анализа для извлечения из сигнала информации о локальной частоте служит оконное преобразование Фурье. В этом методе преобразование Фурье выполняется на скользящем отрезке временного ряда длины T , (сегменте) с временным шагом δt и общей длиной $N\delta t$. Та-

ким образом, преобразуется частота T^{-1} в частоту $(2\delta t)^{-1}$ на каждом временном шаге. Временная длительность сегментов — часть временного ряда, в которой определяется оконная функция того или иного типа (например, окно Чебышева, окно Гаусса и др.), в процессе преобразования данных не изменяется. Оконное преобразование Фурье представляет неточный и неэффективный метод частотно-временной локализации, поскольку он при анализе устанавливает фиксированную шкалу или “интервал ответа” T . Неточность возникает от наложения высоко- и низкочастотных составляющих, не попадающих в окно частотного диапазона. Неэффективность связана с частотами $T/(2\delta t)$, которые необходимо анализировать на каждом временном шаге независимо от размера окна или присутствующих доминирующих частот. Кроме того, для определения наиболее подходящего выбора обычно анализируются окна различных длин. Для анализов, в которых предопределенное масштабирование может быть неприемлемым из-за широкого диапазона доминирующих частот, следует использовать независимую от масштаба локализацию, такую, как вейвлет-анализ.

Основой анализа Фурье являются синусоиды, которые не имеют ограниченной длительности и простираются от минус до плюс бесконечности. В анализе Фурье синусоиды гладкие и предсказуемые, в то время как вейвлеты имеют тенденцию быть нерегулярными и асимметричными, что позволяет изучать локальные особенности сигнала. Вейвлет — это волна эффективно ограниченной продолжительности, имеющая среднее значение, равное нулю. Анализ Фурье состоит в разбиении сигнала на синусоидальные волны различных частот. Точно так же вейвлет-анализ представляет собой разбиение сигнала на сдвинутые и масштабированные версии исходного (или материнского) вейвлета.

Вейвлет-анализ способен выявить аспекты данных, которые упускают другие методы анализа сигналов, — тренды, разрывы в высших производных.

Определение непрерывного вейвлет-преобразования. В преобразовании Фурье анализирующими функциями являются комплексные экспоненты. Результирующее преобразование является функцией одной переменной ω . В оконном преобразовании Фурье анализирующие функции представляют собой оконные комплексные экспоненты, а результат — функция двух переменных. В непрерывном вейвлет-преобразовании анализирующей функцией является вейвлет ψ .

Вейвлет-преобразование сравнивает сигнал со сдвинутыми и сжатыми или растянутыми версиями вейвлета. Растяжение или сжатие функции в совокупности называется расширением или масштабированием и соответствует физическому понятию масштаба. Сравнивая сигнал с вейвлетом в различных масштабах и положениях, можно получить функцию двух переменных.

В вейвлет-преобразовании гармоническое колебание заменяется вейвлет-функцией, которая адаптируется к анализируемому сигналу, смещая его по оси времени и масштабируя по оси частот. Это позволяет локализовать во времени нестабильный квазигармонический сигнал в анализируемом наборе данных [9, 13, 14].

Используемое в настоящей работе непрерывное вейвлет-преобразование строится с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов вейвлета $\psi(t)$ с произвольными значениями масштабного коэффициента $a > 0$ и параметра сдвига b .

Уравнение непрерывного вейвлет-преобразования имеет вид [14]:

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

где a — параметр масштаба (шкала); b — временная переменная в обратном преобразовании Фурье; $\psi(t)$ — вейвлет; ω — частота. Символ $*$ обозначает операцию комплексного сопряжения.

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

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

Чтобы получить *непрерывное вейвлет-преобразование* сигнала, необходимо вычислить свертку для каждого значения параметра сдвига b и повторить этот процесс для каждой шкалы a .

Одним из критических замечаний по поводу вейвлет-анализа является произвольный выбор вейвлет-функции $\psi_0(\eta)$ (следует отметить, что такой же произвольный выбор делается при использовании традиционных преобразований, таких как преобразование Фурье, Бесселя, Лежандра и др.) При выборе вейвлет-функции необходимо учитывать несколько факторов (подробнее см. в статье [15]). Эти факторы нами учитывались в настоящей работе при выборе вейвлет-функций на различных этапах вейвлет-анализа.

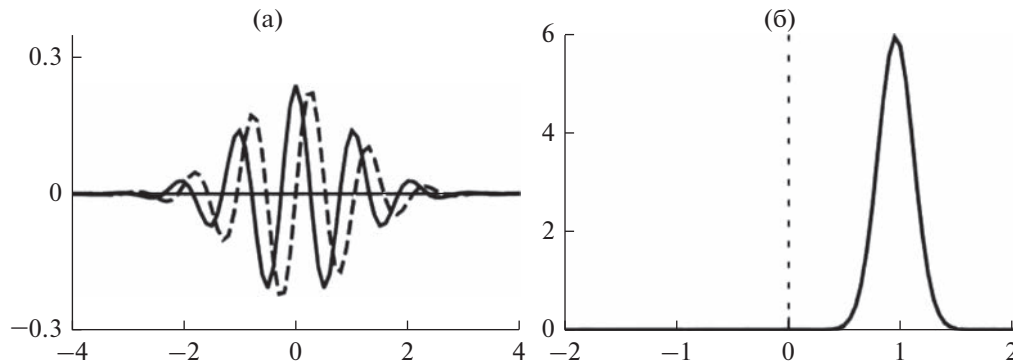


Рис. 2. Вейвлет Морле: график для вейвлета $\psi(t/s)$ во временной области слева представляет действительную часть (сплошная линия) и мнимую часть (штриховая линия); график справа представляет вейвлет $\Psi(s\omega)$ в частотной области. Для построения вейвлета масштаб выбран равным $s = 10\delta t$.

В частности, для решения задачи шумоподавления нами использовались вейвлеты из семейства “Вейвлеты Хаар” (сокращение “haar”), приспособленные для преобразования данных с резкими выбросами (рывками). Математические характеристики этих вейвлетов включают ортогональность, биортогональность, симметричность, нерегулярность [13].

Сглаживание последовательностей данных выполнено с помощью вейвлетов из семейства “Вейвлеты Мейер” (сокращение “dmeu”) [16]. Преимущество сглаживания с помощью вейвлета Мейер состоит в использовании вспомогательной функции, варьируя коэффициенты в которой, получаем семейство разных вейвлетов. Этот вейвлет обеспечивает ортогональный анализ.

С целью вейвлет-анализа спектрального состава анализируемых в настоящей работе данных использовались вейвлеты из семейства “Вейвлеты Морле” (сокращение “morl”). Вейвлет “morl” представляет собой плоскую волну, модулированную гауссианой:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}, \quad (3)$$

где ω_0 — частота (безразмерный параметр); η — время (безразмерный параметр). Чтобы удовлетворить условию допустимости $\int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\psi}_0(\omega')|^2 d\omega' = 1$, функция, описывающая вейвлет (рис. 2) должна иметь нулевое среднее [10, 11]. В этом случае $\omega_0 = 6$. Вейвлет Морле показан на рис. 1.

Подавление шума. Базовая модель для зашумленного сигнала в основном имеет следующую форму:

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n), \quad (4)$$

где интервалы времени n равноотстоящие.

В простейшей модели предположим, что $e(n)$ является гауссовым белым шумом $N(0, 1)$, а уровень шума σ примем равным 1.

Цель подавления шума состоит в том, чтобы удалить шумовую часть сигнала s и восстановить f .

Эта часть работы выполнена нами с использованием программного обеспечения МАТЛАБ [17].

Процедура вейвлет шумоподавления состоит из трех этапов:

1. Разложение. Выбирается вейвлет и уровень N . Вычисляется вейвлет разложение сигнала s на уровне N .

2. Вычисляется пороговое значение коэффициентов детализации. Для каждого уровня от 1 до N выбирается порог и применяется мягкое пороговое значение к коэффициентам детализации.

3. Реконструкция. Вычисляется вейвлет-реконструкция на основе исходных коэффициентов аппроксимации уровня N и модифицированных коэффициентов детализации уровней от 1 до N .

