

УДК 523.31

МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИТМОВ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗАДАЧАХ ВЫЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТОВ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОСФЕРУ

В.А. Ожередов, Т.К. Бреус, А.А. Петрукович

METHODS FOR ANALYSIS OF THE RHYTHMS OF HELIOGEOPHYSICAL ACTIVITY SEARCHING THE EFFECTS OF THEIR INFLUENCE ON THE BIOSPHERE

V.A. Ozheredov, T.K. Breus, A.A. Petrukovich

Статистический анализ биологических эффектов слабых электромагнитных явлений в околоземном пространстве, порождаемых гелиогеомагнитной активностью (ГМА), связан с большими трудностями, вызванными нестационарностью как рядов ГМА, так и биологических откликов, а также неизвестной сложностью задающего ритма ГМА. В данной работе развит новый подход к анализу временных рядов, не связанный со стохастическими характеристиками последних. Этот подход, оперирующий понятиями соответствия сигналов, позволяет отфильтровать периодические компоненты рядов и выявить как сходство их форм, так и фазовую синхронизацию последних.

It is difficult to statistically analyze biological effects of weak electromagnetic phenomena in the near-Earth space, generated by heliogeomagnetic activity (GMA), because the series of GMA and biological responses are nonstationary and the complexity of the GMA driving rhythm is unknown. This work has developed the new approach to analyzing time series, which is independent of the stochastic characteristics of these series. This approach, using signal correspondence concepts, makes it possible to filter out the periodical components of the series and to reveal both similarity and phase synchronization of these components.

Постановка задачи

Методы математической статистики до настоящего времени не позволяли получать убедительные доказательства влияния гелиогеомагнитной активности на макропараметры человеческой популяции.

Предлагаемый здесь подход оперирует понятием соответствия сигналов и позволяет отфильтровать непериодические компоненты рядов и выявить сходство их форм на основе сравнения последних по так называемому критерию соответствия.

Цель настоящей работы – демонстрация возможностей логической фильтрации сигнала, позволяющей отсекал неинформативную компоненту, форма которой полностью не соответствует характеристикам искомого ряда (например, периодического ритма).

Логический фильтр на основе оператора \sim , отображающего пространство дискретных многообразий в себя, позволяет выделить сигнал, форма которого связана исключительно с периодическим воздействием, и отсеять нерегулярную компоненту.

Логический фильтр на основе оператора $\&$, отображающего пространство дискретных многообразий на числовой сегмент $[0,1]$, позволяет сравнивать формы сигналов с учетом того, что каждый из них имеет тренд, не имеющий отношение к информативной компоненте.

Соответствие между двумя рядами X и Y

Каждый из исходных временных рядов аппроксимируется копией другого ряда в смысле обычного среднеквадратичного расстояния.

Назовем теперь критерием соответствия $F = F[x, y]$ рядов X и Y относительный выигрыш в точности среднеквадратичного приближения с участием копии одного из рядов по сравнению с ошибкой такой же аппроксимации константой (без его участия):

$$F[y, x] \equiv \frac{\min_c R^2[y, C] - \min_{a,c} R^2[y, ax + C]}{\min_c R^2[y, C]} = \frac{D_y - D_y(1 - K^2[x, y])}{D_y} = K^2[x, y],$$

$\min_{a,c} R^2[y, ax + C] = D_y(1 - K^2[x, y])$ – минимальное значение СКВ-расстояния между сигналом Y и копией X, D – минимальное значение СКВ-расстояния между заданным рядом и константой C, K – коэффициент корреляции между двумя сигналами.

Поиск максимально похожих сигналов: K- и R-стратегии

Временной ряд X, обладающий некоторыми дополнительными особенностями, наиболее похожий на z, удовлетворяет условию $\arg \max_x K^2[X, z]$.

