

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
( Н И У « Б е л Г У » )

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА И АЛГОРИТМА  
ВЫДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ,  
ВЛИЯЮЩИХ НА СРЕДСТВА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН**

Магистерская диссертация  
обучающегося по направлению подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные  
технологии и системы связи,  
магистерская программа «Системы и устройства радиотехники и связи»  
очной формы обучения, группы 07001532  
Коновалова Павла Александровича

Научный руководитель  
докт. техн. наук, профессор.  
кафедры  
Информационно-  
телекоммуникационных  
систем и технологий  
НИУ «БелГУ»  
Мандрикова О.В.

Рецензент  
к.т.н., доцент, зав. кафедры  
Математического и  
программного обеспечения  
информационных сетей НИУ  
«БелГУ» Муромцев В. В.

БЕЛГОРОД 2017

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>3</b>
<b>ГЛАВА 1 ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ</b>	<b>6</b>
1.1 Эффекты комической погоды. Геомагнитное поле Земли	6
1.2 Типы вариаций магнитного поля Земли. Геомагнитные возмущения	7
1.3 Регистрация данных магнитного поля Земли	13
1.4 Параметры геомагнитного поля	14
1.5 Обзор существующих методов обработки и анализа геомагнитных данных	19
1.6 Анализ основных подходов к решению задачи	20
1.7 Вейвлет преобразование	22
1.8 Искусственные нейронные сети	27
<b>ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА</b>	<b>43</b>
2.1 Постановка задачи. Виды геомагнитных возмущений и рассматриваемые классы состояний поля Земли	43
2.2 Разработка метода оценки состояния околоземного пространства на основе вейвлет-преобразования и нейронной сети	46
2.3 Решающие правила и системы оценки состояния геомагнитного поля	54
2.4 Построение алгоритма на основе метода оценки состояния околоземного пространства	59
<b>ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ</b>	<b>66</b>
3.1 Результаты работы метода и оценка погрешностей его вычислительных алгоритмов	66
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>77</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>78</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b>	<b>83</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основой оценки свойств и состояния, электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве является изучение эффектов космической погоды, а именно геомагнитных возмущений. По состоянию на 2017 год, солнечная активность прошла минимальный период и снова начала возрастать. В период максимума, взрывной феномен, такой как солнечные вспышки часто возникает на поверхности солнца и возмущает магнитосферу и ионосферу Земли. Ионосфера – плазменный регион, простирающийся от 80 км до 1000 км – используемый человечеством как отражающий слой, для радиосвязи используя коротковолновый диапазон. В последние годы, космические шаттлы и многочисленные устройства существуют на орбите и над ионосферой. Спутниковые сигналы достигают земли, проходя через ионосферу, колебания электронной плотности ионосферы, возникающие в результате солнечной активности, существенно влияют на спутниковые сигналы, используемые для таких целей, как систем спутникового позиционирования. Резкое колебание электронной плотности ионосферы называется ионосферной бурей. В результате воздействия солнечной активности на околоземное космическое пространство, происходят магнитосферно-ионосферные возмущения различного масштаба и длительности, которые негативно воздействуют на современные технологические системы и состояние радиоэфира. Также они приводят к потере ориентации ИСЗ и проблемам с радиолокацией и негативно влияют на самочувствие людей. На Земле сильные магнитные возмущения называются магнитными бурями. Магнитные бури непосредственно воздействуют на два основных звена: на радиосвязь и на протяжённые линии электропроводников. Радиосвязь ухудшается в связи с тем, что радиоволнам значительно сложнее распространяться в условиях возмущений магнитного поля Земли. А нарушения в работе линий электропередач и подобных

коммуникаций связаны с возникновением, так называемых паразитных токов.

Поэтому поиск новых методов выделения эффектов космической погоды для прогнозирования магнитных бурь, является актуальным. В данной работе предлагается разработка метода и алгоритма выделения эффектов космической погоды с помощью использования дискретного вейвлет преобразования и нейронных сетей.

Поэтому целью данной магистерской диссертации является разработка метода и алгоритма выделения эффектов космической погоды, влияющих на функционирование навигационных и коммуникационных систем.

Для достижения цели магистерской диссертации поставлены следующие задачи:

1. По данным мониторинга космической погоды исследование процессов в околоземном пространстве, влияющих на стабильность работы технических систем
2. Разработка метода по обработке данных мониторинга космической погоды и выделению эффектов космической погоды
3. Разработка алгоритма по выделению эффектов космической погоды.
4. Реализация алгоритма с использованием средств MATLAB.
5. Апробация алгоритма, оценка погрешностей.

Объектом исследования являются переменное магнитное поле Земли в периоды спокойной и повышенной геомагнитной активности.

Предметом изучения являются методы и алгоритмы анализа данных мониторинга космической погоды, описывающие геомагнитные возмущения; H-компоненты магнитного поля Земли, Dst-вариации, Ae-индекс.

Научная новизна - автоматизированный метод анализа данных мониторинга космической погоды и выделения эффектов космической погоды, основанный на конструкции вейвлет-преобразования и вероятностных нейронных сетей.

Практическая значимость: разработанный автоматический метод может использоваться геомагнитными обсерваториями как в помощь эксперту для определения состояния магнитного поля Земли по геомагнитным данным.

Данная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Первая содержит общие сведения о причине возникновения магнитных бурь, методов обработки и анализа геомагнитных данных. Вторая глава посвящена постановки задачи и разработки метода и алгоритма анализа эффектов космической погоды и выделение, и оценка возмущений. В третьей главе приведены результаты работы предложенного метода и алгоритма. Четвертая часть включает экономический анализ. Также данная работа содержит: 90 страниц, 40 рисунков, 4 таблица, 23 формулы, 39 источников литературы. Реализация разработанного алгоритма в программной среде MATLAB приведено в приложении.

# ГЛАВА 1 ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

## 1.1 Эффекты космической погоды. Геомагнитное поле Земли

Под термином «космическая погода» обычно понимается совокупность явлений на Солнце, в верхней атмосфере, околоземном космическом пространстве и межпланетной среде, оказывающих воздействие на процессы в околоземном космическом пространстве. Первичным источником возмущений являются вариации солнечного излучения, а перенос возмущений осуществляется волнами и частицами в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли. Прежде всего, эти возмущения сказываются на тех процессах, в которых существенную роль играет установившееся равновесие электрических токов и магнитных полей. Возмущения, нарушающие это равновесие, могут привести к возникновению различных нештатных ситуаций не только в системах навигации, связи, электроэнергетики, но и таких, на первый взгляд слабо связанных отраслей, как тушение лесных пожаров, перекачка нефти по трубопроводам или здравоохранение.

Космическая погода – основной фактор, влияющий на работоспособность спутника, проявляющийся в различных формах:

Электростатический разряд или заряд на поверхности спутника, или изолированное воздействие, приводящее к временным или постоянным повреждениям бортовых

компьютеров и аппаратуры;

Эффект от накопленной дозы, приводящий к «старению» электронных компонентов и деградации солнечных панелей;

Расширение верхней атмосферы, приводящее к повышению торможения спутника, изменения орбиты, требующих дополнительных маневров.

Рассмотрим по подробнее один из эффектов космической погоды – геомагнитные поле земли.

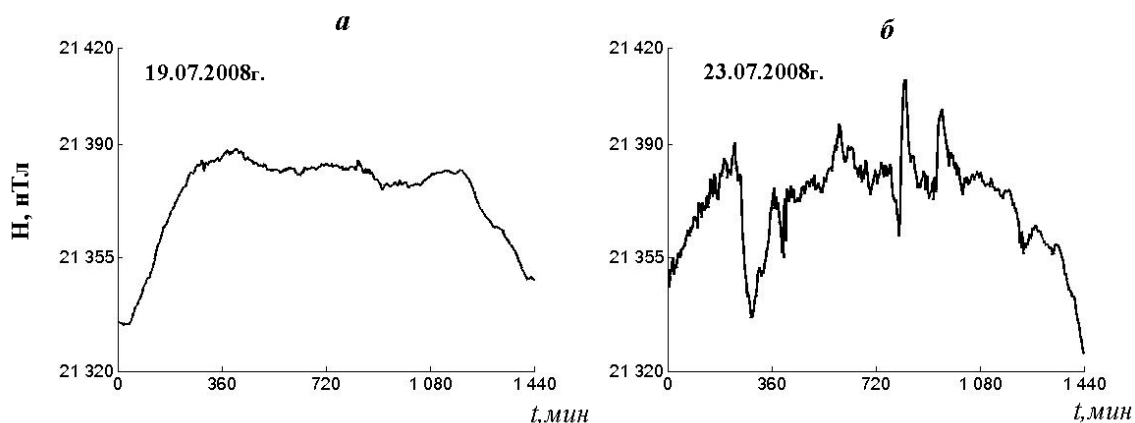
Земля обладает собственным магнитным полем, которое называют так же геомагнитным полем. Оно непрерывно меняется, как во времени, так и в пространстве. Магнитное поле Земли можно разделить на три составных части: 1. главное поле – постоянное (внутреннее) магнитное поле; 2. Локальное поле, так же называемое аномальным; 3. Переменное магнитное поле, обусловленное различными внешними факторами, так же называемое внешним.[1]