Вектор коэффициентов детализации представляет собой суперпозицию коэффициентов f и коэффициентов e . Разложение e приводит к коэффициентам детализации, которое является стандартным гауссовым белым шумом.

Коэффициенты детализации CD1 (наиболее точная шкала) по существу являются шумовыми коэффициентами со стандартным отклонением, равным σ . Среднее абсолютное отклонение коэффициентов является надежной оценкой σ . Если существует подозрение о наличии небелого шума e , пороговые значения должны быть масштабированы путем оценки уровня шума в зависимости от уровня. Степень отклонения от белого шума обнаруживается при сравнении дискретных статистик, гистограмм, графиков корреляции и графиков преобразования Фурье.

Метод двухканального авторегрессионного анализа. Это метод спектрального оценивания – метод аппроксимации данных той или иной принятой статистической моделью. В тех случаях, когда объем данных достаточно велик, классические спектральные оценки будут наиболее структурно устойчивыми. При этом единственное допущение, которое для них требуется – анализируемые данные должны быть стационарными в широком смысле. Интервал используемых нами для анализа временных рядов (38 лет) представляет собой ограниченную часть полной временной последовательности данных. Это привело к необходимости использовать альтернативные методы и модели в предположении, что короткие сегменты данных, получаемые на практике из более длинной записи данных, можно считать локально стационарными. Попытки свести эту задачу к более легкой и практически решаемой привели к использованию различных моделей СПМ (спектральной плотности мощности), алгоритмы и программы которых приведены в современном учебном пособии [18, 19]. Типичным является класс моделей временных рядов, которые дают рациональные функции СПМ (АР – авторегрессионная, СС – скользящего среднего и АРСС – моделирование синусоид в белом шуме). Эти модели определяются некоторым конечным небольшим набором коэффициентов. В результате получаются менее смещенные спектральные оценки с более высоким разрешением.

К преимуществам этой модели относится тот факт, что авторегрессионные спектры имеют острые пики, что, как правило, связано с высоким разрешением. Кроме того, оценки АР-параметров можно получить в результате решения линейных уравнений. Основные характеристики выбранных нами моделей: класс оценок – параметрические; название модели – авторегрессионная (АР); методы – Yule–Walker или Berg; квадратичная форма спектра (определения вектора и матрицы приведены в работах [18, 19]); порядок АР-модели служит для управления соотношением между разрешением и дисперсией.

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 [18]:

$$P_{xy}(f) = T \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} r_{xy}[k] \exp(-j2\pi f k T), \quad (5)$$

$$F_{xy}(f) = P_{xy}(f) / \sqrt{P_{xx}(f)} \sqrt{P_{yy}(f)}, \quad (6)$$

где x, y – одноканальные процессы; f – частота; T – интервал времени.

Учитывая (5) для измерения сходства (как функции частоты) двух сигналов, вычисляем квадрат модуля когерентности (КМК)

$$\text{КМК}(f) = |F_{xy}(f)|^2 \quad (7)$$

и фазовый спектр когерентности

$$\theta(f) = \arctg[\text{Im}\{F_{xy}(f)\} / \text{Re}\{F_{xy}(f)\}]. \quad (8)$$

Размер КМК (7) заключен между 0 (для частот, на которых отсутствует согласованность между каналами) и 1 (для частот, на которых каналы полностью когерентные). Фаза когерентности (8) характеризует отставание или опережение по фазе события в канале x по отношению к событию в канале y .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические оценки шума. В результате статистического анализа нами получены графические и численные оценки гауссового и не гауссового шумов.

Гауссов шум – это статистический шум, имеющий плотность вероятности, равную плотности вероятности нормального распределения, также известного как распределение Гаусса. Плотность вероятности p_G гауссовой случайной величины z равна

$$p_G(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

где μ – среднее значение; σ – стандартное отклонение. В случае стандартного нормального распределения $\mu = 0$ и $\sigma = 1$.

Выбор оптимального разложения на систематическую и шумовую компоненту возможен, если сигнал представляет собой сумму полезного сигнала и гауссового шума, что соответствует модели (4).

Так как мы анализируем длительные природные ряды с заведомо неизвестной статистикой, к тому же, параметры которой на длительном интервале времени могут изменяться, обосновано применение метода вейвлет-преобразования, позволяющего анализировать в пространстве и времени соответствие выбранной нами статистической модели реальным изменениям шума в данных.

На рис. 3 приведены основные графические данные статистики для серии ALLSI. Анализ гра-

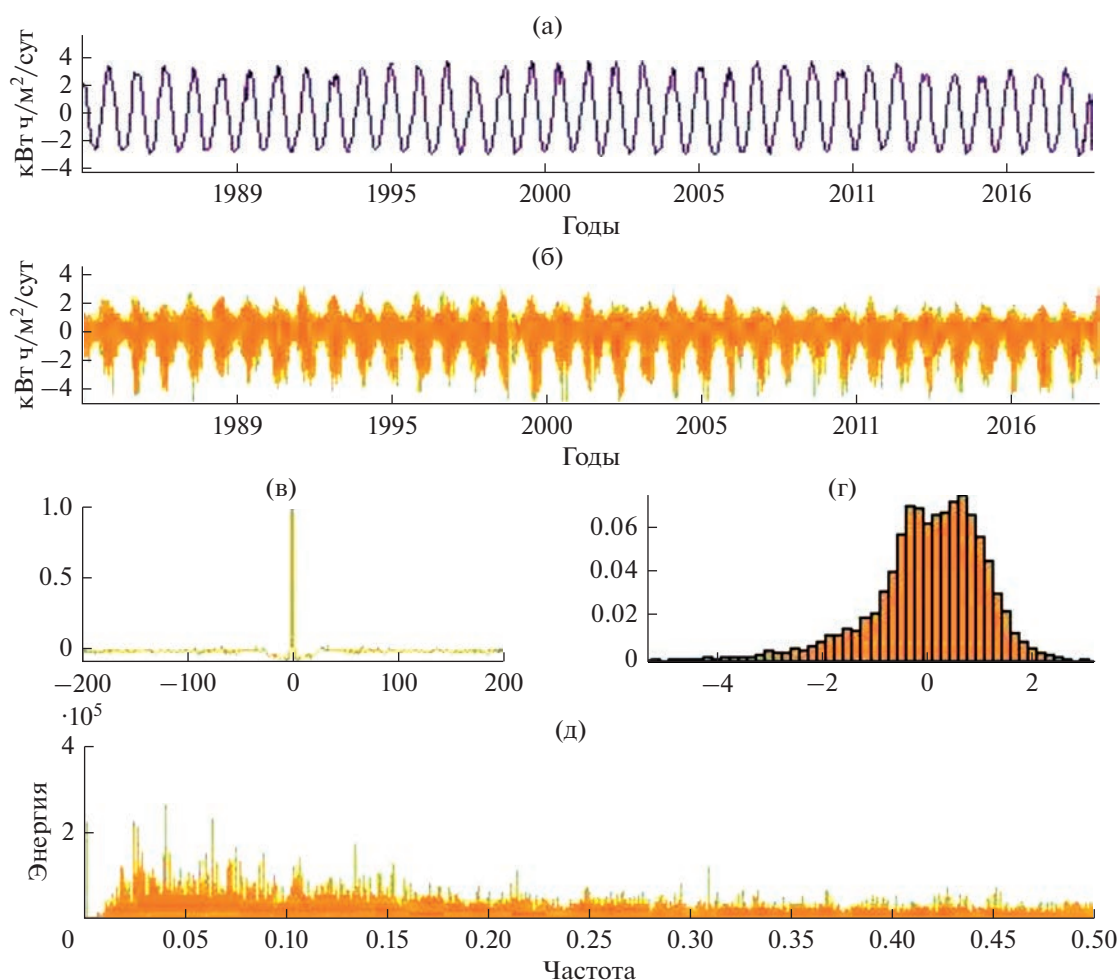


Рис. 3. Статистический анализ: (а) серия ALLSI после удаления гауссового шума; (б) гауссовый шум в серии данных ALLSI; (в) автокорреляция; (г) гистограмма; (д) спектр Фурье (FFT). На графиках (а) и (б) единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

фика (а) на этом рисунке позволяет предположить присутствие достаточно регулярных колебаний. Анализ графика шума (рис. 3б), гистограммы (рис. 3г) и спектра (рис. 3д) допускает возможность присутствия нерегулярных колебаний, не связанных с гауссовым шумом.