Алгоритм решения этой задачи – K-стратегия – крайне неудобен для реализации на ЭВМ хотя бы потому, что выбранный критерий соответствия инвариантен к классу операций, отображающих сигнал на континуальное множество временных рядов, \rightarrow реализация K-стратегии не ведет к единственному ответу. При условии замкнутости множества допустимых X относительно операций инверсии фазы, сдвига и растяжения форму искомого сигнала можно найти, заменив K- на R-стратегию:

$$\arg \min_x R^2[X, z] \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - z_i)^2.$$

Если множество допустимых X выпукло, эта задача имеет единственное решение

Ортогональное дополнение

Искомый сигнал (информативная компонента) должен обладать свойством, не обязательно заданным параметрически, которое определяет множест-

во допустимых многообразий X . Ортогональным дополнением сигнала z по отношению к множеству X назовем временной ряд η , наиболее близкий по форме и в среднеквадратичной метрике, а также ортогональный всем $\xi \in X$ в том смысле, что форма η абсолютно не соответствует ξ , т. е. параметр соответствия этих многообразий принимает наименьшее из всех возможных значений:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - M_\xi)(\eta_i - M_\eta) \equiv \text{cov}[\xi, \eta] = 0.$$

Условие замкнутости множества X по отношению к операциям растяжения $\xi \Rightarrow a\xi$ и сдвига $\xi \Rightarrow \xi + C$, $C \equiv \{c, c, \dots, c\}$ гарантирует существование единственного сигнала, являющегося результатом действия оператора \sim на каждый элемент $\xi \in X$ и наиболее близкого в среднеквадратичной метрике (и, как следствие, по форме) к заданному многообразию z . Этот сигнал будем называть ортогональным дополнением сигнала z по отношению к множеству X .

Алгоритм фильтрации ортогонального дополнения

Ковариация – линейный оператор, а потому из ортогональности ряда каждому из сигналов некоторого множества следует его полное несоответствие всем линейным комбинациям этих сигналов. Следовательно, ортогональность ряда Y всем базисным векторам множества значений ряда X приводит к ортогональности Y всему пространству X . Пусть

$\{\varphi^q\}_{q=1}^Q$ – базис множества значений ряда X . Ортогональным дополнением наблюдаемого ряда z по отношению к множеству X является разность z и линейной комбинации базисных элементов X с коэффициентами $\{\lambda^q\}_{q=1}^Q$, получающимися из системы уравнений

гональным дополнением наблюдаемого ряда z по отношению к множеству X является разность z и линейной комбинации базисных элементов X с коэффициентами $\{\lambda^q\}_{q=1}^Q$, получающимися из системы уравнений

$$\left\{ \sum_{\beta=1}^Q \text{cov}[\varphi^\alpha, \varphi^\beta] \lambda^\beta = \text{cov}[\varphi^\alpha, z] \right\}_{\alpha=1}^Q.$$

Материалы и методы

Для анализа в работе использовались медицинские ряды смертности от инфаркта миокарда (ИМ) по всей Болгарии за 25 лет (1970–1995 гг.), индекс K_p , отражающий планетарную геомагнитную активность, и индекс D_{st} -вариации, характеризующий формирование кольцевого тока в магнитосфере Земли во время геомагнитных возмущений, использовались данные по Pc1-пульсациям геомагнитного поля (0.5–2.0 Гц), сопровождающим фазы восстановления геомагнитных бурь и иногда наблюдающимся перед началом бури (данные получены на обсерватории «Борок» Ярославской области). Исследовался характер синхронизации этих рядов в динамике.

Результаты

В заключение приведем периодические компоненты реальных сигналов (форма последних наиболее правдоподобна с точки зрения теории соответствия).

На рис. 1 представлены отфильтрованные периодические компоненты индексов геомагнитной активности K_p и D_{st} (верхние два графика) и смертности от инфаркта миокарда (ИМ) в Болгарии (1970–1995). Максимумы ритмов геофизических параметров приходятся на весну–осень, и сезонная динамика их сходна. Ритмы смертности ИМ имеют максимумы в зимние месяцы и минимумы летом. Различие сезонных ходов этих характеристик вызывало недоверие к попыткам приписать причинно-следственные связи этим явлениям.

