

Айгеноскопия в исследовании электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли

Л.В. Грунская, В.В.Исакевич, Д.В. Исакевич, Д.В. Рубай, И.А. Лещев, В.Е.Лукиянов, А.Н.Золотов, А.А.Кулиш

*Владимирский государственный университет имени А.Г. Столетова и Н.Г.Столетова
600000,г.Владимир,ул.Горького-87, grunsk@vlsu.ru*

Разработан программно - аналитический комплекс на основе метода собственных векторов и компонент сигнала для исследования структуры сигналов, вызванных подшумовыми периодическими процессами на примере лунно-солнечных приливов.

Developed software - analytical complex on the basis of the eigenvectors and the component of the signal to study the structure of the signals caused undernoise periodic processes on the example of lunar-solar tides.

Введение

Человек живет, работает и стремится постичь окружающий мир в условиях резонатора Земля-ионосфера, в его электродинамической системе. В таком резонаторе распространяются электромагнитные волны широкого частотного диапазона. Наибольший интерес представляет собой инфранизкочастотный диапазон (ИНЧ - ниже 30 Гц). В указанный диапазон вносят вклад земные и внеземные источники – грозовой фон, приливные процессы, спровоцированные Луной и Солнцем, космические ИНЧ процессы. Интерес к изучению электромагнитных полей инфранизкочастотного диапазона связан с их широким спектром физических механизмов возбуждения – от земных до космических.

Электромагнитное поле Земли (ЭМПЗ) представляет собой высокочувствительный вид переносчика информации о процессах земных и космических. Человек достаточно хорошо освоил возможности электромагнитных полей. Многие процессы в природе невозможно было бы изучить, не используя ЭМПЗ – это так называемые косвенные методы исследования, когда в электромагнитном поле Земли пограничного слоя атмосферы можно выделить воздействия земных и внеземных источников различной природы, когда прямыми методами обнаружение их практически невозможно (например, предвестники землетрясений).

Стремясь создать уникальные по конструкции и чувствительности приборы, мы не должны забывать о созданном самой природой «приборе», действительно уникальном по своей неповторимой «конструкции» и чувствительности – электромагнитном поле. Исследования в инфранизкочастотном диапазоне различных процессов требуют разнесенного в пространстве мониторинга электромагнитных полей, так как для достоверного обнаружения изучаемого ИНЧ процесса в таком частотном диапазоне его необходимо зарегистрировать на ряде разнесенных в пространстве (на сотни и тысячи километров) станциях.

Цели проводимых и обсуждаемых в данной работе исследований связаны с изучением структуры сигналов, вызванных такими геофизическими процессами в электромагнитном поле пограничного слоя атмосферы как лунные и солнечные приливы.

За период 1972-2015 годы создана система многоканального синхронного мониторинга электрического и геомагнитного полей на разнесенных в пространстве станциях: физический экспериментальный полигон ВлГУ; станция на оз. Байкал Института солнечно-земной физики СО РАН; станция в п. Паратунка (Камчатка),

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; станция в г. Обнинск на базе научно - производственного объединения «Тайфун». Формируются базы экспериментальных данных по разнесенным в пространстве станциям.

Метод анализатора собственных векторов и компонент сигнала (МАСВ и КС)

Одна из задач, поставленных при изучении вариаций электрического поля пограничного слоя атмосферы, связана с исследованием воздействия приливных процессов на электромагнитное поле. Выявление периодических составляющих с частотами лунных приливов во временных рядах вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы земли на первом этапе исследований было осуществлено с помощью классического метода спектрального оценивания [1]. Результаты показали, что воздействие приливных процессов на электромагнитное поле Земли является подшумовым процессом при отношении сигнал/шум не более 1-3, что явно недостаточно для достоверного обнаружения подобного воздействия. Дальнейшие исследования воздействия приливных процессов на электромагнитное поле Земли были осуществлены с использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала [1-7], показавшего свою эффективность при выделении из экспериментальных временных рядов энергетически не доминирующих периодических процессов. В данной статье исследовались три многолетних временных ряда (ВР) вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы станций: Душети (1976-1980 гг), Воейково (1966-1995 гг) и Верхняя Дуброва (1974-1995 гг).