Аналогичные графики получены для серий TS, T2M. Дискретные статистики шума в сериях TS, T2M, ALLSI приведены в табл. 1.

Анализ дискретных статистик, приведенных в табл. 1 указывает на распределение близкое к распределению Гаусса.

Таблица 1. Дискретные статистики гауссового шума

Статистики	TS, °C	T2M, °C	ALLSI, кВт/ч/м ² /сут
Среднее	$3.56 \cdot 10^{-7}$	$3.686 \cdot 10^{-5}$	$1.13 \cdot 10^{-5}$
Медиана	0.00455	0.0360	0.0390
Мода	0.130	0.0585	0.0105
Макс.	2.845	7.796	3.819
Мин.	-2.930	-7.024	-4.284
Ст. откл.	0.644	1.346	0.827

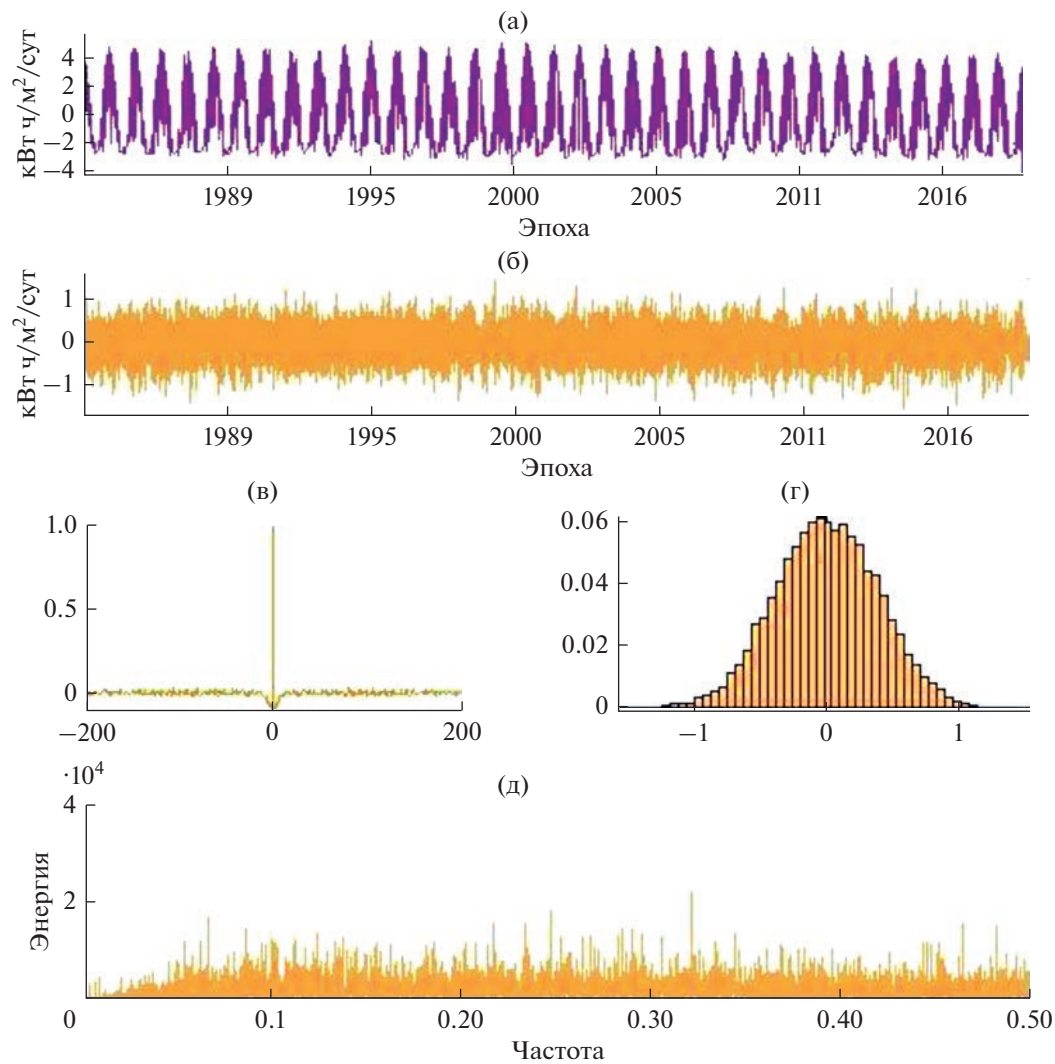


Рис. 4. Статистический анализ: (а) серия ALLSI после удаления не гауссового шума; (б) шум в серии данных ALLSI; (в) автокорреляция; (г) гистограмма; (д) спектр Фурье (FFT). На графиках (а) и (б) единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

Так как белый шум может иметь не гауссово распределение (например, Пуассона, Коши и др.) нами получены графики (рис. 4) и статистические оценки не гауссового шума (табл. 2). С помощью

правила выбора коэффициентов вейвлета с использованием метода штрафа Бирге–Массарта устанавливается глобальный порог шумоподавления [12].

В вычислениях параметров шума подходящим оказался средний уровень штрафа (*Penalize medium*) [17, 20]. Графические результаты статистического анализа небелого шума приведены на рис. 4, а дискретные статистики — в табл. 2.

Далее в анализе использовались временные серии данных TS, T2M, ALLSI, из которых были вычтены линейный тренд и не гауссовый шум.

Регулярные периодические колебания (численные модели). Анализ систематических флуктуаций необходим для установления закономерностей, присутствующих в природных процессах. Регу-

Таблица 2. Дискретные статистики не гауссового шума

Статистики	TS, °C	T2M, °C	ALLSI, кВт/ч/м²/сут
Среднее	0	0	0
Медиана	0.01972	0.1482	0.00021
Мода	0.1262	0.0204	−0.05255
Макс.	3.877	6.647	1.501
Мин.	−5.741	−12.29	−1.545
Ст. откл.	1.065	2.123	0.3896

Таблица 3. Коэффициенты моделей сезонного колебания (10) с 95% доверительными интервалами и параметры точности приближения

Параметры	TS, °C	T2M, °C	ALLSI, кВт/ч/м ² /сут
a_0	0.06556 (0.0361, 0.09502)	0.06476 (0.02113, 0.1084)	0.0153 (−0.001979, 0.03257)
a_1	−9.544 (−9.598, −9.491)	−10.3 (−10.37, −10.22)	3.029 (3.004, 3.053)
b_1	−5.046 (−5.122, −4.969)	−4.601 (−4.717, −4.485)	−0.03359 (−0.08239, 0.01521)
Частота	0.0172	0.0172	0.01721
Период	(0.0172, 0.0172) $P = 365.3$ сут	(0.0172, 0.0172) $P = 365.3$ сут	(0.01721, 0.01721) $P = 365.3$ сут
r -квадрат	0.9506	0.9039	0.8182
Скоррект. r -квадрат	0.9506	0.9039	0.8182
RMSE	1.741	2.6	1.008

лярные периодические колебания в данных могут быть описаны гладкими периодическими функциями. При выборе моделей приближения основополагающими полагались две статистические оценки: RMSE — среднеквадратическая ошибка или стандартная ошибка приближения и r -квадрат корреляции между исходными и прогнозируемыми значениями: значение близкое к 1 указывает на то, что большая доля дисперсии учитывается моделью.

Кроме того, на каждом этапе итераций при выборе порядка и типа модели (прошли испытание полиномиальная, экспоненциальная, модель Фурье, гауссиана и сплайны) вычислялся скорректированный квадрат корреляций. Скорректированный r -квадрат — это r -квадрат с регулируемой степенью свободы. Значение, близкое к 1 указывает на лучшее соответствие.