Далее было проведено сопоставление ряда смертности от инфарктов с продолжительностью существования Pc1-пульсаций в магнитосфере Земли. Pc1 имеют частотный диапазон, совпадающий с диапазоном частот основных ритмов сердца. В работах [5, 6] было показано, что имеется сходство сезонного хода Pc1-пульсаций и ИМ, и по этой причине Pc1 могут рассматриваться как биотропный агент солнечной активности.

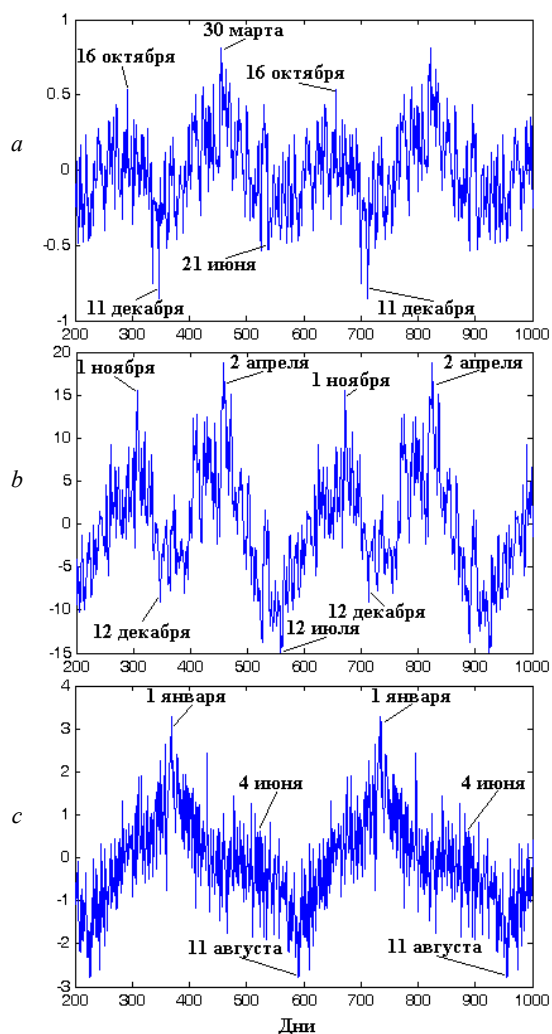


Рис. 1. Годовые ритмы K_p (a) и D_{st} (b) геомагнитной активности и сезонный ход периодической компоненты смертности от инфарктов ИМ (c).

На рис. 2 приведены вариации смертности от ИМ за 25 лет в Болгарии и вариации продолжительности наблюдения Pс1-пульсаций геомагнитного поля, зарегистрированные на обсерватории «Борок» Ярославской области. Сходство ритмов этих показателей не столь очевидно. На рис. 3 приводится сопоставление сезонных среднемесячных компонент смертности от инфарктов в Болгарии и продолжительности Pс 1, полученное методом отсеечения ортогонального дополнения периодического (годового) ритма, как описывалось выше. Из рис. 3 видно поразительное сходство форм обоих сигналов (в некоторых местах – даже совпадение их фаз). Максимумы ИМ и Pс1 приходятся на позднюю осень, зиму и весну, а минимумы – на лето.

Взаимный тренд

В настоящей работе предлагается метод выявления взаимосвязи между событиями, порождающими дискретные многообразия, основанный на предположении о том, что интерферирующие факторы не способны изменить «основную структуру» сигналов. В этом случае последние представимы в виде смеси «информативной части» и тренда. Обычно множество всех возможных трендов – это линейная оболочка медленно меняющихся в пространстве/времени функций. На рис. 4 приводится тестовый пример тренда.

В реальном примере при обработке месячных данных о количестве инфарктов миокарда (ИМ) в Болгарии, продолжительности Pс1-пульсаций и геомагнитных индексах K_p и D_{st} за период 1970–1995 гг. путем вычитания линейных комбинаций полиномов

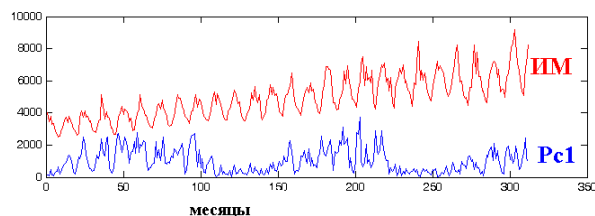


Рис. 2. Вариации ежемесячных данных о внезапной смерти от ИМ в Болгарии и ежемесячной продолжительности Pс1-микропульсаций геомагнитного поля (из работы [5]).

