

Эволюционные портреты геофизических рядов: - I. Приливной процесс и сейсмические ряды

М.В.Воротков, В.Л.Горшков

Предлагается новая методика сравнительного исследования геофизических данных различной природы. Методика демонстрируется на примере совместного анализа сейсмических и приливных процессов в разработанной интегрированной программной среде, специально ориентированной на поддержку подобных работ.

I. Вектор вращения Земли является естественным индикатором процессов обмена моментами между различными оболочками Земли [1]. Достаточно хорошо изучены причины, возбуждающие периодические компоненты в рядах параметров вращения Земли (ПВЗ). Ввиду достигнутой точности мониторинга ПВЗ (± 0.1 mas в координатах полюса и ± 0.004 ms во всемирном времени в суточных данных), представляется своевременным в остающейся стохастической части поведения вектора вращения Земли также исследовать факторы, возбуждающие наблюдаемое распределение остатков. В качестве таких факторов в работе исследуются сейсмические процессы.

Попытки обнаружить связь ПВЗ с землетрясениями предпринимались неоднократно. И, если в области декадных вариаций продолжительности суток некое подобие взаимосвязи обнаруживается, то в части непосредственного влияния даже сильных землетрясений на ПВЗ эта связь обнаруживается неуверенно [2] и, более того, противоречит модельным расчётам [3]. Однако отмечается [4] факт снижения сейсмичности в тех случаях, когда полюдия полюса менее изрезана.

Для демонстрации отмеченной закономерности на рис.1 представлено сравнение динамики изменения продолжительности суток [Л.Моррисон, 5] со среднегодовым количеством землетрясений [4]. Некоторый намёк на синфазность этих рядов уже порождает теоретические работы, объясняющие её либо турбулентными потоками в жидком ядре, приводящими как к модуляции частоты вращения Земли, так и к модуляции сейсмичности в

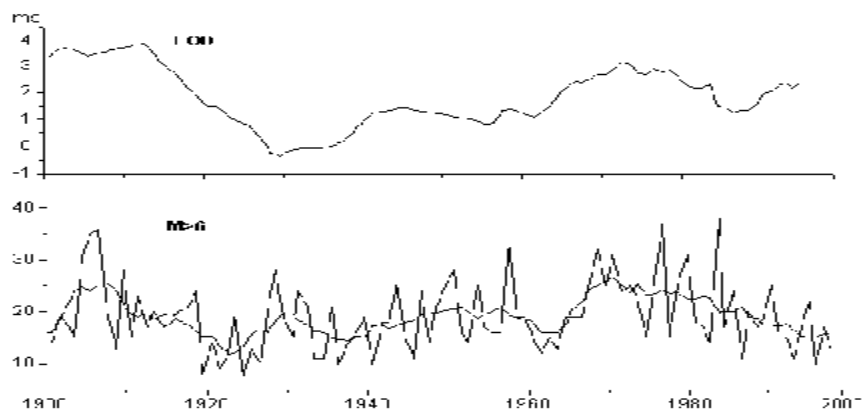


Рис.1 Изменение продолжительности суток (LOD) и число сильных землетрясений ($M>6$) в XX веке.

сейсмоактивных областях [6], либо электромагнитной сцепкой между корой и слабо проводящей мантией [7].

II. Проблема выявления закономерностей в процессах, обычно классифицируемых как стохастические, имеет универсальное значение. Она особенно актуальна при работе со сложными системами, включающими большое число взаимодействующих компонент. В разрабатываемом подходе **целью исследования является не изучение конкретных механизмов, объясняющих поведение отдельных составляющих системы, а выявление особенностей ее поведения в целом.** В частности, может быть поставлена задача обнаружения слабых, но синхронизированных во времени специфических проявлений. Рассмотрение подобных эффектов может быть ключевым при изучении саморегуляции геофизической системы.