Предварительный спектральный анализ показал, что наиболее мощным колебанием в трех сериях данных является колебание с периодом в один год. Модель этого колебания наиболее полезна для построения прогноза. Аналитическое описание выбранной модели следующее:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos(x \cdot w) + b_1 \sin(x \cdot w). \quad (10)$$

В этом выражении коэффициент a_0 моделирует постоянный член; w — основная частота; a_1 , b_1 — коэффициенты первой гармоники в приближаемых данных. Аргумент $x = t - t_0$, где t_0 — время отсчета первого элемента каждого временного ряда.

Сезонные колебания описаны моделью (10), параметры которой для каждого временного ряда (TS, T2M, ALLSI) приведены в табл. 3. В этой же таблице приведены статистические характеристики точности приближения параметров модели и точность модели (10). Анализ статистических оценок (табл. 3) показывает, что большая часть (~90%) дисперсии учтена. Тем не менее, в пределах точности наблюдений, модели колебаний с периодом в один год не полностью учитывают изменения амплитуды сезонных колебаний, как это хорошо видно на графиках рис. 5. Причем, наибольшие отклонения наблюдаются на графике ALLSI (ежедневные данные об общей инсоляции падающей на поверхность земли в Кара-Даге).

Вейвлет-анализ данных. Регулярные периодические колебания в спектральной структуре временных рядов TS, T2M, ALLSI обнаруживает проведенный нами частотно-временной непрерывный вейвлет-анализ. Периоды этих колебаний сопоставимы с периодами сезонного колебания, лунных и лунно-солнечных приливных волн. Анализ графиков на рис. 6 показывает, что наиболее мощные периодические колебания выделяются в интервале ~200—400 сут. Рисунок демонстрирует происходящий во времени рост мощности этих периодических колебаний (см. индикатор цвета справа).

Вейвлет-анализ отклонений от модели (10). Отклонения от колебаний с периодом в один год могут быть вызваны:

- систематическими колебаниями;
- влиянием аперiodических процессов.

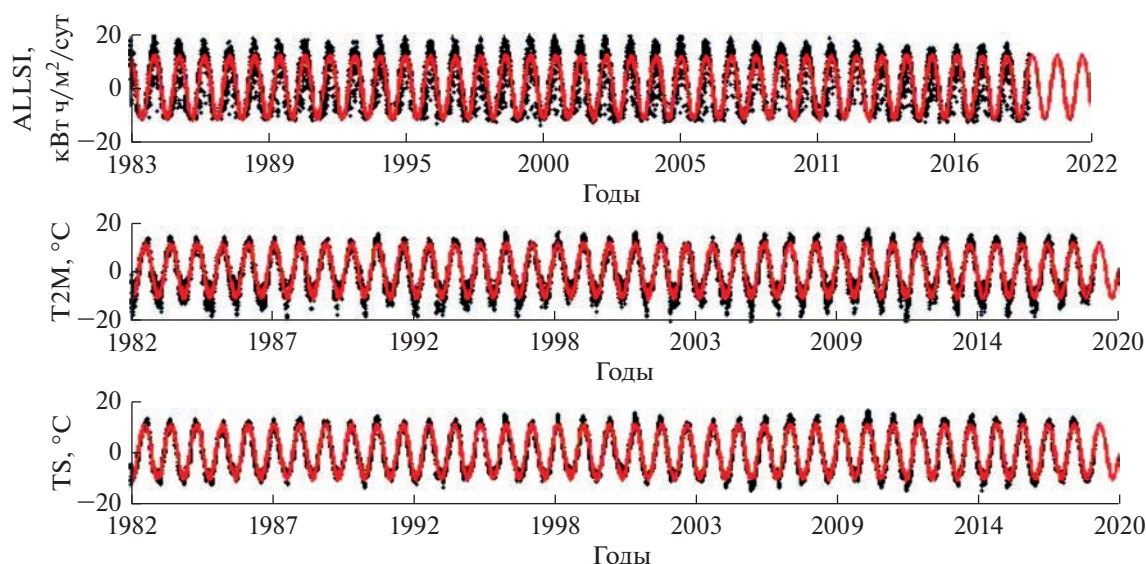


Рис. 5. Графики серий данных ALLSI, T2M, TS с удаленными линейными трендами, не гауссовым шумом (черные звездочки) и модели колебаний с периодом один год (красная кривая). После 2019 г. — прогноз. Единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

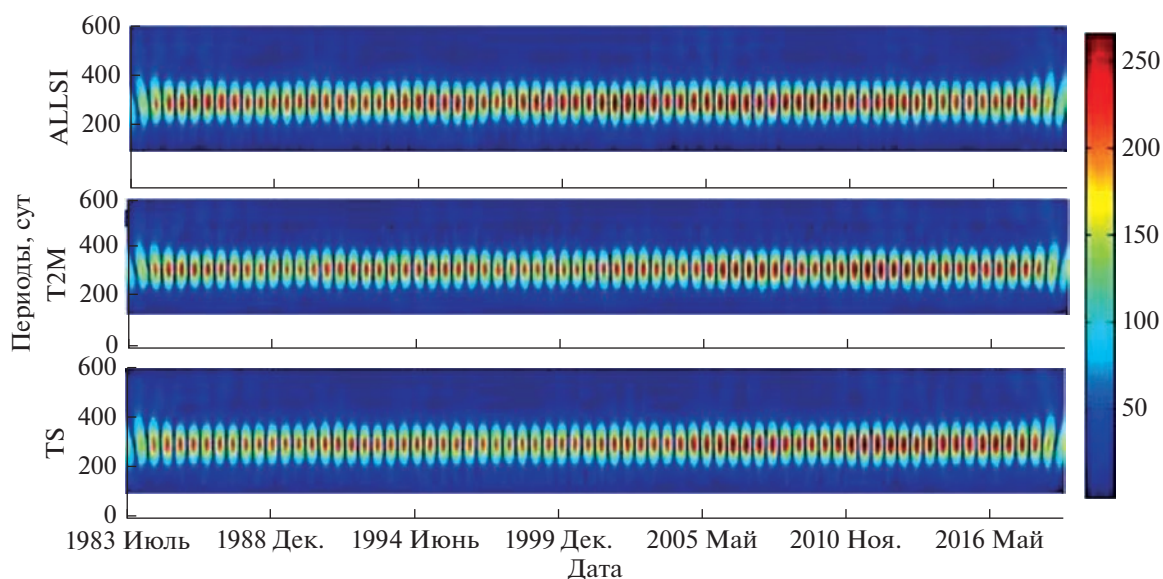


Рис. 6. Графики частотно-временного вейвлет-преобразования серий ALLSI — общей инсоляции падающей на поверхность земли в Кара-Даге; T2M — температуры воздуха на высоте 2 м; TS — температуры поверхности земли. Вейвлеты Морле. Единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

Для определения присутствия периодических колебаний в отклонениях от модели (10) нами проведен частотно-временной вейвлет-анализ. Результаты частотно-временного разложения отклонений от модели (10) представлены на рис. 7.

На этом рисунке в высокочастотной области масштабов (короткие периоды) выделяются периодические колебания с нерегулярной интенсивностью и распределением по времени. Нами

выполнено спектральное разложение и оценки параметров этих колебаний. Наиболее значимыми в трех сериях данных оказались два колебания с периодами 182.5 сут и 2.7 года (986 сут). Амплитуды этих колебаний относительно амплитуды колебаний с периодом в один год составляют соответственно 11.6% — в серии TS, 9% — в серии T2M, 4.6% — в серии ALLSI для периода 182.5 сут и 3.6% во всех трех сериях для периода 2.7 года.