Источником главного магнитного поля является ядро Земли. Аномальное поле связано с намагниченностью горных пород в верхнем слое Земли, расположенных близко к поверхности. Переменное магнитное поле определяется внешними источниками и обязано своим происхождением токовым системам, развивающимся на высотах от ионосферы и до внешней границы магнитосферы

## **1.2 Типы вариаций магнитного поля Земли. Геомагнитные возмущения**

Длительное время непрерывная регистрация вариаций геомагнитного поля осуществляется в магнитных обсерваториях, где так же производятся регулярные абсолютные наблюдения, первичная обработка и анализ данных. Основным исходным материалом обсерваторий более 100 лет были магнитограммы - фотозаписи вариаций элементов геомагнитного поля. В последние десятилетия большинство обсерваторий перешло на цифровую систему получения и обработки данных, при которой

основной продукцией являются ежесуточные файлы минутных значений вариаций геомагнитного поля с привязкой данных к абсолютным наблюдениям. Внедрение новых цифровых технологий позволило повысить точность измерений и автоматизировать часть процессов получения и обработки информации. Перед магнитными обсерваториями ставится задача обеспечения погрешности наблюдений 0.2-0.5 нанотесл (не хуже 0.001%). Записи вариаций геомагнитного поля показывают, что в одни дни вариации имеют плавный характер и повторяемость, а в другие выглядят в виде беспорядочных колебаний с резкими изменениями амплитуд и периодов (рисунок 1.1). Первые вариации называются спокойными (рисунок 1.1 а), а вторые – возмущенными (рисунок 1.1 б). Периоды очень сильных иррегулярных вариаций принято называть магнитными бурями. Разнообразная структура вариаций геомагнитного поля говорит о сложных процессах, происходящих в околоземном космическом пространстве на высотах от ионосферы до внешней границы магнитосферы [2].



**Рисунок 1.1 - Данные регистрации H компоненты магнитного поля Земли ст. Паратунка ИКИР ДВО РАН**

Магнитная буря является откликом магнитосферы на внезапное увеличение динамического давления солнечного ветра. Она связана с интенсивным энерговыделением в магнитосфере и в ионосфере, которое контролируется главным образом величиной и направлением межпланетного магнитного поля. Главным проявлением магнитной бури является понижение геомагнитного поля.



Ни одна буря не повторяет другую и четкого критерия, какие возмущения следует относить к магнитной буре, пока не существует. Намного чаще на обсерваториях фиксируют периоды повышенной возмущенности, а сильные возмущения в это время ограничены широтами вблизи авроральной зоны (зона полярных сияний) (рисунок 1.2). Детально механизмы этих явлений еще не познаны, но основные принципы достаточно изучены. Когда на Солнце происходит мощная солнечная буря с интенсивным испусканием рентгеновского и ультрафиолетового излучений и выбросом частиц широкого диапазона энергий, то уже через 10 минут излучение может воздействовать на ионосферу, а через 40-50 часов ударная волна с плазмой пересекают земную орбиту. Если Земля оказывается в зоне действия потока, то от его ударной волны происходит внезапное сжатие магнитосферы. Магнитосфера становится неустойчивой, растут и затухают системы интенсивных электрических токов, вызывая магнитосферные возмущения в виде иррегулярных колебаний. В ионосфере происходит перераспределение токовых систем. На более низких широтах совокупность токов вызывает возрастание  $H$  компоненты на большей части ночной стороны планеты [3].

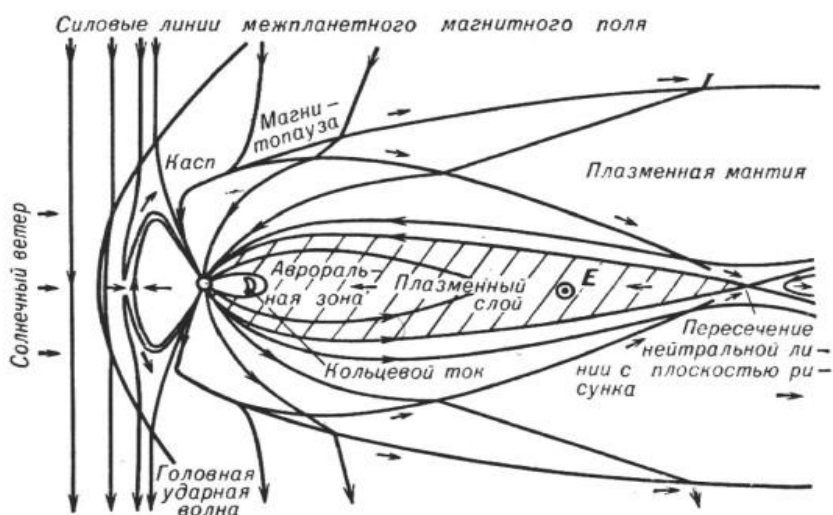


Рисунок 1.2 - Образование магнитосферы под действием солнечного ветра (вертикальное сечение) [28]

Нерегулярные флуктуации по всем элементам поля являются неотъемлемой частью любой магнитной бури. Они обладают широким

спектром периодов от долей минуты до нескольких часов. В средних широтах амплитуды горизонтальных компонент нерегулярных флуктуаций сравнимы между собой, в авроральных зонах они достигают нескольких тысяч нанотесл (нТл). В полярной шапке амплитуды элементов снова уменьшаются [5].

Изучение магнитных возмущений может способствовать пониманию основных процессов, связанных с солнечными бурями. В последние десятилетия резко увеличился объем исследований плазмы, магнитных и электрических полей в периоды геомагнитных возмущений, использующих наземные и спутниковые наблюдения. Сейчас надежно установлены основные особенности структуры магнитосферы (см. рисунок 1.3).

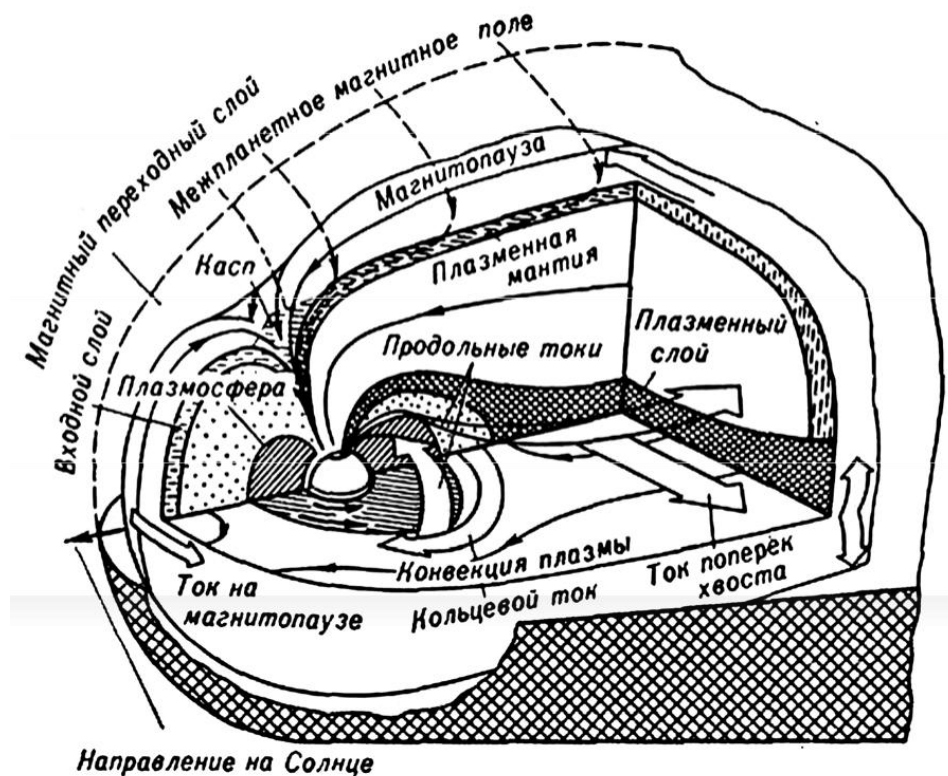


Рисунок 1.3 - Пространственное распределение плазмы, магнитных полей и электрических токов в магнитосфере Земли [27]

Светлыми широкими стрелками на рисунке 1.4 показаны токи на магнитопаузе и в плазменном слое, кольцевой и продольные токи. Тёмные стрелки указывают направление вращения плазмосферы совместно с

Землѐй. Показаны также направления конвекции в хвосте магнитосферы. Точками отмечена область кольцевого тока.

Набегающий на Землю солнечный ветер создает характерную структуру магнитосферы – сжатую солнечным ветром с дневной стороны и чрезвычайно сильно вытянутую в виде шлейфа с ночной стороны. Этот шлейф называется хвостом магнитосферы и состоит из двух половинок, долей – северной и южной. Доли хвоста разделены нейтральным слоем, где магнитное поле равно нулю. При обтекании магнитосферы плазма солнечного ветра затекает за границу магнитопаузы, образуя переходной слой, который на ночной стороне называется плазменной мантией. На дневной стороне в конфигурации магнитного поля Земли образуются две воронки – полярные каспы, через которые плазма солнечного ветра может непосредственно попадать в дневную ионосферу. На ночной стороне, в хвосте магнитосферы образуется магнитная ловушка, также заполненная горячей плазмой – плазменный слой. Эта плазма участвует в крупномасштабной магнитосферной конвекции в скрещенных полях, магнитном поле Земли и электрическом поле, созданным солнечным ветром [ 12].