Обработка информации проводилась с использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала (АСВ и КС) [1], структурная схема которого представлена на рис.1. На вход блока масштабирования 1 поступает анализируемый временной ряд; в блоке 2 вычисляется ковариационная матрица временного ряда на заданном интервале анализа; в блоке 3 производится вычисление собственных векторов ковариационной; в блоке 4 осуществляется анализ собственных векторов и спектра собственных значений — с целью выявления характерных признаков искомым физических явлений. Ковариационная матрица в блоке 2 вычисляется с использованием соотношения, в котором - так называемая траекторная матрица [2] - отрезки временного ряда, получаемые из временного ряда путем перемещения «кадра» с единичным шагом.

Ковариационная матрица в блоке 2 вычисляется с использованием соотношения

$$K = \frac{T^T \cdot T}{(N - M)}, \text{ в котором } T = [s_1; s_2; \dots; s_{M-1}; s_{N-M+1}] - \text{ так называемая траекторная}$$

матрица [2], $s_r, r = \overline{1: N - M + 1}$ - отрезки ВР длительностью M , получаемые из ВР $S_i, i = \overline{1: N}$ длительностью N путем перемещения «кадра» длительностью M с единичным шагом.

ВР на любом из $N - M + 1$ различных интервалов анализа длительности M может быть представлен в базисе собственных векторов ковариационной матрицы (образующих ортонормированный базис [3]), и определяемых соотношением $K \cdot \psi_i = \lambda_i \psi_i, i = \overline{1: M}$,

где K - ковариационная матрица, имеющая размер $M \times M$, ψ_i , λ_i - i -ый собственный вектор (СВ) и i -ое собственное значение (СЗ), соответственно.

Нетрудно показать, что средняя энергия сигнала, наблюдаемого на интервале

анализа, определяется соотношением $\tilde{\Theta}_M = \sum_{i=1}^M \lambda_i$. Собственные вектора, таким образом, представляют собой ортогональные, некоррелированные компоненты анализируемого на интервале M ВР, вносящие в среднюю энергию анализируемого сигнала относительный вклад $\tilde{\Theta}_{ОГН}^{(i)} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i}$. Последовательность СЗ λ_i упорядоченную по убыванию будем называть спектром собственных значений (ССЗ), а последовательность $\tilde{\Theta}_{ОГН}^{(i)}$ - нормированным спектром собственных значений (НССЗ).

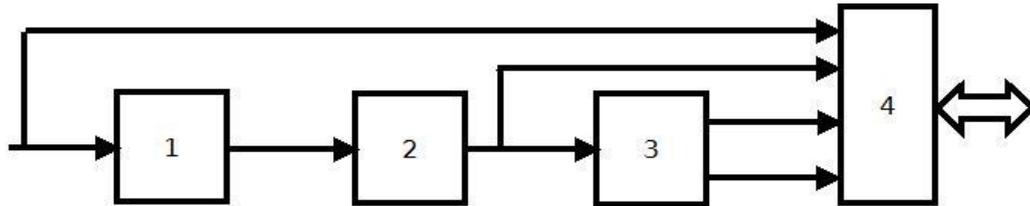


Рис.1. Структурная схема анализатора собственных векторов и компонент сигнала

АСВ и КС относятся к классу анализаторов с адаптивным базисом; базис, в котором осуществляется представление ВР (временной ряд) на конечном интервале анализа зависит от самого ВР. Нетрудно показать (с использованием известных теорем линейной алгебры [3]), что представление в базисе СВ (собственный вектор) при заданной точности представления ВР на интервале анализа требует наименьшего числа компонент, то есть обладает наибольшей выразительностью. При этом сами собственные векторы несут в себе информацию о структуре исследуемого ВР. Так, при наличии во ВР спектрально локализованных компонент, СВ будут содержать в себе эти компоненты, которые могут быть обнаружены с использованием стандартных средств спектрального анализа.