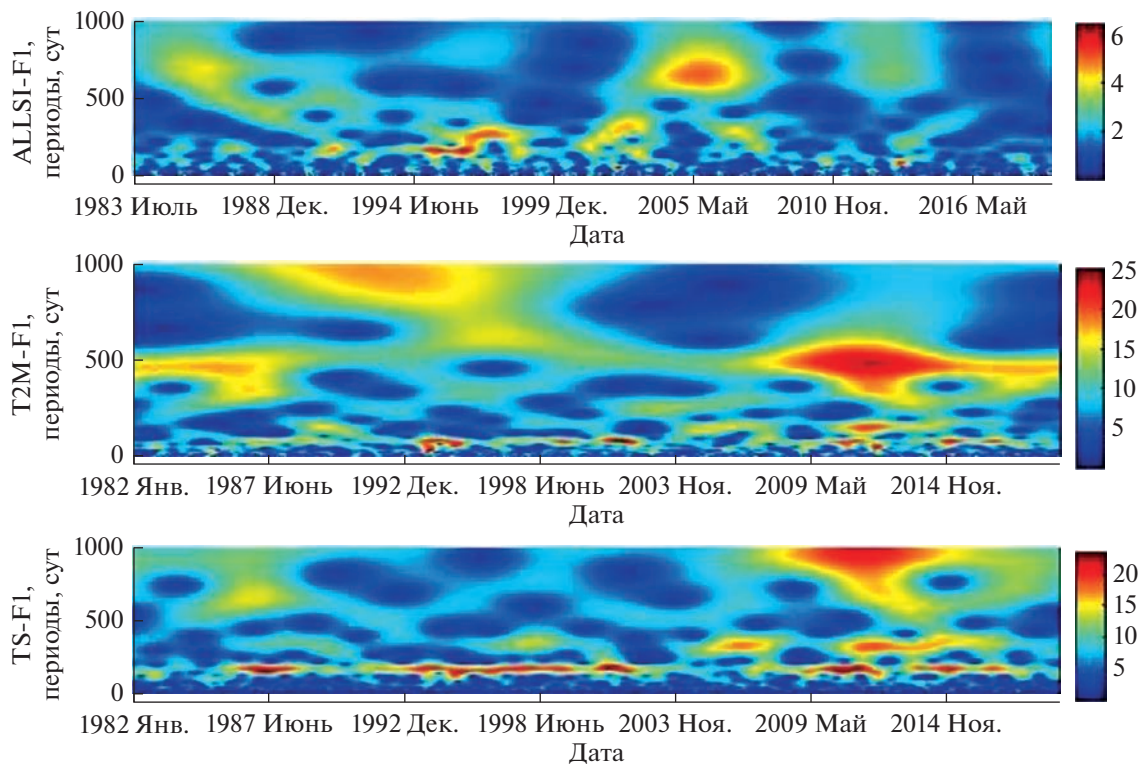


Рис. 7. Частотно-временной вейвлет-анализ вариаций отклонений от модели (9) серий данных ALLSI, T2M, TS. Единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

Кроме того, в серии TS обнаруживается вариация с периодом 356.8 сут с амплитудой, составляющей 4% от амплитуды годового колебания.

Вейвлет кросс-спектр. Мерой линейной зависимости между двумя временными рядами, когда появление признака в одном сигнале соответствует наличию аналогичного признака во втором сигнале, является их корреляция.

Вейвлет-анализ позволяет скорректировать корреляционную функцию так, чтобы она стала мерой локализованной корреляции в частотно-временном пространстве, известной как когерентность вейвлета. Когерентность вейвлета может обнаруживать такие моменты времени и масштабы, для которых два сигнала имеют высокую линейную зависимость, несмотря на то, что спектры мощности локализованных вейвлетов могут быть минимальны в обоих случаях.

С целью анализа взаимной вейвлет-корреляции были вычислены кросс-спектры для данных T2M и ALLSI, TS и ALLSI.

Кросс-спектр для двух временных рядов x и y имеет вид [17]:

$$C_{xy}(a, b) = S\left(C_x^*(a, b)C_y(a, b)\right), \quad (11)$$

где $C_x(a, b)$ и $C_y(a, b)$ представляют непрерывное вейвлет-преобразование временных рядов x и y для шкал a и смещений b ; верхний индекс $*$ означает комплексно-сопряженное выражение, а S — это оператор сглаживания по времени и масштабу. Результаты вычислений кросс-спектров приведены на рис. 8.

Сравнение графиков на рис. 8 показывает, что после 2005 г. наблюдается одновременный рост мощности взаимного спектра на каждом графике (см. индикатор цвета справа: темно-красные области указывают на 95% уровень достоверности).

Вейвлет-когерентность. Корреляция не обязательно подразумевает причинно-следственную связь. Она выражается коэффициентом корреляции, определяемым как:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (12)$$

Добавление знаменателя в формулу кросс-корреляции нормализует значения, и, следовательно, $r \in [0, 1]$, где 0 означает отсутствие линейной связи, а 1 — наличие абсолютной линейной связи между наборами данных.

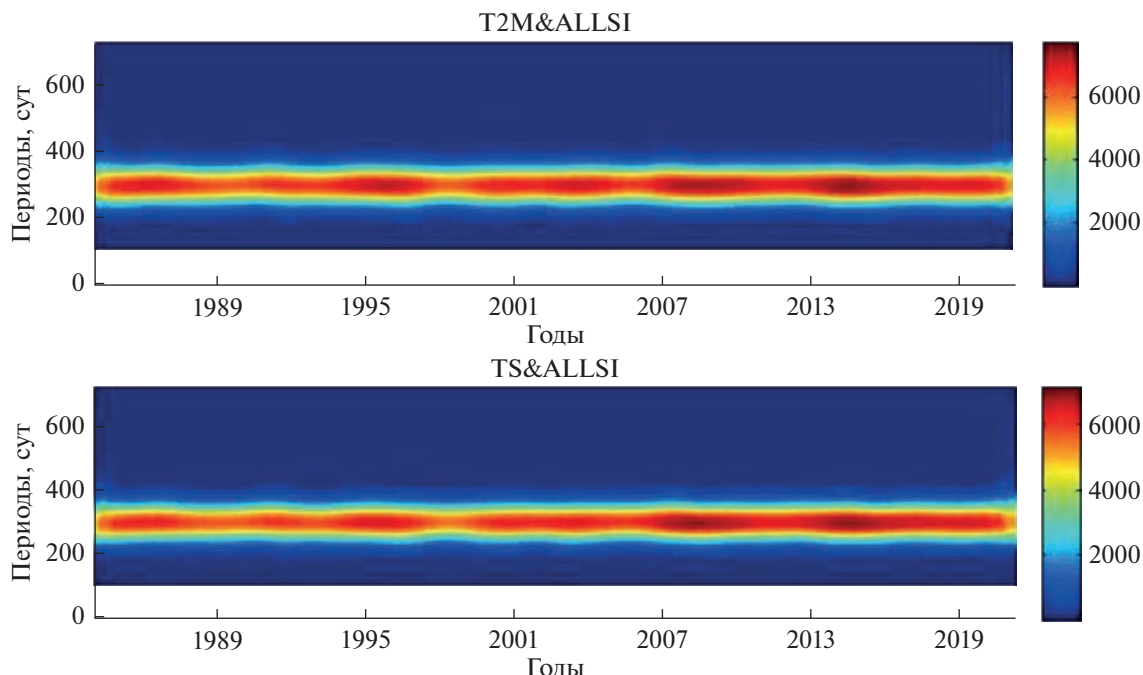


Рис. 8. Кросс-спектры временных рядов: верхний график — температура воздуха на высоте 2 м (T2M) и общая инсоляция (ALLSI); нижний график — температура поверхности земли (TS) и общая инсоляция (ALLSI). Единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

Метод вейвлет-анализа позволяет скорректировать корреляционную функцию (12) так, чтобы она стала мерой локализованной корреляции, известной как когерентность вейвлета в частотно-временном пространстве.

Математическое описание вейвлет-когерентности представим в виде [17]:

$$r^2 = \frac{S\left(C_x^*(a,b)C_y(a,b)\right)}{\sqrt{S\left(|C_x(a,b)|^2\right)}\sqrt{S\left(|C_y(a,b)|^2\right)}}, \quad (13)$$

где $C_x(a,b)$ и $C_y(a,b)$ — непрерывные вейвлет-преобразования x и y в масштабах a и локализациях b ; верхний индекс $*$ — комплексно-сопряженное выражение, а S — оператор сглаживания по времени и масштабу. Сглаживание по времени и масштабу проводится для увеличения уровней значимости и доверительных интервалов.