Традиционно составляющие временного ряда представляются в виде $F(t)=f_t(t)+f_p(t)+f_m(t)+e(t)$, где $f_p(t)$ - периодические компоненты, $f_t(t)$ - тренды, $f_m(t)$ - компоненты, обусловленные известными факторами (модельные), $e(t)$ – шумовые остатки. Помимо этих составляющих во временном ряде может присутствовать масса относительно слабых, но **информативных «неслучайных» случайностей**, всегда попадающих в остатки. С физической точки зрения они могут быть результатом сложной, необязательно аддитивной композиции нескольких сигналов. В подавляющем большинстве случаев их декомпозиция невозможна. Поэтому анализ остатков требует подхода, в котором изучались бы **устойчивые особенности композиции компонент**, а не они сами. В этой связи в данном подходе особое значение придаётся тем параметрам в динамике исследуемого ряда, которые отражают характер взаимодействия компонент системы. Методика

должна давать возможность их обнаруживать и исследовать, посредством преобразования ряда в вид, **инвариантный по отношению к любым изменениям, за исключением связанных с характером взаимодействия компонент в системе.**

Суть предлагаемой универсальной методики для исследований сложной системы, представленной временными рядами, **сводится к совместному рассмотрению результатов, полученных различными методами и на разнообразном материале.** При этом большое число их вариантов и комбинаций принципиально необходимы, так как извлекаемая на каждом шаге информация даёт в совокупности значимый результат на заключительном этапе работы.

Весь процесс исследования условно можно разделить на два этапа. На первом из них к каждому из изучаемых рядов после их предварительной классификации многократно применяются элементарные операции, каждая из которых сводится к следующим шагам.

1. Ряд преобразуется соответственно одному из его характерных свойств. В частности, можно выявить точки локальных экстремумов для непрерывного ряда или, наоборот, ряд импульсных событий преобразовать в ряд частотных значений или построить его пульсационное представление.
2. Строятся характеристические кривые (портреты) для каждого ряда в целом.
3. Создаётся временная развёртка характеристической кривой (эволюционный портрет) для каждого ряда.
4. Временные особенности эволюционного портрета представляются в виде одного или нескольких временных рядов.

Сравнительный анализ полученных временных разверток и порожденных ими рядов производится на втором этапе, когда накапливается достаточное количество материала. Корреляция полученных данных может говорить о наличии общего фактора, специфически действующего на каждый компонент системы.

Под портретом (п.2) понимается функциональная взаимозависимость некоторых параметров ряда, представленная кривой (или семейством кривых), в которую не входит время как параметр. Его временная развертка (п.3) – это семейство портретов, каждый из которых построен на фиксированном временном диапазоне, последовательно заполняющем область задания исходного временного ряда. Эволюционный портрет показывает, как отражаемая им зависимость меняется во времени. В спектральном анализе

аналог портрета и его временной развертки - спектр мощности и динамический спектр.

В данном исследовании в качестве портретов использовались частотные гистограммы, полученные методом наложения эпох, обеспечивающие довольно низкое разрешение. Кроме того, представлен портрет с высоким разрешением, основанный на анализе распределения интервалов времени между событиями.

Реализация этой методики имеет поисковый характер и требует специфических средств, позволяющих оперировать большим объемом разнородных данных, методов их анализа и представления. Такое средство предоставляет интегральная компьютерная среда "BISER" [8]. Для подобных задач эта среда позволяет создавать рабочее пространство, ядром которого является понятийная база знаний. Построенное рабочее пространство структурирует, систематизирует и автодокументирует используемые методы, данные, проекты, выводы и промежуточные результаты.

III. Описанная методика тестируется на материале сейсмических и приливных процессов. Для этой цели были использованы детальные сейсмические данные [<http://www.iris.washington.edu/>] DMS IRIS, составившие 318 тысяч землетрясений с $M > 4$ с 1964 по 2000 год после усреднения всех событий в 300 километровой зоне в интервале 5 минут.

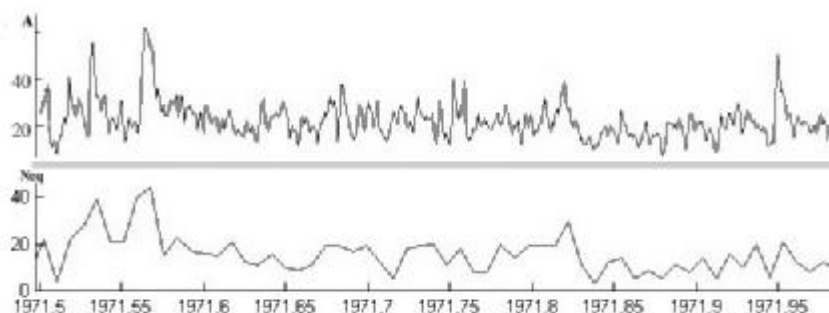


Рис.2 Часть ряда IRIS в виде гистограммы - внизу,верху - в виде суммы микропульсаций.