На рис.2а,б приведены примеры (в двойном логарифмическом масштабе) результатов использования классической квадратурной схемы для выявления спектральной составляющей с частотой солнечного прилива S1 (левая колонка) и частоты лунного прилива 2N2 (правая колонка) — для одного исследованного ВР. На каждом из графиков приведены три зависимости, а именно среднего квадрата, квадрата среднего и дисперсии спектральной оценки, построенных для различных интервалов анализа (для каждого интервала анализа ВР разбивался на части с длительностью, равной интервалу анализа, далее для каждого интервала строилась спектральная оценка и по выборке этих оценок строились средний квадрат, квадрат среднего и дисперсия). Как видно из графиков (левый ряд), выявление составляющей с частотой солнечного прилива не вызывает затруднений — средний квадрат асимптотически сходится к некоторому фиксированному значению, а дисперсия спектральной оценки монотонно падает с увеличением интервала спектрального анализа. Для составляющей с частотой лунного прилива 2N2 ситуация иная — по мере роста интервала анализа величина среднего квадрата монотонно убывает. Это означает, что когерентная составляющая, локализованная на частоте лунного прилива 2N2, отсутствует. Если составляющая не будет обнаружена с использованием АСВ и КС, то это будет означать полное отсутствие такой составляющей.

Анализ спектров собственных векторов на частотах приливов привел к выводу: амплитуда сигнала на частотах солнечных приливов по данным электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли по разнесенным в пространстве станциям остается стабильной при изменении интервала анализа (когерентный тип сигнала);

амплитуда сигнала на частотах лунных приливов по данным электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли по разнесенным в пространстве станциям уменьшается при увеличении интервала анализа (некогерентный тип сигнала).

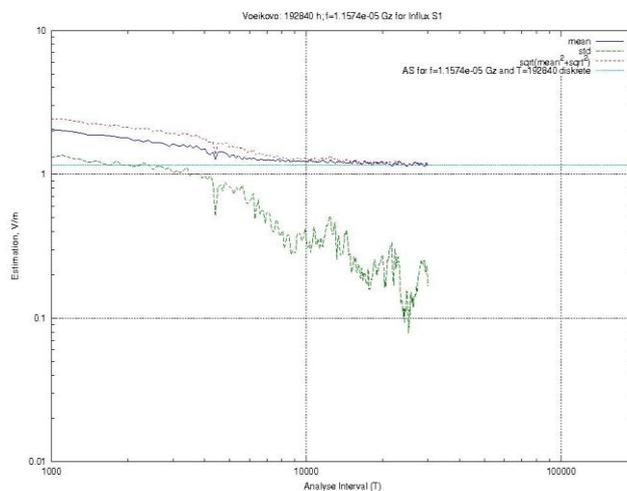


Рис.2.а. Результаты использования классической квадратурной схемы для выявления спектральной составляющей с частотой солнечного прилива S1(а- приливS1)

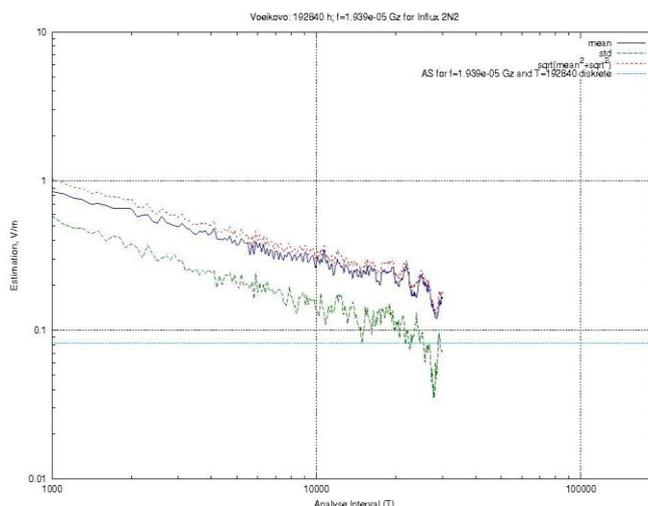


Рис.2.б. Результаты использования классической квадратурной схемы для выявления спектральной составляющей с частотой лунного прилива 2N2 (б- прилив 2N2)

Показано [4], что спектральный анализ СВ обладает большей чувствительностью чем классический спектральный анализ ВР, особенно в тех случаях, когда компоненты не являются абсолютно когерентными. АСВ и КС во многих случаях позволяет выявлять тип анализируемого ВР.

Использование АСВ и КС целесообразно в тех случаях, когда использование классической квадратурной схемы спектрального анализа вызывает затруднение в силу некогерентности анализируемых компонент временных рядов.