Величина когерентности, определяемая как квадрат совместного спектра нормированного по индивидуальным спектрам мощности, принимает значения от 0 до 1 и измеряет взаимную корреляцию между двумя временными рядами x и y как функцию частоты (периода).

На рис. 9 демонстрируется распределение модуля когерентности временных рядов T2M и ALLSI, TS и ALLSI.

Стрелки направления указывают сигналы в фазе (направлены вправо) и сигналы в противофазе (направлены влево). Максимально насыщенной окраской охвачены области достоверности более 95% (см. индикатор цвета внизу с отмеченными уровнями значимости). Единицы отсчетов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

Анализ скалограммы на рис. 9:

- Области высокой когерентности хорошо локализованы по частоте и в достаточной степени локализованы во времени вокруг известных частотных составляющих (рис. 6).

- Наблюдается высокая когерентность колебаний на интервале периодов (439–600 сут) до 1988 г. и после 2005 г. Области высокой когерентности на этих интервалах локализованы по времени.

- Направление стрелок указывает, что высоко когерентные колебания в выделенных интервалах периодов происходят в фазе.

Информация о характере флуктуаций в сериях ALLSI, T2M, TS получена из анализа локализации точек на плоскости Пуанкаре.

Анализ фазовых траекторий флуктуаций в сериях ALLSI, T2M, TS на плоскости Пуанкаре. Метод Пуанкаре предполагает наличие информации о фазовом пространстве динамической системы,

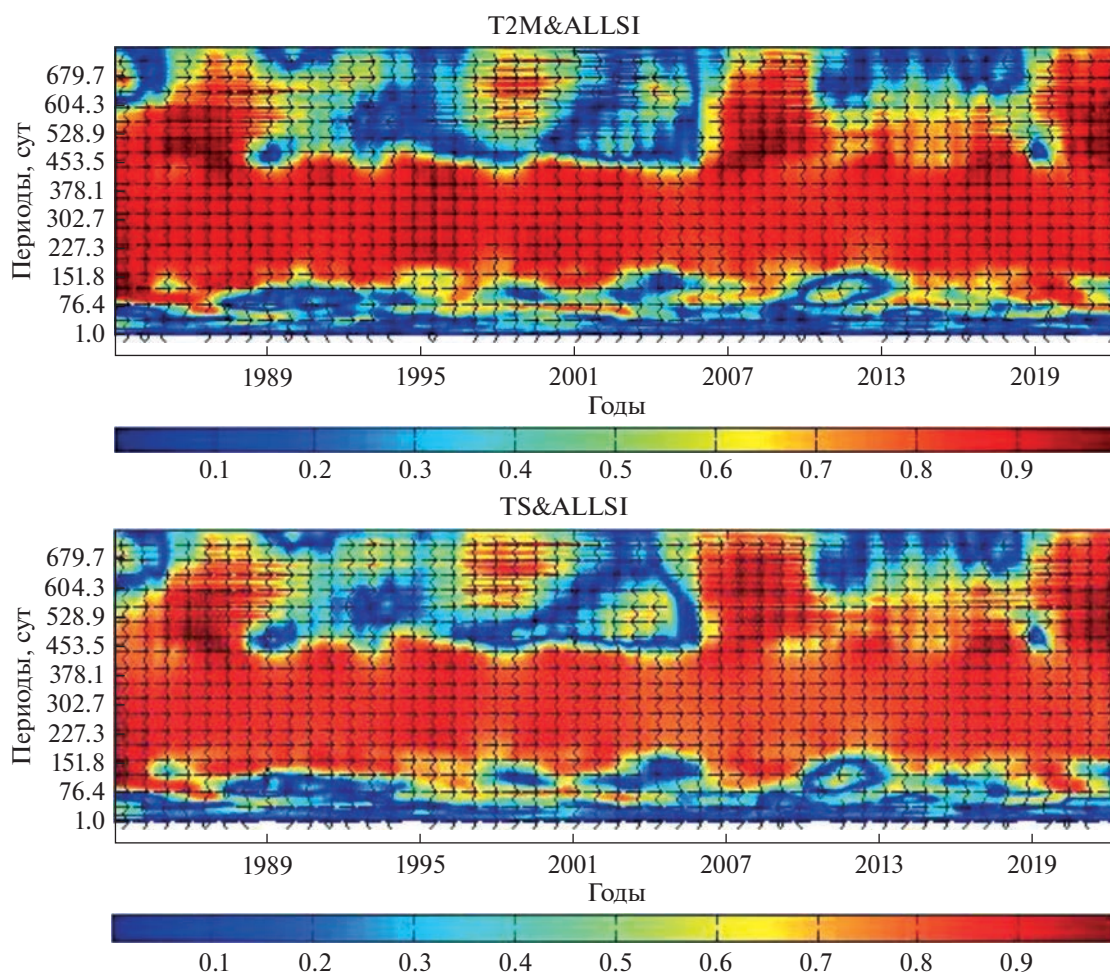


Рис. 9. Скалограммы вейвлет-когерентности временных рядов: верхний график – температура воздуха на высоте 2 м (T2M) и общая инсоляция (ALLSI); нижний график – температура поверхности земли (TS) и общая инсоляции (ALLSI). Стрелки направления указывают сигналы в фазе (направлены вправо) и сигналы в противофазе (направлены влево). Максимально насыщенной окраской охвачены области достоверности более 95 % (см. индикатор цвета внизу с отмеченными уровнями значимости). Единицы отсчётов по горизонтальной оси одни сутки (интервалы между делениями 2000 сут).

производящей временные ряды, которая, в случае анализа природных временных рядов, практически отсутствует. Тем более что серии данных ALLSI, T2M, TS не содержат полной информации о породивших эти ряды процессах. Однако на ограниченном интервале времени каждая из анализируемых нами серий данных достаточно точно отражает общее поведение процесса изменения температуры и общей инсоляции.

В настоящей работе предполагалось получить некоторую качественную информацию о характере флуктуаций (периодические, квазипериодические, хаотические) в сериях ALLSI, T2M, TS. С этой целью использовался метод анализа фазовых траекторий на плоскости Пуанкаре. Предполагая периодический характер вынуждающей силы, построим отображения Пуанкаре стробоско-

пическим выбором точек, то есть предусматривая отбор динамических переменных в моменты, соответствующие определенной фазе вынуждающего колебания.

Картины выборок точек с периодами 365 и 986 сут (2.7 года) на рис. 10 демонстрируют возможность присутствия этих колебаний в анализируемых данных. В идеальном случае периодических колебаний имеет место наложение точек. Наличие в данных двух несоизмеримых частот, при выборке с периодом одной из них, траектория представляется замкнутой фигурой или орбитой на фазовой плоскости. Такое колебание относится к квазипериодическим или, другими словами, соответствует “движению на торе”. Наблюдаемые отклонения точек стробоскопической выборки от орбиты на фазовой плоскости указывают на области