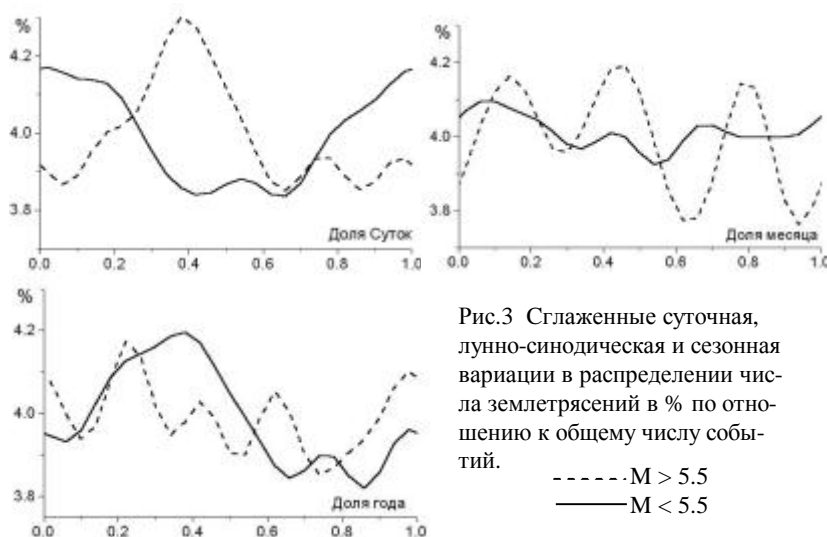
Сейсмические, приливные и атмосферно-нагрузочные процессы заведомо можно считать взаимообусловленными и, в свою очередь, отражаемыми в рядах ПВЗ [9]. В данной работе приливной процесс использовался

как фактор, позволяющий опробовать методику поиска синхронных событий в многопараметрических рядах.

Для предварительного анализа сейсмического ряда была построена его спектрограмма. Перед этим ряд был аппроксимирован суммой микропульсаций синусоидального (на полупериоде) вида с единичной амплитудой, длительность которых определялась средним интервалом между сейсмическими событиями, а их максимум располагался в центре каждого сейсмического события (рис.2). На данном этапе работы зависимость формы и амплитуды микропульсации от магнитуды землетрясения не рассматривалась.

Для такого непрерывного представления временного ряда уже можно воспользоваться спектральным анализом. Однако единственной характерной особенностью полученной спектрограммы явилась некоторая концентрация мощности спектра на частотах, близких к лунному месяцу. Поэтому методом наложения эпох из исходного ряда IRIS были выделены сезонная, лунная синодическая и суточная вариации сейсмического ряда (рис.3).

Слабая сезонность качественно синфазна с некоторыми метеорологическими и геодинамическими рядами. Выявление их физической обуслов-



ленности выходит за рамки данного этапа работы. Суточная составляющая для слабых землетрясений имеет частичное объяснение в сейсмическом шумовом фоне техногенного происхождения [10], а обнаруженная для более крупных землетрясений противофазная закономерность требует более

детального исследования. Представленная на рис.3 частотная суточная гистограмма для $M > 5.5$ может рассматриваться как портрет ряда и допускает временную развертку, приведенную на рис.4. Светлые тона на всех рисунках соответствуют большому количеству событий.

Видно, что суточная вариация имеет сильную и сравнительно плав-

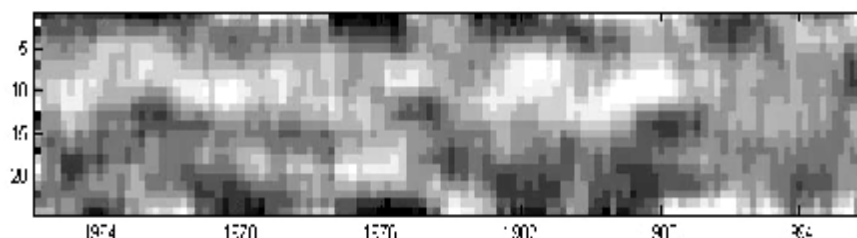


Рис. 4 Временная развёртка суточной вариации землетрясений по данным IRIS для $M > 5.5$.