Стали понятны некоторые основные процессы, протекающие в магнитосфере, но еще много остается нерешенных вопросов в понимании солнечно-земных явлений.

По мере изучения структуры и динамики токовых систем, ответственных за геомагнитные возмущения, удалось установить их определяющую роль во многих процессах внутри магнитосферы Земли. Для детального описания этих процессов необходимо все более точное знание свойств токовых систем с учетом их большой изменчивости. В работе показано, что вариации магнитного поля на поверхности Земли включают в себя следующие компоненты:

S – регулярная часть поля, возникающая из-за волнового излучения Солнца; ее статистическая аналогия – Sq (Solar quiet) - вариация: токовая система, возникающая на освещенной стороне Земли на высоте слоя E [28];

L – регулярная часть поля, возникающая из-за лунных приливов в верхней атмосфере, статистически выделяется методом наложения эпох по возможно большему периоду наблюдений, также приурочена к слою E, ее величина много меньше Sq-вариации [28];

DP – нерегулярная часть поля, возникающая из-за корпускулярного излучения Солнца, ее статистическая аналогия – Sd (Solar disturbed) вариация: основные токи развиваются в виде электроструй в зоне полярных сияний на высотах слоя E, и токов растекания по всей поверхности Земли; как правило, амплитуда Sd-вариации много больше Sq-вариации. Если Sq вариации определяют путем обработки наблюдений по 5 спокойным дням каждого месяца, то осреднение вариаций по 5 бурным дням дает Sd вариацию. Очевидно, что Sd вариация представляет собой некий усредненный образ суперпозиции многих источников возмущений, поэтому в современной физике магнитосферы исследования Sd вариаций не актуальны [28];

DR – поле кольцевого тока, существенно усиливающегося в период магнитных бурь планетарного масштаба, его аналогия – главная фаза; Dst (Disturbed storm-time) вариации: токи развиваются во внешней части радиационных поясов Земли, а их эффект наблюдается на всей поверхности Земли; в большинстве случаев амплитуда Dst-вариации сравнима с амплитудой Sd-вариации [27];

DCF – нерегулярная часть поля, возникающая из-за токов на поверхности магнитосферы при обтекании ее солнечным ветром, ее статистическая аналогия – начальная фаза Dst-вариации; хорошо выделяется по записям на магнитограммах обсерваторий в средних и низких широтах [28];

DT – поле токов в хвосте магнитосферы: токовые системы формируются в обеих долях хвоста магнитосферы, разделенного нейтральным слоем, и, по-видимому, замыкаются на высокоширотную ионосферу. До сих пор статистической аналогии не имеют, и их проявление на земле удастся заметить при определенных условиях в периоды сильных геомагнитных возмущений, наименее изученная часть поля вариаций [29].

Вклад каждой из перечисленных компонент поля существенно зависит от времени суток, сезона, географической и геомагнитной широты точки наблюдения, а также от состояния околоземного космического пространства. Но в целом можно сказать, что части поля S, DP и DR являются основными, ввиду их большой амплитуды и возможности четкого выделения .

В данной схеме остались неучтенными вариации магнитного поля, обязанные своим происхождением источникам токов совсем в удаленной магнитосфере, а также токам вдоль силовых линий магнитного поля. Так как амплитуда этих токов на поверхности Земли мала, их непосредственное выделение по магнитограмм на земле остается нерешенной методической проблемой. Кроме того, есть указания на существование регулярных вариаций магнитного поля вследствие геометрии открытой магнитосферы, так называемые эффекты «мирового времени». Ось магнитного диполя не совпадает с осью вращения Земли, и это дает свой эффект в вариациях магнитного поля Земли [7].

Из-за сильной изменчивости и нерегулярности переменного магнитного поля, во многих морфологических работах, посвященных изучению этих частей поля, оперируют их статистическими эквивалентами Sq и Dst. Статистический анализ дает большое усреднение, маскируя динамику возмущений, что связано с фильтрацией и сглаживанием данных при использовании среднечасовых значений.

### **1.3 Регистрация данных магнитного поля Земли**

Регистрацию геомагнитных данных с июня 1968 г. ведет Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН.

Измерения вариаций геомагнитного поля осуществляются с помощью феррозондовых магнитометров FRG – 601 G, расположенных в вариационном павильоне. Точность измерений напряженности магнитного поля Земли составляет 0.001 нТл. Для привязки меток времени применяют GPS приемник.

Обсерватория «Паратунка» расположена на юге Камчатского полуострова (52° 58.33' северной широты, 158° 00.2' восточной долготы) к западу от Авачинской бухты в долине, защищенной грядой невысоких сопков на высоте 50 м над уровнем моря. Вокруг участка, занимаемого обсерваторией, обширная площадь свободна от промышленных объектов и жилых застроек. В селе Паратунка отсутствуют крупные промышленные предприятия, электрифицированный транспорт, железные дороги. Все это определяет благоприятные условия для регистрации естественных геофизических полей без влияния индустриальных помех.

### **1.4 Параметры геомагнитного поля**

Изменение магнитного поля Земли во времени под действием различных факторов называются геомагнитными вариациями. Согласно наблюдениям, геомагнитные вариации непрерывно изменяются во времени, причем такие изменения часто носят периодический характер.

Спокойные солнечно-суточные вариации (Sq-вариации), представляют собой изменения элементов земного магнетизма с периодом, равным продолжительности солнечных суток. Основная причина Sq – волновое излучение Солнца, основной механизм – генерация токов вследствие динамо эффекта в слое E ионосферы. Как показывают наблюдения, Sq-вариация

элементов земного магнетизма не остается постоянной, сам ход её в определенных пределах меняется непрерывно от дня ко дню, при этом изменению подвержены главным образом амплитуды колебаний, фазы же остаются почти неизменными.

Анализ Sq-вариаций позволяет определить систему электрических токов, текущих над земной поверхностью в ионосфере и обычно осуществляется по пяти международным магнитоспокойным дням каждого месяца. Если в ночное время все элементы поля почти не испытывают изменений, то в дневное время форма вариации и амплитуда зависят от магнитной широты, сезона года и солнечной активности (см. рисунок 1.4) [27].

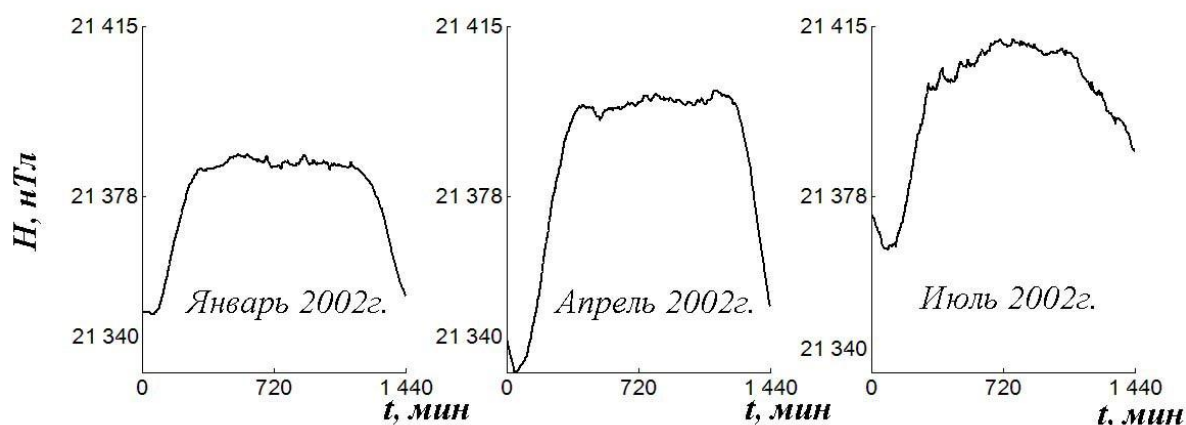
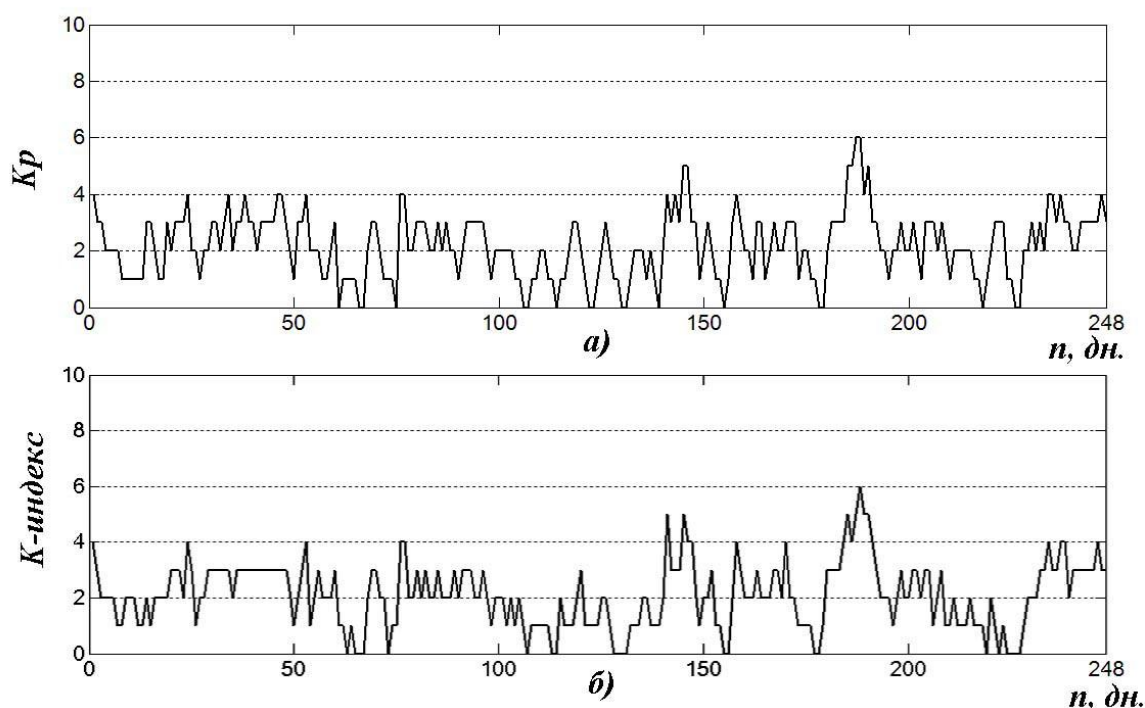