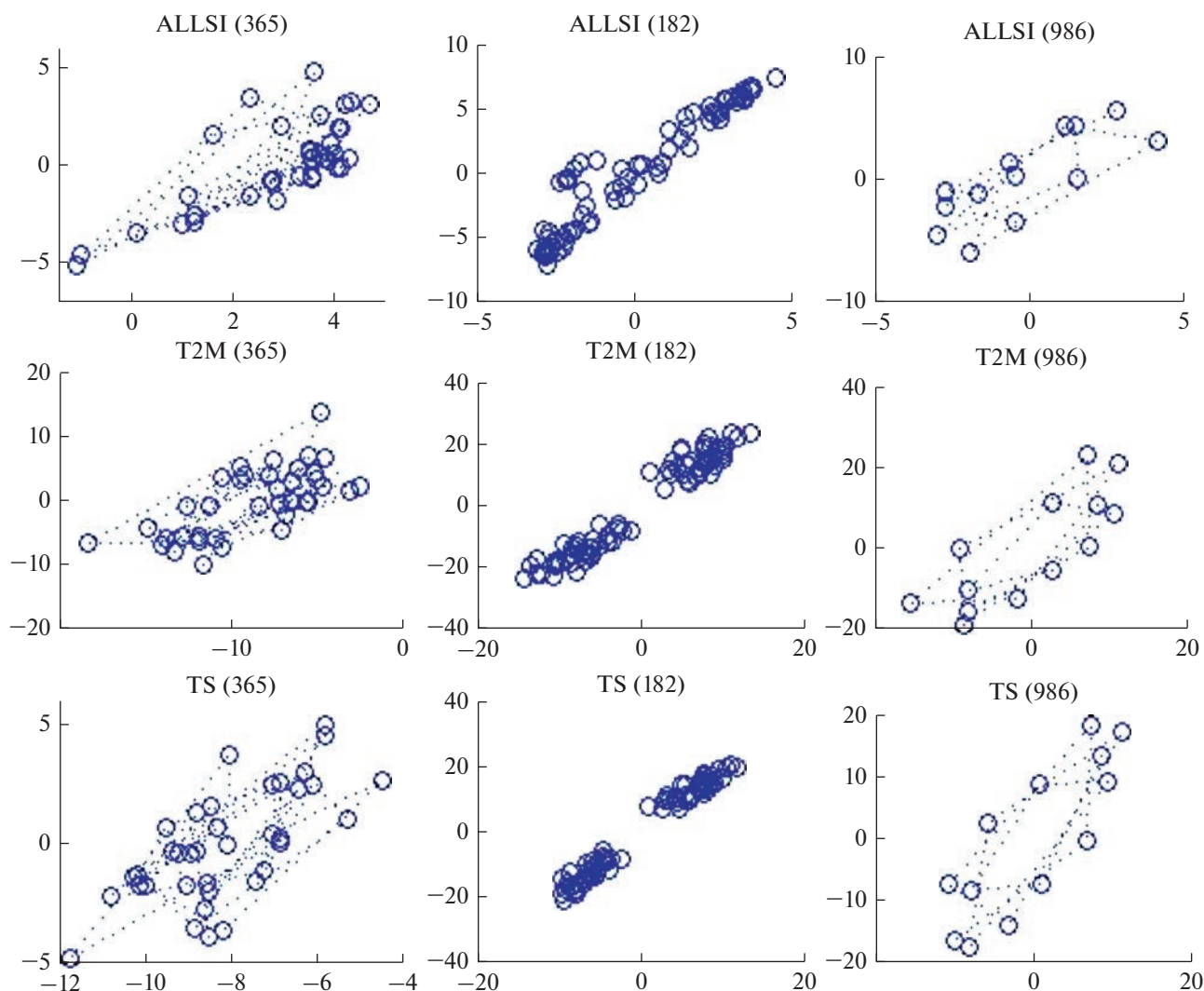


Рис. 10. Отображения Пуанкаре на фазовой плоскости для серий ALLSI, T2M, TS, полученные методом стробоскопических выборок точек. По горизонтали отложены величины в выборке данных (указаны в скобках). По вертикали — первая производная от дискретных выборок. Единицы отсчета соответствуют единицам отсчета в сериях ALLSI, T2M, TS.

синхронизации в пространстве параметров ([21], с. 58).

Отображения Пуанкаре на фазовой плоскости для выборки с периодом 182 сут сопоставим с квазипериодическим процессом, возбуждаемым периодическим сигналом с двумя степенями свободы ([21], с. 59).

AP-анализ. Процессы, воспроизводящие анализируемые нами временные ряды не могут быть не связаны с глобальными явлениями, такими как изменение длительности суток, солнечная активность, изменения глобальной температуры. Существование такой связи демонстрируют графики на рис. 11.

На этом рисунке демонстрируется существование когерентной связи между одинаковыми ва-

риациями в среднегодовых данных ALLSI и в данных о длительности суток, период 11.8 лет (КМК = 0.85, IP = 6); о количестве солнечных пятен (периоды 10.5 лет, 3.6 года (КМК = 0.8 и 0.85, IP = 7)); об индексах изменения глобальной температуры (периоды 2.3, 3.5 года (КМК = 0.7 и 0.9, IP = 7)).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Земля представляет собой открытую систему, существующую не в абстрактном, а в конкретном космическом пространстве и взаимодействующую с ним. Виды взаимодействия Земля—Космос достаточно разнообразны, в их основе лежат резонансные взаимосвязи. Одним из примеров такой взаимосвязи является взаимодействие в си-

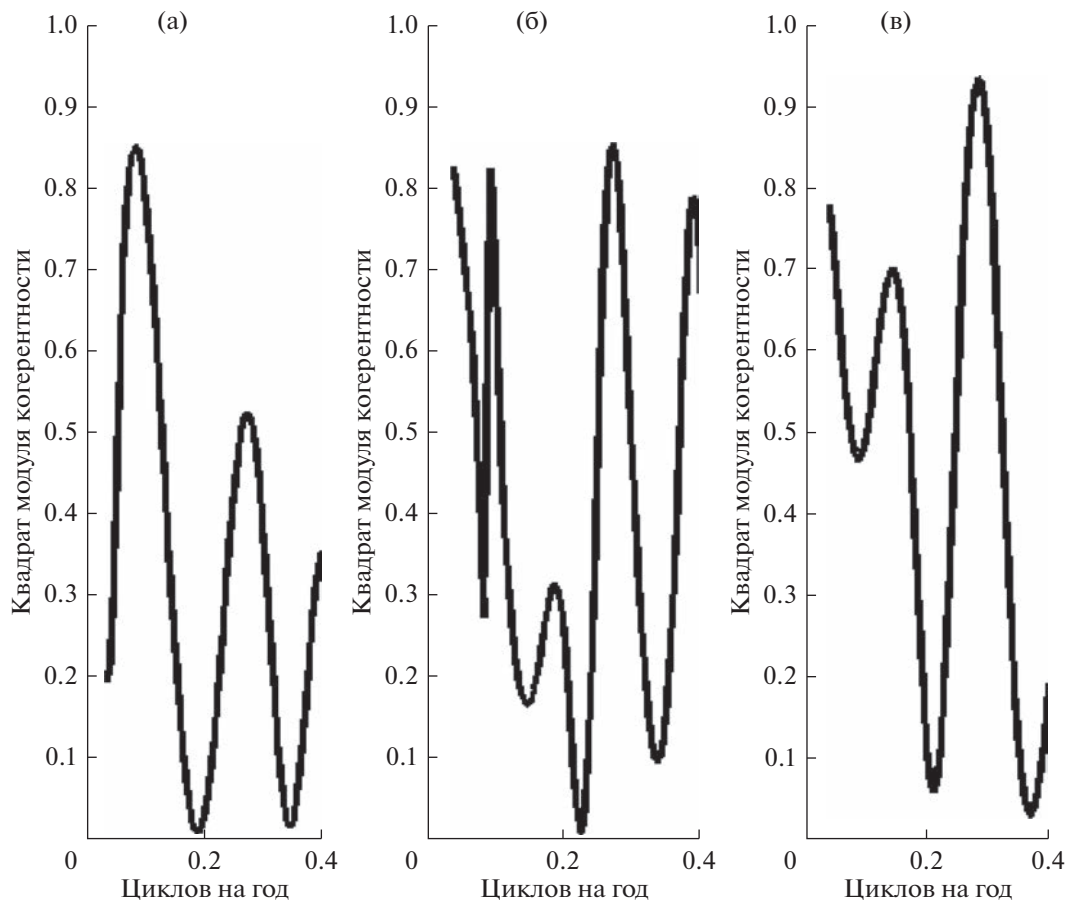


Рис. 11. Когерентность между вариациями в среднегодовых данных ALLSI и в следующих среднегодовых данных: а — длительность суток (length of day, LOD), б — количество солнечных пятен (Вольфа), в — индексы глобальной температуры.

стеме Земля—Луна, фактически представляющая двойную планету, барицентр которой лежит вне Земли. Уменьшение амплитуды вызываемых притяжением Луны твердых приливов и замедление вращения Земли, по-видимому, носят не монотонный колебательный характер, а могут находиться в резонансе с тектонической цикличностью [22].