ную динамику во времени, в ней иногда появляется полусуточная ветвь. Можно предположить, что обнаруженная закономерность **отражает влияние приливных сил на сейсмический процесс.**

Несмотря на то, что в характеристической кривой всего ряда явно не

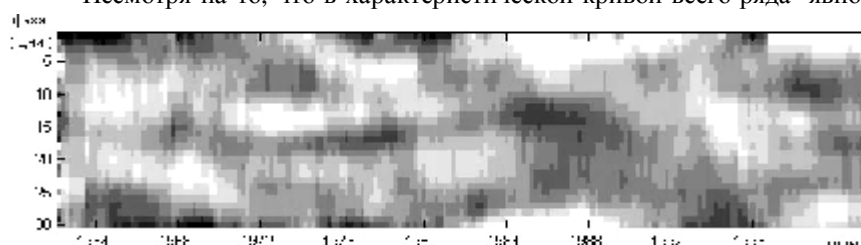


Рис.5 Временная развёртка синодической лунной вариации землетрясений по данным IRIS для всех магнитуд.

выделяется какой-либо фазы лунного цикла, её развертка (рис.5) **указывает на наличие некоторых выраженных особенностей**, что может говорить об их предполагаемой взаимосвязи. Если предположить, что **между воздействием и его откликом имеется задержка, соизмеримая с продолжительностью синодического месяца**, а сама величина этой задержки не одинакова у различных компонент ряда и не всегда постоянна, то результирующая картина фазовых вариаций может быть подобной представленной на рис.5.

IV. Обусловленность сейсмических событий приливным воздействием можно показать, используя в первом приближении зависимость сейсмических событий от фазы прилива в соответствующий момент времени.

Для моделирования приливного процесса использовалась вертикальная компонента приливообразующей силы, редуцированная до первого члена разложения [11]: $v = D(c/r)^3 (F_z + F_t + F_s)$. Здесь $D=2,6206 \text{ (м/сек)}^2$ – постоянная Дудсона для Луны (для Солнца $D_s=0.46D$), r – радиус-вектор и c – большая полуось орбиты приливообразующего тела, $F_{z, t, s}$ – соответственно зональная, тессеральная и секториальная составляющие приливообразующих сил от Луны и Солнца.

В полученных для равномерной сетки широт значениях v , были выявлены моменты значимых локальных экстремумов. Относительно них для всех сейсмических событий строился ряд фазовых значений и соответствующий фазовый портрет. Его временная развертка приведена на рис.6.

Так же как и на предыдущих эволюционных портретах видно **наличие**

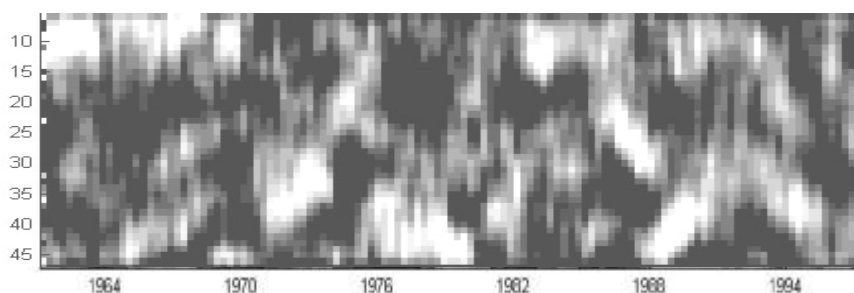


Рис.6 Временная развертка "приливного" фазового портрета, полученного по методике, описанной в тексте.

локальных фазово-временных вариаций, возможно определяемых спецификой отдельных процессов и областей, дающих вклад в общую картину. Поэтому следующим естественным шагом анализа данных должна быть предварительная селекция по регионам, глубинам и магнитудам землетрясений.

Представленные эволюционные портреты имеют невысокое временное разрешение, поскольку гистограммные портреты, лежащие в их основе, должны быть статистически значимыми, а значит, требуют достаточно большого временного лага. Они были выбраны для демонстрации в силу очевидности смысла отражаемой ими физической особенности. Далее предлагается алгоритм построения значительно более "экономного" портрета.