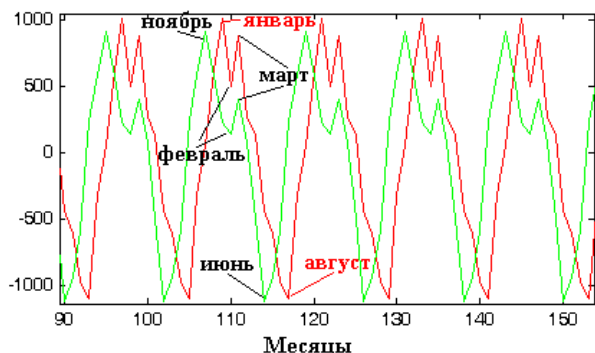


Рис. 3. Сезонные ритмы продолжительности Pс1-пульсаций (бледная линия) и смертности от ИМ в Болгарии (яркая линия) по данным, представленным на рис. 3, полученные путем удаления всех компонент, не содержащих 12-месячные периодические ритмы. По вертикальной оси – произвольные единицы.

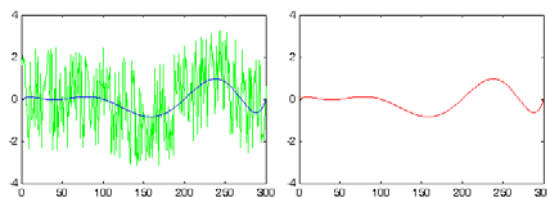


Рис. 4. Тестовый пример. Слева – результат наложения псевдослучайной последовательности на гладкий тренд с шестью экстремумами (гладкая кривая). Справа – взаимный тренд исходной последовательности и сигнала, обозначенного изрезанной линией слева. Множество возможных трендов – линейная оболочка полиномов 7-го порядка.

третьего порядка получены следующие результаты. Максимальные по модулю коэффициенты корреляции между ИМ и Pс1 оказались чрезвычайно высокими: $K = +0.73$, в то время как между ИМ и K_p -индексом геомагнитной активности коэффициент корреляции традиционно низкий: $K = +0.18$. Это же можно связать и с D_{st} -вариацией, поскольку, как можно было видеть из рис. 2, между D_{st} и K_p имеется существенное сходство и коэффициент корреляции $K = -0.65$.

Заключение

Как мы убедились, при отсутствии априорной параметрической информации о временных рядах теория соответствия может успешно заменить как детерминированный (спектральные представления, хаотическая динамика), так и стохастический подход к решению задач фильтрации и распознавания образов. В этих случаях теория соответствия способствует построению особой *формальной* модели генерации сигнала. В контексте таких моделей характеристики последнего, будучи не сводимыми полностью к обычным параметрам типа длины автокорреляции или спектральной плотности, позволяют теоретически обосновывать как поведение временного ряда в прошлом, так и строить непараметрические прогнозы на будущее.

Авторы выражают благодарность О.В. Козыревой и Н.Г. Клейменовой за разрешение пользоваться базами данных по Болгарии и Pс1-пульсациям. Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бинги В.Н., Савин А.В. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // Усп. физ. наук. 2003. Т. 173, № 3.
2. Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А. Влияние солнечной активности на биосферу–ноосферу / Под ред. Л.А. Блюменфельда и академика РАН Н.Н. Моисеева. М.: Из-во МНЭПУ, 2000. 374 с.
3. Бреус Т.К., Рапопорт С.И. Магнитные бури – медико-биологические и геофизические аспекты. Сов. спорт, 2003. 193 с.
4. Гурфинкель Ю.И. Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность / ФГУП ВИНТИ. М., 2004. 168 с.
5. Рапопорт С.И., Бреус Т.К., Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Геомагнитные пульсации и инфаркты миокарда // Тер. арх., 2006. № 4. С. 56.