Р. Бостром считает, что проявление на Земле субдукции, и вообще тектоники плит, практически не известной на других планетах земной группы, было обусловлено именно взаимодействием Земли и Луны [23].

Достаточно давно было отмечено совпадение длительности крупномасштабных тектонических циклов, выделенных еще в конце XIX в. французским геологом М. Бертраном, со временем обращения по галактической орбите Земли и всей Солнечной системы. На этом пути Земля пересекает струйные потоки газопылевого галактического вещества, которое может оказывать определенное воздействие на происходящие в ее недрах

процессы. В этом случае речь идет об определенном резонансе между космическими и глубинными геодинамическими процессами. Решение этой проблемы может привести к совершенно иной интерпретации экстремальных процессов на Земле.

Так как понимание процесса зарождения и прогнозирования экстремальных явлений далеко от завершения, локальные наблюдения и их анализ, не решая проблему в целом, вносят вклад в развитие общей теории. На прогревание поверхности земли в Кара-Даге могут влиять внешние и внутренние источники энергии. Пробуждение потухшего вулкана в Кара-Даге возможно даже при незначительном нарушении теплового баланса.

Анализируя временные ряды метеорологических и солнечных параметров локальной точки Земного шара, такой, например, как Кара-Даг, мы не можем учитывать все глобальные процессы, влияющие на их воспроизведение, и должны выделять ведомые в их изменении вариации. Это,

в первую очередь, вариации, воспроизводимые суточным вращением Земли, а также изменениями параметров вращения в системе Земля–Луна и ориентации этой системы относительно Солнца — главного источника инсоляции. Наиболее значимой из этих вариаций является колебание с периодом один год.

Выделенные сезонные колебания с периодом один год учитывают периодические изменения в анализируемых сериях данных (рис. 5). Тем не менее, анализ флуктуаций в этих сериях на плоскости Пуанкаре обнаруживает отклонения от строгой периодичности и даже квазипериодичности (рис. 11). Эти отклонения от фазовых траекторий могут быть связаны с многочисленными резонансными взаимодействиями периодических вынужденных и собственных колебаний в системе Земля, в частности, с приливными волнами. На основании результатов, приведенных в настоящей работе можно сделать выводы:

- Наиболее мощными периодическими колебаниями в анализируемых сериях данных являются сезонные, которые с большим приближением можно описать численной моделью (10).

- Вейвлет-анализ позволил исследовать локальные изменения спектрального состава в данных и показал локальные изменения мощностей колебаний на различных временных интервалах.

- Временные интервалы с максимальной мощностью колебаний в анализируемых сериях данных совпадают, что позволяет допустить возможность поступления энергии от одного и того же источника.

- Прогревание поверхности земли в Кара-Даге требует особого внимания с целью разграничения внешних (общая инсоляция) и внутриземных источников нагрева (плюмы, тектоника Крыма и др.). Конкретные выводы об этом явлении могут быть получены при выяснении существования внутриземного источника, резонирующего с потоком солнечной инсоляции. Этот вывод нуждается в изучении геологической обстановки в этой точке Земли.

- Проведенное нами исследование когерентных связей между общей инсоляцией и локальной температурой воздуха на высоте 2 м, между общей инсоляцией и локальной температурой поверхности земли в Кара-Даге, позволило определить области высокой когерентности, хорошо локализованные по частоте и, в достаточной степени, локализованные во времени вокруг известных частотных составляющих (рис. 10).

- Обсуждаемые в настоящей работе когерентные связи локальных измерений температуры воздуха на высоте 2 м и температуры поверхности

земли с общей инсоляцией в Кара-Даге определяют степень линейности между двумя сериями данных и не обязательно подразумевают причинно-следственную связь.

- Установленные нами когерентные связи между одинаковыми вариациями в среднегодовых данных об общей инсоляции в Кара-Даге и в данных о длительности суток (период 11.8 лет); количестве солнечных пятен (периоды 10.5 лет, 3.6 года), индексах изменения глобальной температуры (периоды 2.3, 3.5 года) имеют обоснование в современных теоретических исследованиях [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. Бургас, Science Without Borders, 2008. 304 с.
2. Хаин В.Е. Геология на пороге новой научной революции // Природа. 1995. № 1. С. 33–51.
3. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухъярусная термодинамическая модель конвекции и ее геодинимические следствия // Проблемы глобальной геодинимики. Коллективная монография. М.: ГЕОС, 2000. С. 29–53.
4. Трубицын В.П. Глобальные тектонические процессы, формирующие лик Земли // Геофизика на рубеже веков. М.: ИФЗ РАН, 1999. С. 80–92.
5. Палас П. Краткое физическое и топографическое описание Таврической области. Перевод с фр. И. Рижского. СПб: Императорская типография, 1795. 72 с.
6. Kurbasova G.S., Volvach A.E. The insolation anomalies on the Crimean peninsula with observations from space // Proc. Microwave and Telecommunication Technology: 24th International Crimean Conference. Sevastopol. 2014. P. 1085–1086.
<https://doi.org/10.1109/CRMICO.2014.6959772>
7. Kurbasova G.S., Volvach A.E. Wavelet analysis of terrestrial and space measurements of local insolation // Space Science and Technology. 2014. V. 20. Iss. 4. P. 42–49.
<https://doi.org/10.15407/knit2014.04.042>
8. Volvach A.E., Kurbasova G.S. Secular variations of geomagnetic declination in the Karadag point and the global helio-geodynamic processes // Geofizicheskiy Zhurnal—Geophysical Journal. 2019. V. 41. Iss. 1. P. 192–199.
9. Volvach A.E., Kurbasova G.S. 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. P. 1–58.
<https://doi.org/10.17721/1728-2713.85.07>
10. Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N. Analysis of periodical variability of insolation and soil temperature in the Crimea // Geofizicheskiy Zhurnal—Geophysical Journal. 2019. V. 23. Iss. 6. P. 195–202.

11. *Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N.* Solar-Terrestrial Cycles in the Climatic and Geophysical Properties of Crimea // *Astrophysical Bulletin*. 2019. V. 74. Iss. 3. P. 331–336.
<https://doi.org/10.1134/S1990341319030118>
12. *Haar A.* Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme // *Mathematische Annalen*. 1910. V. 69. P. 331–371.
13. *Daubechies I.* Orthonormal bases of compactly supported wavelets // *Communications on Pure and Applied Mathematics*. 1988. V. 41. P. 909–996.
14. *Daubechies I.* The wavelet transform, time–frequency localization and signal analysis // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1990. V. 36. Iss 5. P. 961–1005.
15. *Farge M.* Non-Gaussianity and coherent vortex simulation for two dimensional turbulence using an adaptive orthogonal wavelet basis // *Phys. Fluids*. 1999. V. 11. Iss. 8. P. 2187–2201.
16. *Abry P.* Ondelettes et turbulence. Multirésolutions, algorithmes de décomposition, invariance d'échelles. Diderot Editeur. Paris. 1997. 268 p.
17. *Torrence C., Compo G.P.* A Practical Guide to Wavelet Analysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. Iss. 1. P. 61–78.
18. *Marple S.L.* Digital spectral analysis with applications. Englewood Cliffs. NJ. Prentice–Hall, 1987. 512 p.
19. *Marple S.L.* Digital spectral analysis. Second Edition. Mineola, New York. Dover Publications, 1987. 2019. 435 p.
20. *Donoho D.L.* De–noising by soft–thresholding / *IEEE Trans. Information Theory*. 1995. V. 41. Iss. 3. P. 613–627.
<https://doi.org/10.1109/18.382009>
21. *Мун Ф.* Хаотические колебания. М.: Мир, 1990. 311 с.
22. *Авсюк Ю.Н.* Глобальные изменения среды и климата в сопоставлении с приливной моделью эволюции системы Земля–Луна // *Геофизика на рубеже веков*. М.: ИФЗ РАН, 1999. С. 93–106.
23. *Bostrom R.C.* Tectonic Consequences of the Earth's rotation. Oxford: Oxford University Press, 2000.