Вычисляются интервалы времени между N последовательными событиями. После их сортировки строится определённым образом нормированная зависимость величины интервала от его номера, исключается линейный тренд и полученная кривая слегка сглаживается. Этот портрет отражает соотношение между большими и малыми интервалами времени между событиями. Можно сказать, что портрет характеризует **тип потока событий**. Он связан с типом распределения совокупности интервалов между событиями, оставаясь **инвариантным к преобразованиям масштаба и сдвига** (дисперсии и среднего). Некоторые формы характеристической кривой можно интерпретировать, как наличие взаимозависимости между событиями. На базе данного портрета строится его временная развёртка.

Для отладки вышеизложенной методики использовался модельный ряд, состоящий из суммы двух пульсационных процессов (рис.7). Вероят-



Рис.7 Распределение событий в модельном ряду. События распределены случайно после момента 3000, до этого вероятность возникновения события связана положительной обратной связью с предшествующими событиями ($N=12$ точек).

ность возникновения пульсаций в каждом из них является некоторой функцией, зависящей от состояния остальных процессов. Эта функция определяется **изменяющимся в течение времени параметром, величина которого характеризует степень взаимообусловленности процессов**.

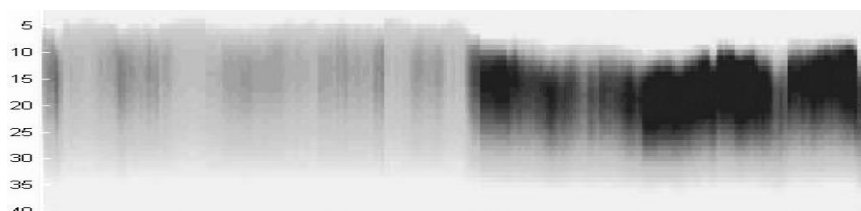


Рис.8 Эволюционный портрет модельного ряда на рис. 7.

Из рис.8 видно, что метод позволяет чётко выявить наличие взаимообусловленности моментов возникновения событий. Естественно поставить вопрос о взаимообусловленности сейсмических событий. Эволюционный портрет ряда IRIS (рис.9), построенный по вышеописанной методике, показывает, что на некоторых продолжительных диапазонах времени имеется их тенденция к кучности без изменения их средней плотности. Это может указывать на **присутствие в системе синхронизирующего фактора или автоколебательного процесса, не влияющих на общую интенсивность потока сейсмических событий.**

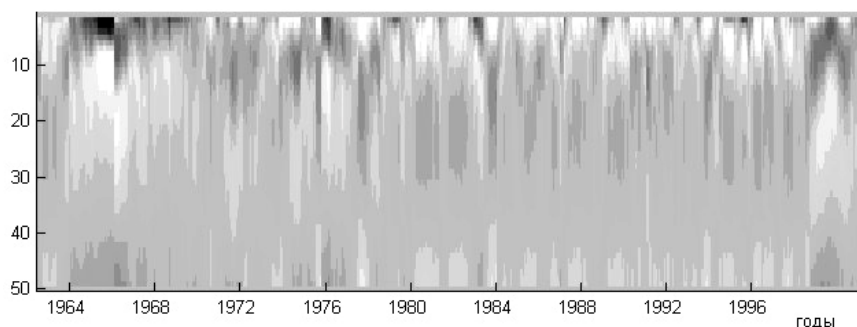


Рис.9 Анализ тем же методом ряда сейсмических событий IRIS ($M > 4.8$) с кластеризацией 5 дней и лагом 50 точек.

Временное разрешение предложенного эволюционного портрета достаточно высоко, что позволяет его сравнить с вэйвлет-разложением, а также использовать в комбинации с ним. На рис.10 представлен фрагмент (1970-1971 гг.) непрерывного вэйвлет-преобразования с анализирующим ядром “MexHat” для пульсационного представления ряда IRIS. Отчетливо выделяются структуры в широком масштабно-временном диапазоне. Несмотря на внешнюю структурную похожесть рис.9 и рис.10, соответствующие им объекты различаются принципиально. **Вэйвлет-представление отражает внешнюю масштабно-временную структуру ряда, а эволюционный портрет взаимообусловленности отображает его скрытую статистическую особенность.**

Можно поставить вопрос о **характере распределения** масштабно-временных структур, даваемых вэйвлет-разложением. (Например, выделить точки локальных экстремумов на двумерной плоскости непрерывного вэйвлет-преобразования и построить эволюционный портрет взаимообусловленности). Возможно и обратное: воспользоваться **вэйвлет-преобра-**

зованием эволюционного портрета, как инструментом для построения временного ряда отражаемой им особенности.