Результаты обнаружения воздействия лунных приливов на электрическое поле пограничного слоя атмосферы Земли с помощью МСВ и КС

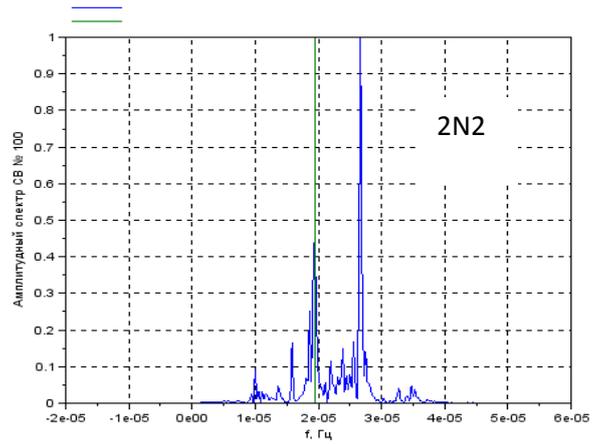
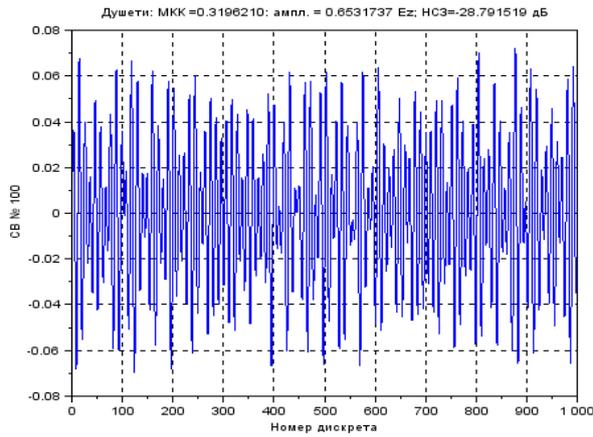
На рис. 3а, 3б, 3в приведены примеры собственных векторов и их амплитудных спектров для ряда лунных приливов по терм станциям наблюдения: Душети, Верхняя

Доброва, Воейково. В частности, на рис.3.а в качестве примера приведен собственный вектор лунного прилива ОО1, для которого значение критерия МКК (максимум коэффициента корреляции) оказалось максимальным (это СВ 134, для которого критерий МКК равен 0.30 — см. пятый столбец таблицы). Амплитудный спектр этого собственного вектора имеет максимум на частоте лунного прилива ОО1. Индекс когерентности (аналог отношения сигнал/шум) этого СВ составил 28 и как видно из рис.3.а этот СВ имеет сложную амплитудную модуляцию.

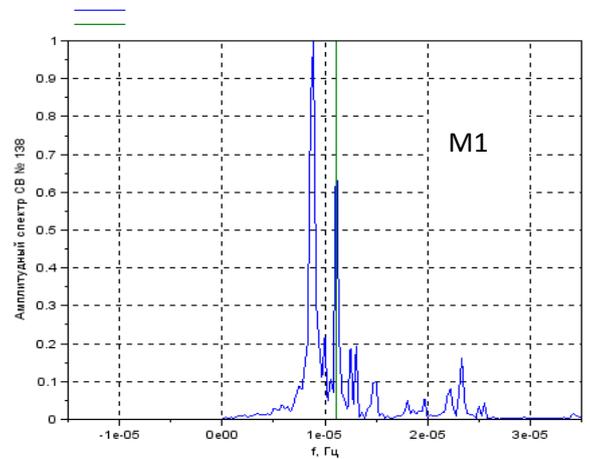
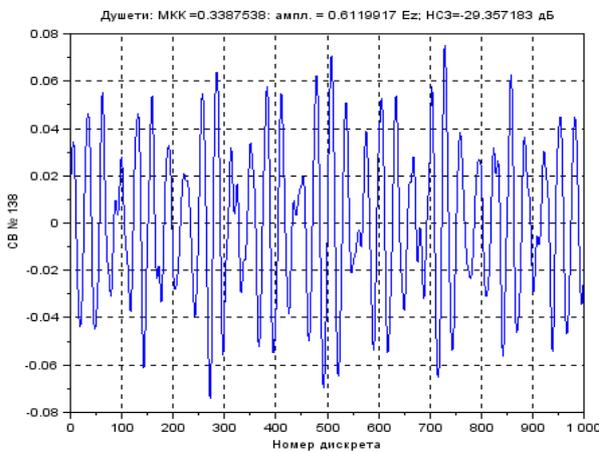
В таблице приведены данные о СВ, имеющих максимумы АС (амплитудный спектр) на частотах лунных приливов (с периодами, приведенными во втором столбце), отобранные по критерию МКК. Приведены данные только об одном СВ, имеющем максимальное значение критерия МКК. Для каждого такого СВ по величине его относительного СЗ (собственное значение) рассчитывалось действующее значение главной компоненты (путем умножения среднего квадрата значений ВР на квадратный корень из соответствующего значения нормированного спектра собственных значений). Как видно из шестого столбца таблицы, действующие значения спектрально локализованных на частотах лунных приливов спектральных компонент составляют от нескольких десятых В/м до 1 В/м. И вполне сопоставимы с амплитудами спектральных составляющих солнечных приливов. Амплитуды одноименных компонент хорошо согласовываются для ВР на различных станциях (диапазон для большинства лунных приливов не отличается более чем вдвое).