Рисунок 1.4 Спокойные суточные вариации по 5-ти спокойным дням ст. Паратунка ИКИР ДВО РАН [27]

Нерегулярные вариации магнитного поля возникают вследствие воздействия потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменений внутри магнитосферы и взаимодействия магнитосферы и ионосферы. Индексы геомагнитной активности предназначены для описания вариаций магнитного поля Земли, вызванных этими нерегулярными причинами. В настоящее время наиболее распространенными являются локальные индексы K и Q, а также планетарные индексы, определяемые по сети магнитных обсерваторий, – Kp, Dst и AE [15].

K-индекс был введен Дж. Бартельсом в 1938 г. и представляет собой значения от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала мирового времени

(рисунок 1.6). К-индекс вычисляется по данным конкретной обсерватории за трехчасовой интервал времени. Для вычисления индекса берется изменение магнитного поля по компонентам Н и D за трехчасовой интервал, из него вычитается регулярная часть, определяемая по спокойным дням, и полученная величина по специальной таблице переводится в К-индекс. Кр-индекс – это усредненное по 13 магнитным обсерваториям значение К-индекса. До сих пор Кр-индекс является наиболее широко используемым индексом и представляет собой численную характеристику степени возмущенности магнитного поля [15].



**Рисунок 1.5 - К-индекс за Март 2007г: а) планетарный К-индекс; б) К-индекс вычисленный обсерваторией ИКИР ДВО РАН [15]**

Величина проекции напряженности земного магнитного поля Н на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли или Н-компонента. Направление этой составляющей принимается за направление магнитного меридиана, а вертикальная плоскость, проходящая через него, называется плоскостью магнитного меридиана.

Считается, что при К-индексе в пределах от 0 до 3 магнитное поле спокойное или мало возмущено, при К-индексе от 3 до 5 магнитное поле



возмущено, при К -индексе 6 и более считается, что происходит магнитная буря [13].

Q-индекс был введен Бартельсом и Фукушимой в 1956 г. Этот индекс характеризует интенсивность ионосферных токовых систем над высокоширотной станцией и является максимальным отклонением от спокойной суточного хода одной из двух горизонтальных компонент D или H в 15-минутном интервале [13].

Dst-индекс был предложен М. Сугиурой и С. Чепменом вначале 50-х годов как мера интенсивности кольцевого тока (DR), усиливающегося в магнитосфере взрывным образом во время магнитных бурь. На земной поверхности кольцевой ток приводит к уменьшению горизонтальной составляющей магнитного поля, наибольшей в низких широтах. Вычисляется Dst-индекс как усредненная величина возмущений, отсчитываемых от спокойного уровня по данным четырех магнитных обсерваторий: Какиока, Гонолулу, Сан-Хуан, Херманус. Процедура вывода Dst-индекса описана в (Sugiura, Kamei, 1991). На каждой станции для каждого часа мирового времени определяется величина возмущения магнитного поля, связанного с состоянием межпланетной среды. Для этого, из горизонтальной компоненты магнитного поля, измеряемого на каждой станции вдоль меридиана (H компонента), исключаются вековые вариации геомагнитного поля ( $H_{base}$ ) и солнечно-суточная вариация Sq, порожденная ионосферной двухвихревой токовой системой расположенной в окрестности полуденного меридиана. Dst определяется как среднее по долготе возмущение, приведенное к экватору ( $\lambda$  – долгота обсерватории).  $D(T) = H(T) - H_{base}(T) - Sq(T)$  – величина возмущения на каждой станции [8].

Геомагнитный индекс Dst содержит информацию о планетарных возмущениях во время геомагнитных бурь. Локальные возмущения в авроральной зоне характеризуются индексом K, пропорциональным суммарной мощности магнитного возмущения на данной магнитной станции за трехчасовой интервал суббури.

Для определения К-индекса вычисляется площадь отрицательного участка Н-компоненты за три часа, всего 8 измерений за сутки. Значению К присваивается величина от 0 до 9, с промежуточными значениями (например, 5-, 5, 5+). Затем для получения глобального Кр индекса производится усреднение индексов локальных станций с определенным весом для каждой станции. Кроме трехчасовых, вычисляется суммарный за сутки и производный от него эквивалентный амплитудный используются для оценки геомагнитной активности в авроральной зоне в целом. Связь между К и А индексами задается таблицей: АЕ-индекс. Однако для изучения процессов суббури трехчасовой индекс не годится, за это время суббурия может начаться и закончиться. Детальную структуру флуктуаций магнитного поля из-за токов авроральной зоны (*авроральная электроструя*) характеризует индекс авроральной электроструи АЕ. Для вычисления индекса АЕ используются *магнитограммы Н-компонентов* обсерваторий, расположенных на авроральных или субавроральных широтах и равномерно распределенных по долготе. В прошлом использовались данные обсерваторий, расположенных между 60 и 64° с.ш. и в южном полушарии на -63,8, -65,8 и -70,6°, которые восполняли пробел по долготе. Возмущение  $\Delta H$  вычисляется каждые 2,5 мин или каждую минуту как отклонение от базисной линии, соответствующей спокойному периоду на каждой станции. Затем проводится наложение  $\Delta H$ , вычисленных для всех станций. В настоящее время индексы АЕ вычисляются по данным 12 обсерваторий, расположенных в северном полушарии на разных долготах между 60 и 70° геомагнитной широты [13].

Максимум положительной (верхней) амплитуды Н называется индексом AU, а максимум отрицательной (нижней) амплитуды называется индексом AL. Физически индекс AU представляет наибольшее магнитное возмущение, связанное с восточной электроструей в послеполуночном секторе, а AL - наибольшее магнитное возмущение, связанное с западной электроструей в утреннем секторе. Иногда

индексы  $AU$ , и  $AL$  используются отдельно, так как вечерняя и утренняя электроструи могут быть независимыми. В солнечно-земных исследованиях используется индекс  $AE = AU - AL$ , представляющий собой разность между верхним и нижним пределами т. е. суммарный размах магнитных флуктуаций в  $\Delta H$ . Индекс  $AE$  приводится в *гаммах (наноТеслах)* для интервалов 1-2,5 мин, и для часовых интервалов. Индексы магнитной активности можно получить из Мирового центра данных C2, расположенного в г. Киото, Япония ( World Data Center for Geomagnetism, Kyoto) .

В 1966 году Т. Дэвисом и М. Сугиурой был введен  $AE$ - индекс как амплитудная характеристика полярных геомагнитных возмущений. В современной физике магнитосферы  $AE$ -индекс широко используется для описания магнитосферных возмущений.

### **1.5 Обзор существующих методов обработки и анализа геомагнитных данных**

Сегодня методика обработки геомагнитных компонентов включает в себя как независимую обработку данных, так и совместный (многомерный) анализ всей совокупности компонентов. В качестве элементов вектора признаков для процедуры классификации можно использовать как качественные, так и количественные характеристики процесса.

Процедуру анализа геомагнитного сигнала можно разбить на следующие взаимозависимые этапы:

Оценка погрешностей, вносимых рядом факторов различной природы. С целью уменьшения влияния этих факторов производится фильтрация полученных экспериментальных данных.

Для анализа устойчивых изменений производят процедуру сглаживания и используют базовые модели временных рядов: в

виделинейной комбинации трендов, колебаний относительно тренда, построении линии регрессии, и случайного шума.