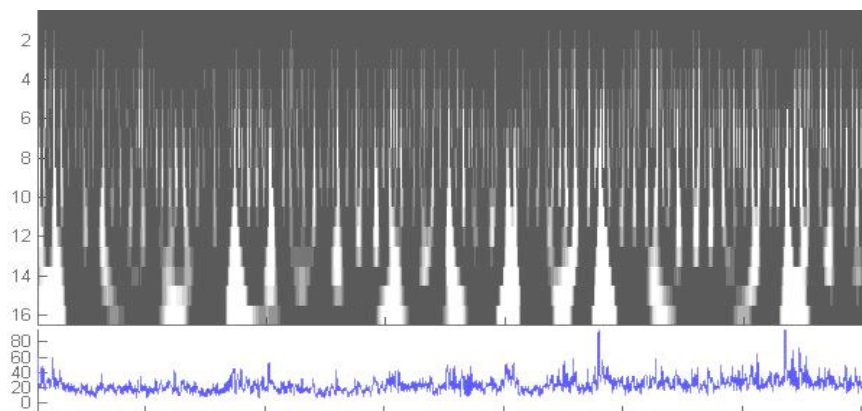


Рис.10 Результат непрерывного вэйвлет-разложения участка (70-71 гг.) пульсационного представления ряда IRIS ($M > 4.8$).

В данной части работы предложен подход для совместного исследования временных рядов. «Портретный» метод тестируется на примере совместной обработки сейсмического ряда и приливного процесса. В дальнейшей работе предполагается рассмотреть несколько различных геодинамических и атмосферных рядов. В частности, предполагается для сейсмических рядов подобрать адекватную модель пульсационного представления, использовать его пространственные параметры (3D-распределение сейсмических событий).

В заключение необходимо еще раз отметить, что главный результат “заявленной” программы работ (выявление общих структурно-функциональных особенностей геодинамической системы), может быть получен только на последней стадии исследования. Ясно, что рассмотренные типы портретов далеко не единственные, и методика предполагает их создание по мере необходимости. Кроме того, способ подготовки материала для сравнительного анализа не исчерпывается созданием эволюционного портрета. Существенно, что используемая в исследовании программная среда «BISER» позволяет ассимилировать любые методы и функции, возникающие в процессе работы.

Литература:

- [1] Манк У., Макдональд Д., 1964, *Вращение Земли*, М.: Мир, 384 с.
- [2] Zharov V.E., 1996, *Connection of the Earth's rotation with the atmospheric angular momentum and the strongest earthquakes*, Astron. and Astroph. Transactions, v. 9, p. 317-327.
- [3] Spada G., 1998, *Why are earthquakes nudging the pole towards 140E?*, Geophysical Res. Ltrs. Vol. 24, No. 5, p. 539.
- [4] Котляр П.Я., Ким В.Т., 1994, *Положение полюса и сейсмическая активность Земли*, Атлас, Новосибирск, с.125.
- [5] 1984-1998 IERS Annual Report, Obs. de Paris.
- [6] Гохберг М.Б. и др., 1995, *О механизме модуляции количества сильных землетрясений и частоты вращения Земли*, ДАН, т.341, №6, с. 813-815.
- [7] Holme R., 1999, *Electromagnetic core-mantle coupling –I.Explaining decadal changes in the length of day*, Geoph. J. Int., v. 132, 167-180.
- [8] Воротков М.В., Горшков В.Л., Миллер Н.О., 1998, *О возможности построения информационно-экспертной системы для астрометрии*, Изв. ГАО РАН, 213, с. 315-325.
- [9] Авсюк Ю.Н., *Приливные силы и природные процессы*, 1996, ОИФЗ РАН, Москва, 188 с.
- [10] Knopoff L., Gardner J., *Higher seismic activity during local night on the raw worldwide earthquake catalogue*, 1972, Geophys. J. R. astr. Soc., 28, 311-313.
- [11] Мельхиор П., 1975, *Физика и динамика планет*, т. 1, М.: Мир.

Evolutionary features of the geophysical time series:

-I. Tide process and seismic series

V.M.Vorotkov, V.L.Gorshkov

Summary

The new method of comparative study of the geophysical data of a various nature is offered. This approach is demonstrated on an example of the joint analysis of the seismic and tidal data in developed integrated software specially focused on support of similar procedures.