Таблица. Главные компоненты на частотах ряда лунных приливов

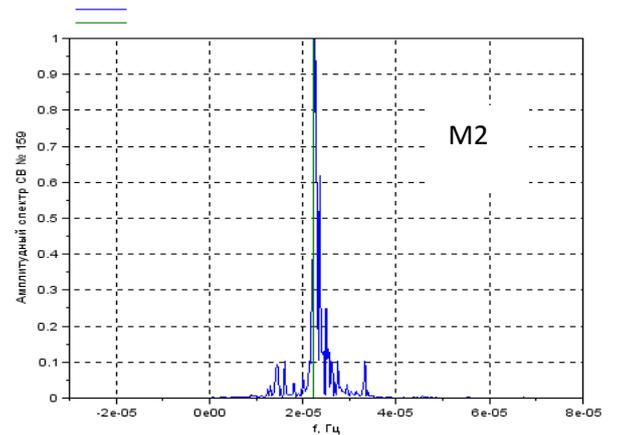
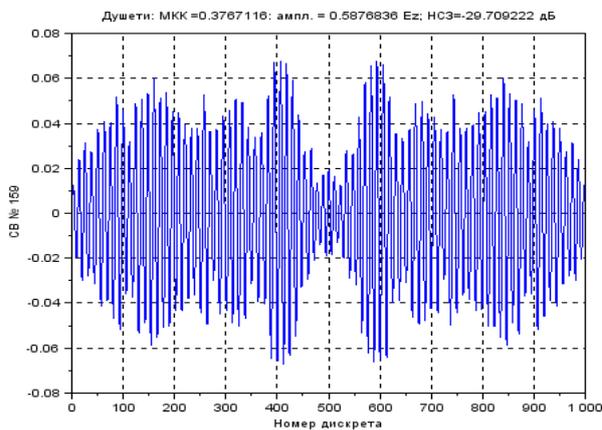
Прилив	Т (час)	Станция	Номер СВ	МКК	Амплитуда (В/м)	ИК
2N2	14,3261	Воейково	134	0.54	0.74	77.89
		Верхняя Дуброва	130	0.52	0.63	16.33
		Душети	107	0.39	0.65	31.59
L2	12,1991	Воейково	176	0.46	0.63	37
		Верхняя Дуброва	143	0.36	0.60	53
		Душети	127	0.37	0.62	49
M2	12,4(6)	Воейково	179	0.60	0.62	227
		Верхняя Дуброва	145	0.45	0.60	27
		Душети	131	0.40	0.61	32
N2	12,65	Воейково	167	0.49	0.65088	67
		Верхняя Дуброва	135	0.32	0.62	59
		Душети	131	0.38	0.61	58
O1	25,8176	Воейково	62	0.63	1.13	132
		Верхняя Дуброва	85	0.27	0.88	109



а



б



в

Рис. 3а,б,в Спектральный анализ собственных векторов: а) лунный прилив 2N2, б) лунный прилив M1, в) прилив M2. Слева - собственные вектора приливов, справа - спектры собственных векторов

Выводы

Разработан программно - аналитический комплекс (ПАК) для исследования структуры сигналов, вызванных подшумовыми периодическими процессами на примере лунно-солнечных приливов. ПАК собственных векторов и компонент сигнала