Традиционные методы моделирования имеют ограничения и позволяют изучить отдельные низкочастотные вариации параметров магнитного поля, но не дают информации о локальных изменениях, протекающих в физическом процессе, что влечет потерю информации о динамике возмущений. Поэтому, содержащиеся в регистрируемых геомагнитных данных негладкие локальные структуры, несущие главную информацию об исследуемом процессе, делают неэффективным применение традиционных методов анализа геомагнитных данных.

В последнее время для проведения анализа геомагнитных данных все чаще используют вейвлет-преобразования, что позволяет выделить как долгопериодные вариаций, так и коротко периодичные вариации магнитного поля Земли, что невозможно было реализовать спектральными методами.

Таким образом, несмотря на разнообразие существующих методов и подходов, задача обработки и анализа геомагнитных данных является очень сложной. Это связано:

1) с большим разнообразием и достаточно сложной формой сигнала: хотя методы спектрального анализа формально применимы для оценки периодических изменений компонент ряда, но в данном случае наличие в сигналах резких пикообразных вариаций компонентов и ступенеобразных особенностей ставят под сомнение эффективность используемых методов;

2) с отсутствием адекватных математических моделей: традиционная процедура сглаживания, которую принято использовать для облегчения процесса построения модели, влечет потерю и искажение информации.

## **1.6 Анализ основных подходов к решению задачи**

Спокойные вариации магнитного поля Земли определяются системой электрических токов, текущих над земной поверхностью в ионосфере на

высоте слоя E. Для изучения характерного (спокойного) хода используют Sq-кривую, которая может быть представлена виде суммы компонент:  $S + L$ , где  $S$  – регулярная часть поля, возникающая из-за волнового излучения Солнца,  $L$  – регулярная часть поля, возникающая из-за лунных приливов в верхней атмосфере [27].

Возмущенные вариации определяются токами на магнитопаузе, кольцевыми токами, и токами хвоста магнитосферы, возникающими в периоды магнитных бурь. Для изучения возмущенных вариаций используют Dst-вариацию, которая может быть представлена в виде суммы составляющих:  $DR + DT + DCF$ .

В период магнитной бури геомагнитные возмущения представляют собой суперпозицию практически всех известных источников токов. В вариациях геомагнитного поля в эти моменты времени наблюдаются резкие выбросы и пульсации разных частотных спектров, периодов.

Существующие способы вычисления Sq основаны на операции сглаживания, что дает больше усреднение данных и приводит к потере важной информации о динамике возмущений в сигнале. Анализ геомагнитных данных, основанный на Sq- и Dst- вариациях, имеет следующие недостатки:

1. Невозможность идентификации геомагнитных пульсаций представляющих собой короткопериодные колебания геомагнитного поля, которые несут полезную информацию о протекающих процессах в геомагнитном поле.
2. Отсутствие возможности построения модели в режиме реального времени.
3. Отсутствие адекватных автоматических методов вычисления Sq-кривой.

Учитывая нерегулярную структуру геомагнитных данных, наличие локальных особенностей различной формы и длительности наиболее подходящим пространством для их представления является пространство,

натянутое на базис смещенных функций или вейвлет-базис. Предложенная методика стала возможной благодаря возникшей сравнительно недавно математической конструкции, названной вейвлет-преобразованием. В данном случае речь идет о дискретном вейвлет-преобразовании, позволяющем раскладывать произвольный сигнал на компоненты. Структура вейвлет-разложения сигнала позволяет отделить высокочастотные локальные участки нестационарности, провести их анализ и классификацию: для получения лучшей частотной локализации и проведения более детального анализа удобно использовать конструкцию вейвлет-разложение. Полученное таким образом представление сигнала имеет многокомпонентную структуру, включающую аппроксимирующие и детализирующие составляющие [28].

При этом в отличие от традиционных методов сглаживания многокомпонентная конструкция не только является устойчивой к локальным выбросам, но и эффективно идентифицируют эти структурные особенности. Разномасштабные флуктуации попадают в детализирующие компоненты. Это позволяет детально исследовать структуру сигнала, выявлять и классифицировать как локальные структурные компоненты, так и глобальные крупномасштабные составляющие. Также, выбор базиса вейвлет-разложения позволяет гибко подойти к решаемой проблеме, обеспечивая наилучшие условия выделения полезной информации.

Применение современных методов аппроксимации сигналов, основанных на разложении функции по базису, в данном случае позволит избежать потери и искажения информации, и даст возможность эффективно реализовать процедуру идентификации предложенной выше модели.

## **1.7 Вейвлет-преобразование**

Определение.

Вейвлет-преобразование (ВП) одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций:

$$Wf(a,b) = \int f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1.1)$$

сконструированных из материнского (исходного) вейвлета  $\psi(t)$ , обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени ( $b$ ) и изменения временного масштаба ( $a$ ). Множитель  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего числа  $a$ . Для заданных значений параметров  $a$  и  $b$  функция  $Wf(a,b)$  и есть вейвлет, порождаемый материнским вейвлетом  $\Psi(t)$ .

Главные признаки вейвлета.

В качестве базисных функций, образующих ортогональный базис, можно использовать широкий набор вейвлетов. Для практического применения важно знать признаки, которыми непременно должна обладать исходная функция, чтобы стать вейвлетом. Приведем здесь основные из них [21].

Ограниченность. Квадрат нормы функции должен быть конечным:

$$\|\Psi\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1.2)$$

Локализация. ВП в отличие от преобразования Фурье использует локализованную исходную функцию и во времени, и по частоте. Для этого достаточно, чтобы выполнялись условия:

$$|\Psi(t)| \leq C(1+|t|)^{-1-\varepsilon} \quad \text{и} \quad |S_{\Psi}(\omega)| \leq C(1+|\omega|)^{-1-\varepsilon} \quad \text{при} \quad \varepsilon < 0. \quad (1.3)$$

Нулевое среднее. График исходной функции должен осциллировать (быть знакопеременным) вокруг нуля на оси времени и иметь нулевую площадь:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (1.4)$$

Из этого условия становится понятным выбор названия «вейвлет» – маленькая волна.

При непрерывном изменении параметров  $a$  и  $b$  для расчета вейвлет-спектра необходимы большие вычислительные затраты. Множество функций  $Wf(a,b)$  избыточно. Необходима дискретизация этих параметров при сохранении возможности восстановления сигнала из его преобразования [22].

Кратномасштабные аппроксимации.

Последовательность замкнутых подпространств  $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$  из  $L^2(\mathbb{R})$  образуют кратномасштабный анализ (КМА), если выполняются следующие свойства:

$$\begin{aligned} \forall (j,k) \in \mathbb{Z}^2 \quad f(t) \in V_j &\Leftrightarrow f(t - 2^j k) \in V_j, \\ \forall (j,k) \in \mathbb{Z}^2 \quad V_{j+1} &\subset V_j, \\ \forall (j,k) \in \mathbb{Z}^2 \quad f(t) \in V_j &\Leftrightarrow f\left(\frac{t}{2}\right) \in V_{j+1}, \end{aligned} \tag{1.5}$$

$$\lim_{j \rightarrow +\infty} V_j = \bigcap_{j=-\infty}^{+\infty} V_j = \{0\},$$

$$\lim_{j \rightarrow +\infty} V_j = \text{замыкание} \left( \bigcap_{j=-\infty}^{+\infty} V_j \right) = L^2(\mathbb{R}),$$

Существует функция  $\theta$  такая, что семейство  $\{\theta(t-n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$  есть базис Рисса  $V_0$ .

Кратномасштабные приближения вычисляют аппроксимацию сигналов с различными разрешениями с помощью проекции на разные пространства  $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ . Приближение функции  $f$  с разрешением  $2^{-j}$  определяется дискретной решеткой отчетов, которая обеспечивает локальные средние  $f$  в окрестностях, пропорциональных  $2^j$ . Поэтому кратномасштабная аппроксимация состоит из набора решеток аппроксимации. Более формально приближение функции с разрешением  $2^{-j}$  определяется как ортогональная



проекция на пространство  $V_j \subset L^2(\mathbb{R})$ . Ортогональная проекция  $f$  есть функция  $f_j \in V_j$ , которая минимизирует  $\|f - f_j\|$ .

Кратномасштабная конструкция используется для обработки дискретных данных. В этом случае, имея дискретные значения функции  $f_j$  (т.е. значения функции на сетке с разрешением  $2^{-j}$ ), в качестве пространства выборки рассматривают подпространство масштаба  $j$

$$V_j = \text{clos}_{L^2(\mathbb{R})}(\phi(2^j t - n)), \quad (1.6)$$

где функция  $\phi$ , порождающая подпространства  $V_j$  своими сдвигами и растяжениями, называется масштабирующей функцией. Она играет особую роль в конструкции кратномасштабного анализа. От свойств этой функции зависят такие важные свойства вейвлета  $\Psi$  как величина носителя и гладкость [21].

Полагая, что  $j=0$ , т.е. пространство исходного дискретного сигнала  $f_j(t_n)$  есть  $V_0 = \text{clos}_{L^2(\mathbb{R})}(\phi(2^0 t - n)), n \in \mathbb{Z}$ , используя разложение получаем его отображение в пространства  $V_{-1}$  и  $W_{-1}$ :

$$V_0 = V_{-1} \oplus W_{-1}.$$

где  $\oplus$  - ортогональная сумма.

Сигнал будет иметь представление  $f_0(t) = g_{-1}(t) + f_{-1}(t)$ .

Ортогональная проекция сигнала  $f_0(t)$  на подпространство  $V_{-1}$  дает на компоненту  $f_{-1}(t)$ , которая задается скалярных произведений  $f_0(t)$  с функциями из ортонормированного базиса  $V_{-1}$ , т.е. величинами

$$c_n^{-1} = \left\langle f_0(t), 2^{-1/2} \phi\left(\frac{t}{2} - n\right) \right\rangle = \left\langle \sum_n f_n \phi(t - n), \sum_l h_l \phi(t - l) \right\rangle = \sum_s h_s f_{2n+s}. \quad (1.7)$$

В качестве компоненты  $g_{-1}(t)$  рассматривают компоненту сигнала  $f_0(t)$ , ортогональную к пространству  $V_{-1}$ . Базисом пространства  $W_{-1}$  является набор

вейлет-функций  $\left\{ 2^{-1/2} \Psi\left(\frac{t}{2} - n\right) \right\}$ , где  $\Psi\left(\frac{t}{2}\right) = \sqrt{2} \sum_n q_n \phi(t - n)$ . Коэффициенты  $q_n$

имеют вид  $q_n = (-1)^n h_{1-n}$ . Проекция сигнала на подпространство  $W_{-1}$  задается набором скалярных произведений  $f_0(t)$  с функциями  $\Psi$ :

$$d_n^{-1} = \left\langle f_0(t), 2^{-1/2} \Psi\left(\frac{1}{2} - n\right) \right\rangle = \sum_s q_s f_{2n+s}, \quad (1.8)$$

что равносильно свертке с фильтром  $q^*$  и прореживанию вдвое.

Таким образом, процедура разложения сигнала на две компоненты заключается в выполнении двух операций свертки и прореживанию вдвое. Одна операция осуществляется с фильтром  $h^*$ , это фильтр, пропускающий низкие частоты, тем самым осуществляющий сглаживание сигнала и выделение аппроксимирующей компоненты сигнала. Эту компоненту называют так же сглаженной компонентой сигнала. Вторая операция осуществляется с фильтром  $q^*$ . Это фильтр, пропускающий высокие частоты, тем самым выделяющий высокочастотную компоненту сигнала. Эту компоненту называют так же детализирующей компонентой сигнала. Фильтры являются парой зеркальных квадратурных фильтров [19].

Описанная вычислительная процедура называется в вейвлет-теории алгоритмом разложения, она работает на любом масштабе и, в случае ортогональности базиса, позволяет выполнить разложение сигнала на ортогональные компоненты по схеме

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1}. \quad (1.9)$$

Если эту процедуру разложения выполнить для сигнала  $f_0(t)$   $m$  раз, то получим следующую схему разложения:

$$V_0 = W_{-1} \oplus W_{-2} \oplus \dots \oplus W_{-m} \oplus V_{-m}, \quad (1.10)$$

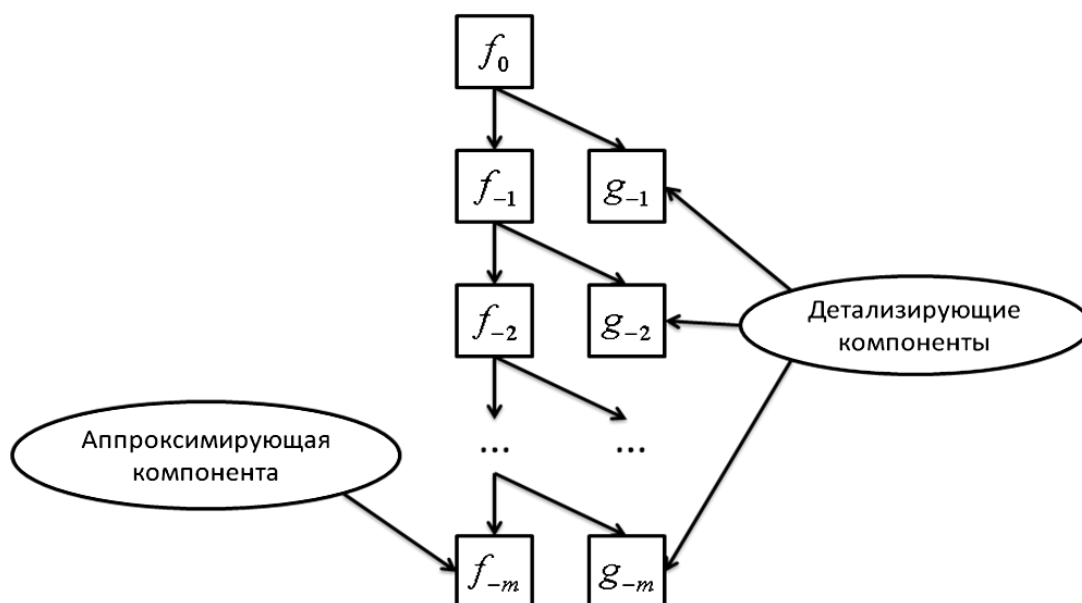
где  $W_j, V_j$  это есть пространства масштаба  $j$  с разрешением  $2^{-j}$ .

В результате исходный сигнал  $f_0$  будет иметь представление в виде суммы компонент:

$$f_0(t) = g_{-1}(t) + g_{-2}(t) + \dots + g_{-m}(t) + f_{-m}(t), \quad (1.11)$$

где  $g_j \in W_j, f_i \in V_i$ .

На рисунке 1.6 представлена схема представления сигнала  $f_0$  на основе конструкции кратномасштабных аппроксимаций.



**Рисунок 1.6 - Схема представления сигнала  $f_0$  на основе конструкции кратномасштабных аппроксимаций**

Каждая компонента (1.8) единственным образом определяется последовательностями коэффициентов  $\bar{d}^j = \{d_n^j\}_{n \in \mathbb{Z}} \in W_j$  и  $\bar{c}^{-m} = \{c_n^{-m}\}_{n \in \mathbb{Z}} \in V_{-m}$ :  
 $d_n^j = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ ,  $c_n^{-m} = \langle f, \phi_{-m,n} \rangle$ .

Коэффициенты  $\bar{d}^j$  определяют детализирующие компоненты сигнала. Коэффициенты  $\bar{c}^{-m}$  соответствуют аппроксимирующей компоненте сигнала.

## 1.8 Искусственные нейронные сети

Основные понятия.

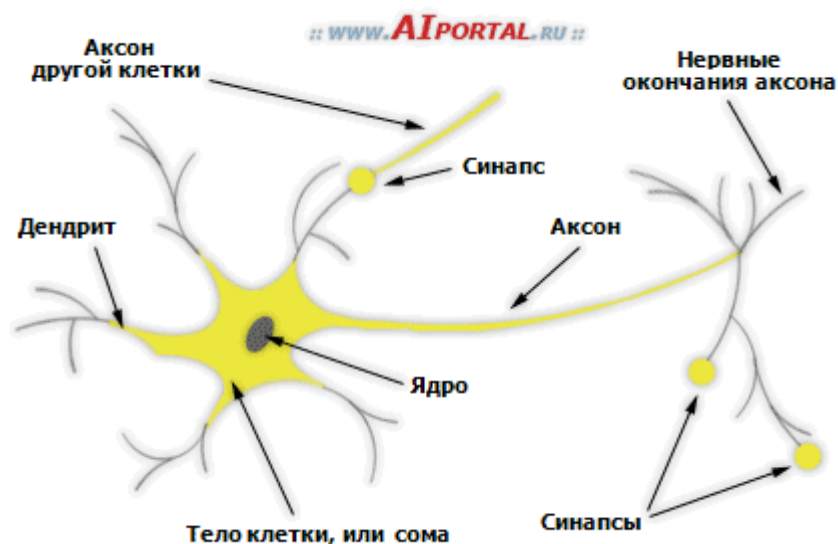
Нейронные сети – это одно из направлений исследований в области искусственного интеллекта, основанное на попытках воспроизвести нервную систему человека. А именно: способность нервной системы обучаться и исправлять ошибки, что должно позволить смоделировать, хотя и достаточно грубо, работу человеческого мозга.

Нейронная сеть или нервная система человека – это сложная сеть структур человека, обеспечивающая взаимосвязанное поведение всех систем организма.

Биологический нейрон – это специальная клетка, которая структурно состоит из ядра, тела клетки и отростков. Одной из ключевых задач нейрона является передача электрохимического импульса по всей нейронной сети через доступные связи с другими нейронами. При этом, каждая связь характеризуется некоторой величиной, называемой силой синаптической связи. Эта величина определяет, что произойдет с электрохимическим импульсом при передаче его другому нейрону: либо он усилится, либо он ослабится, либо останется неизменным.