позволяет вычислять и анализировать собственные вектора и спектр собственных значений матрицы смешанных моментов сигнала, определять спектральный состав и статистические свойства отдельных собственных векторов, осуществлять разложение сигнала в подпространствах собственных векторов, отобранных по тем или иным признакам - с целью последующего анализа такого сигнала. Анализ собственных векторов открывает новые возможности при выявлении тонкой структуры сигнала и обнаружении новых физических эффектов и характеристик исследуемых объектов. Новизна разработанного метода состоит в том, что спектральному анализу подвергается не сам исходный временной ряд, а его собственные вектора, на которые он раскладывается, что позволяет применить спектральный анализ к отдельным некоррелированным составляющим временного ряда, связанным с определенными физическими процессами.

Использование метода собственных векторов может значительно повысить селективность любого известного метода анализа (в том числе и спектрального), поскольку последние будут применяться не ко всему временному ряду, а к его независимым составляющим, в том числе тем, которые не обладают энергетическим доминированием и представляют собой «тонкую» структуру временного ряда.

Анализ эффективности выявления в исследуемых временных рядах компонент, соответствующих приливным частотам, показал высокую эффективность метода собственных векторов, который обеспечивает пренебрежимо малую вероятность ложной тревоги при вероятности пропуска обнаруживаемых признаков на уровне 10^{-4} . Энергетический вклад собственных векторов, несущих информацию о частотах, соответствующих приливным процессам, выделенных в результате обработки экспериментальной информации, по электромагнитным полям составил -29,3 дБ (10^{-3}).

Отношение максимального значения амплитудного спектра у отобранных собственных векторов к его среднему значению – индекс когерентности (аналог отношения сигнал/шум) для электрического поля при выделении периодов, соответствующих солнечным и лунным приливам составляет в среднем 267-179. Уровень индексов когерентности на частотах лунных приливов позволяет сделать вывод о достоверном обнаружении приливных воздействий на земной электромагнетизм, что по сути до данных исследований не было в исследованиях по приливным эффектам сделано.

Оценки средних амплитуд электрического поля на частотах приливов совпадают по порядку с модельными оценками [5], что с одной стороны подтверждает адекватность разработанной ранее модели воздействия приливных процессов на электромагнитное поле пограничного слоя атмосферы Земли, с другой стороны говорят о возможностях метода собственных векторов.

Таким образом, использование метода спектрального анализа собственных векторов в многолетних временных рядах вертикальной составляющей электрического поля показало его эффективность для выявления периодических составляющих, связанных с лунными приливами.

Работа осуществлена при поддержке Государственного Задания 2014/13,2871, гранта РФФИ № 14-07-97510\14.

Литература

1. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала. Патент РФ на полезную модель №116242 от 30.09.2011.
2. <http://www.gistatgroup.com/gus/book1/algor.html>.

3. Кострикин А.И. Введение в алгебру. Часть 2. Линейная алгебра. МЦНМО, 2009.
4. Исакевич В.В., Д.В. Исакевич, Грунская Л.В., А.С. Батин, Л.Т. Сушкова Использование собственных векторов ковариационных матриц для обнаружения гармонических составляющих временных рядов // Известия института инженерной физики. –2012. – Т.17.- №3.- С. 45-50.
- 5.Грунская Л.В.,Морозов В. Н., Ефимов В. А., Золотов А.Н., Рубай Д. В., Закиров А. А. Мониторинг электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли// Монография Издатель: Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing. – ISBN: 978-3-659-32919-7. -2013 г, 192 с.
- 6.Грунская Л.В.,Батин, А.С., В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич, Л.Т. Сушкова Каскады дискриминантных функционалов в задачах анализа временных рядов в базисах собственных векторов ковариационных матриц //Нелинейный мир. Изд. Радиотехника. 2012. - №4. – С. 215-222.
- 7.Грунская Л.В., В.В. Исакевич, В.А. Ефимов, Л.Т. Сушкова, А.А. Закиров, Д.В. Рубай Решение задачи обнаружения лунных приливов в электрическом поле пограничного слоя атмосферы // Электромагнитные волны. Изд. Радиотехника. 2012. - №3.- С. 45-50.