Биологическая нейронная сеть обладает высокой степенью связности: на один нейрон может приходиться несколько тысяч связей с другими нейронами. Но, это приблизительное значение и в каждом конкретном случае оно разное. Передача импульсов от одного нейрона к другому порождает определенное возбуждение всей нейронной сети. Величина этого возбуждения определяет реакцию нейронной сети на какие-то входные сигналы. Например, встреча человека со старым знакомым может привести к сильному возбуждению нейронной сети, если с этим знакомым связаны какие-то яркие и приятные жизненные воспоминания. В свою очередь сильное возбуждение нейронной сети может привести к учащению сердцебиения, более частому морганию глаз и к другим реакциям. Встреча же с незнакомым человеком для нейронной сети пройдет практически незаметной, а значит и не вызовет каких-либо сильных реакций [39].

На рисунке 1.7 представлена упрощенная модель биологической нейронной сети:



**Рисунок 1.7 - Упрощенную модель биологической нейронной сети**

Каждый нейрон состоит из тела клетки, которое содержит ядро. От тела клетки ответвляется множество коротких волокон, называемых дендритами. Длинные дендриты называются аксонами. Аксоны растягиваются на большие расстояния, намного превышающее то, что показано в масштабе этого рисунка. Обычно аксоны имеют длину 1 см (что превышает в 100 раз диаметр тела клетки), но могут достигать и 1 метра.

В 60-80 годах XX века приоритетным направлением исследований в области искусственного интеллекта были экспертные системы. Экспертные системы хорошо себя зарекомендовали, но только в узкоспециализированных областях. Для создания более универсальных интеллектуальных систем требовался другой подход. Наверное, это привело к тому, что исследователи искусственного интеллекта обратили внимание на биологические нейронные сети, которые лежат в основе человеческого мозга.

Нейронные сети в искусственном интеллекте – это упрощенные модели биологических нейронных сетей.

На этом сходство заканчивается. Структура человеческого мозга гораздо более сложная, чем описанная выше, и поэтому воспроизвести ее хотя бы более менее точно не представляется возможным.

У нейронных сетей много важных свойств, но ключевое из них – это способность к обучению. Обучение нейронной сети в первую очередь

заключается в изменении «силы» синаптических связей между нейронами. Следующий пример наглядно это демонстрирует. В классическом опыте Павлова, каждый раз непосредственно перед кормлением собаки звонил колокольчик. Собака достаточно быстро научилась ассоциировать звонок колокольчика с приемом пищи. Это явилось следствием того, что синаптические связи между участками головного мозга, ответственными за слух и слюнные железы, усилились. И в последующем возбуждение нейронной сети звуком колокольчика, стало приводить к более сильному слюноотделению у собаки[38].

На сегодняшний день нейронные сети являются одним из приоритетных направлений исследований в области.

Свойства нейронных сетей.

1. Обучение. Искусственные нейронные сети могут менять свое поведение в зависимости от внешней среды. Этот фактор в большей степени, чем любой другой, ответствен за тот интерес, который они вызывают. После предъявления входных сигналов (возможно, вместе с требуемыми выходами) они самонастраиваются, чтобы обеспечивать требуемую реакцию. Было разработано множество обучающих алгоритмов, каждый со своими сильными и слабыми сторонами. Все еще существуют проблемы относительно того, чему сеть может обучиться и как обучение должно проводиться.

2. Обобщение. Отклик сети после обучения может быть до некоторой степени нечувствителен к небольшим изменениям входных сигналов. Эта внутренне присущая способность видеть образ сквозь шум и искажения жизненно важна для распознавания образов в реальном мире. Она позволяет преодолеть требование строгой точности, предъявляемое обычным компьютером, и открывает путь к системе, которая может иметь дело с тем несовершенным миром, в котором мы живем. Важно отметить, что искусственная нейронная сеть делает обобщения автоматически благодаря

своей структуре, а не с помощью использования «человеческого интеллекта» в форме специально написанных компьютерных программ.

3. Абстрагирование. Некоторые из искусственных нейронных сетей обладают способностью извлекать сущность из входных сигналов. Например, сеть может быть обучена на последовательности искаженных версий буквы «А». После соответствующего обучения предъявление такого искаженного примера приведет к тому, что сеть породит букву совершенной формы (в данном случае букву «А»). В некотором смысле она научится порождать то, что никогда не видела. Способность извлекать идеальные прототипы является у людей весьма ценным качеством[37].

4. Применимость. Искусственные нейронные сети не являются панацеей. Они, очевидно, не годятся для выполнения таких задач, как начисление заработной платы, однако они незаменимы в большом классе других задач, с которыми плохо или вообще не справляются обычные вычислительные системы.

Классификация нейронных сетей.

Классификация нейронных сетей представлена на рисунке 1.8



**Рисунок 1.8 - Классификация нейронных сетей**

Классификация нейронных сетей по характеру обучения делит их на:

- 1) Нейронные сети, использующие обучение с учителем;
- 2) Нейронные сети, использующие обучение без учителя.

Обучение с учителем предполагает, что для каждого входного вектора существует целевой вектор, представляющий собой требуемый выход. Вместе они называются обучающей парой. Обычно сеть обучается на некотором числе таких обучающих пар. Предъявляется входной вектор, вычисляется выход сети и сравнивается с соответствующим целевым вектором. Далее веса изменяются в соответствии с алгоритмом, стремящимся минимизировать ошибку. Векторы обучающего множества предъявляются последовательно, вычисляются ошибки и веса подстраиваются для каждого



вектора до тех пор, пока ошибка по всему обучающему массиву не достигнет приемлемого уровня.

Обучение без учителя является намного более правдоподобной моделью обучения с точки зрения биологических корней искусственных нейронных сетей. Развита Кохоненом и многими другими, она не нуждается в целевом векторе для выходов и, следовательно, не требует сравнения с predetermined идеальными ответами. Обучающее множество состоит лишь из входных векторов. Обучающий алгоритм подстраивает веса сети так, чтобы получались согласованные выходные векторы, т. е. чтобы предъявление достаточно близких входных векторов давало одинаковые выходы. Процесс обучения, следовательно, выделяет статистические свойства обучающего множества и группирует сходные векторы в классы [38].

По настройке весов нейронные сети классифицируются на:

сети с фиксированными связями – весовые коэффициенты нейронной сети выбираются сразу, исходя из условий задачи;

сети с динамическими связями – для них в процессе обучения происходит настройка синаптических весов.

По типу входной информации нейронные сети классифицируются на:

аналоговые – входная информация представлена в форме действительных чисел;

цифровые (двоичные) – вся входная информация в таких сетях представляется в виде нулей и единиц.

Применяемая модель нейронной сети

Сети прямого распространения – все связи направлены строго от входных нейронов к выходным. К таким сетям относятся, например: простейший персептрон (разработанный Розенблаттом) и многослойный персептрон.

Рекуррентные нейронные сети – сигнал с выходных нейронов или нейронов скрытого слоя частично передается обратно на входы нейронов входного слоя.

Радиально-базисные функции – вид нейронной сети, у которой скрытый слой состоит из радиальных элементов, а выходной слой из линейных элементов. Сети этого типа компактны и быстро обучаются. Радиально-базисная сеть обладает следующими особенностями: один скрытый слой, только нейроны скрытого слоя имеют нелинейную активационную функцию и синаптические веса входного и скрытого слоев равны единицы [37].

Самоорганизующиеся карты или Сети Кохонена – такой класс сетей, как правило, обучается без учителя и успешно применяется в задачах распознавания. Сети такого класса способны выявлять новизну во входных данных: если после обучения сеть встретится с набором данных, непохожим ни на один из известных образцов, то она не сможет классифицировать такой набор и тем самым выявит его новизну. Сеть Кохонена имеет всего два слоя: входной и выходной, составленный из радиальных элементов.

Функции активации в нейронных сетях.

Для того, чтобы определиться с условными обозначениями, приведем ниже следующую модель искусственного нейрона (рисунок 1.9):

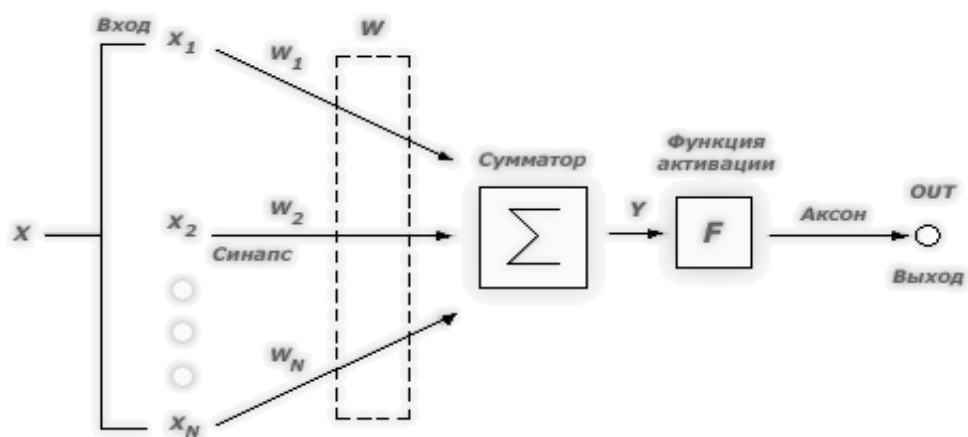


Рисунок 1.9 - Модель искусственного нейрона

В данной модели нейрона можно выделить три основных элемента:

1) Синапсы, каждый из которых характеризуется своим весом или силой. Осуществляют связь между нейронами, умножают входной сигнал  $x_i$  на весовой коэффициент синапса  $w_i$ , характеризующий силу синаптической связи;

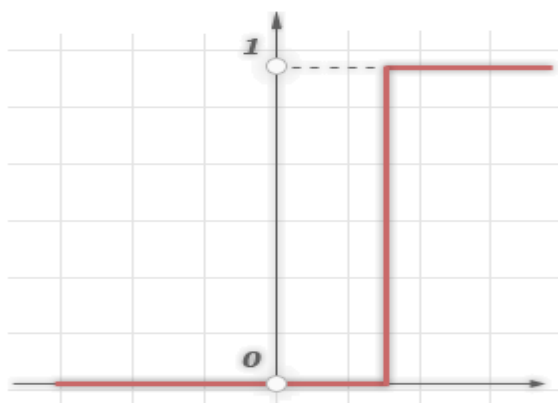
2) Сумматор, аналог тела клетки нейрона. Выполняет сложение внешних входных сигналов или сигналов, поступающих по синаптическим связям от других нейронов. Определяет уровень возбуждения нейрона;

3) Функция активации, определяет окончательный выходной уровень нейрона, с которым сигнал возбуждения (торможения) поступает на синапсы следующих нейронов.

Функция активации (активационная функция, функция возбуждения) – функция, вычисляющая выходной сигнал искусственного нейрона. В качестве аргумента принимает сигнал  $Y$ , получаемый на выходе входного сумматора  $\Sigma$ . Наиболее часто используются следующие функции активации.

1. Единичный скачок или жесткая пороговая функция (рисунок 1.10).

Простая кусочно-линейная функция. Если входное значение меньше порогового, то значение функции активации равно минимальному допустимому, иначе – максимально допустимому.



**Рисунок 1.10 - Функции активации: единичный скачок или жесткая пороговая**

2. Линейный порог или гистерезис (рисунок 1.11).

Несложная кусочно-линейная функция. Имеет два линейных участка, где функция активации тождественно равна минимально допустимому и максимально допустимому значению и есть участок, на котором функция строго монотонно возрастает.

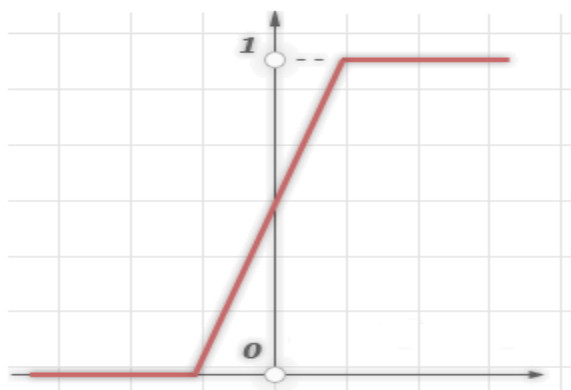


Рисунок 1.11 - Функция активации: линейный порог или гистерезис

### 3. Сигмоидальная функция или сигмоид (рисунок 1.12).

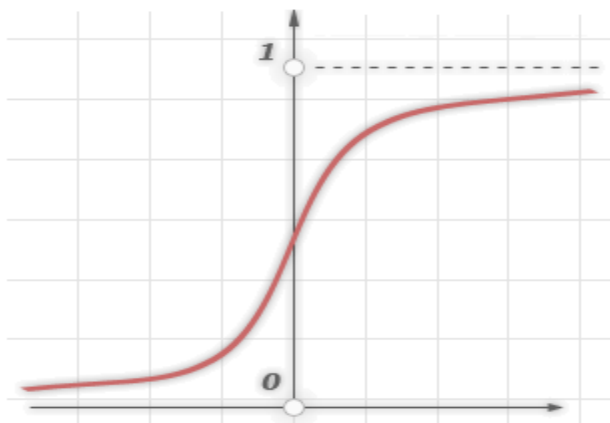
Монотонно возрастающая всюду дифференцируемая S-образная нелинейная функция с насыщением. Сигмоид позволяет усиливать слабые сигналы и не насыщаться от сильных сигналов. Гроссберг (1973 год) обнаружил, что подобная нелинейная функция активации решает поставленную им дилемму шумового насыщения.

Слабые сигналы нуждаются в большом сетевом усилении, чтобы дать пригодный к использованию выходной сигнал. Однако усилительные каскады с большими коэффициентами усиления могут привести к насыщению выхода шумами усилителей, которые присутствуют в любой физически реализованной сети. Сильные входные сигналы в свою очередь также будут приводить к насыщению усилительных каскадов, исключая возможность полезного использования выхода. Каким образом одна и та же сеть может обрабатывать как слабые, так и сильные сигналы?

Примером сигмоидальной функции активации может служить логистическая функция, задаваемая следующим выражением:

$$OUT = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha Y)} \quad (1.12)$$

где  $\alpha$  – параметр наклона сигмоидальной функции активации. Изменяя этот параметр, можно построить функции с различной крутизной.

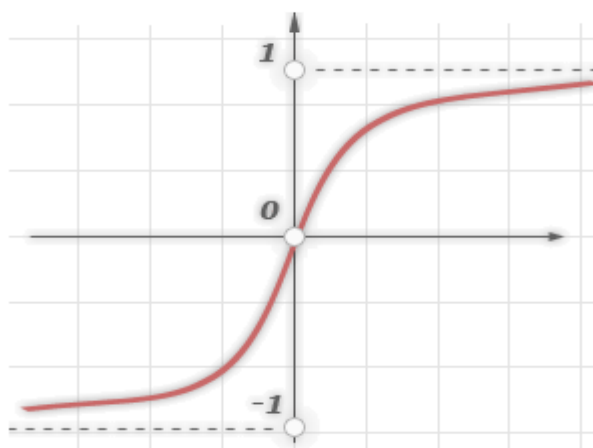


**Рисунок 1.12 - Сигмоидальная функция активации или сигмоид**

Еще одним примером сигмоидальной функции активации является гиперболический тангенс (рисунок 1.13), задаваемая следующим выражением:

$$OUT = th\left(\frac{Y}{\alpha}\right) \quad (1.12)$$

где  $\alpha$  – это параметр, влияющий на наклон сигмоидальной функции.



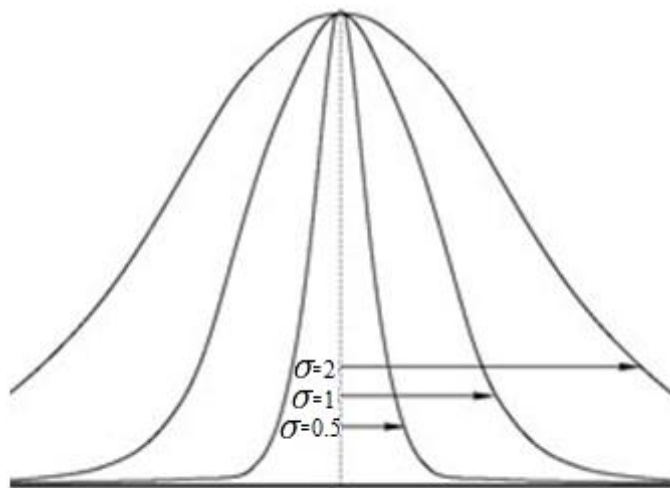
**Рисунок 1.13 - Сигмоидальная функция активации: гиперболический тангенс**

#### 4. Радиально-базисные функции.

Разработанная искусственная нейронная сеть, использует в качестве активационных функций радиально-базисные (также называются RBF-сетями). Общий вид радиально-базисной функции:

$$f(x) = \phi\left(\frac{x^2}{\sigma^2}\right), \quad (1.13)$$

например (рисунок 1.14),



**Рисунок 1.14 - Радиально-базисная функции активации: Гаусса**

$$f(x) = e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}, \quad (1.14)$$

где  $x$  — вектор входных сигналов нейрона,

$\sigma$  — ширина окна функции,

$\phi(y)$  — убывающая функция (чаще всего, равная нулю вне некоторого отрезка).

Функции активации типа единичного скачка и линейного порога встречаются очень редко и, как правило, используются на учебных примерах. В практических задачах почти всегда применяется сигмоидальная функция активации.

Сети радиальных базисных функций.

Сети радиальных базисных функций (Radial Basis Functions, RBF-сети) представляют собой специальный тип нейронных сетей с прямыми связями. Основное их назначение — аппроксимация и интерполяция многомерных функций для решения, в частности, задач прогнозирования. Они были

предложены в 1985 году Повелом. Их математическую основу составляет теория аппроксимации и интерполяции многомерных функций. Сколь угодно точная аппроксимация функций достигается при этом путем комбинации радиально симметричных функций [38].

RBF-сети обладают рядом характерных свойств:

1. Их архитектура – это архитектура сетей с прямыми связями первого порядка (FF-сети): связи от нейронов одного слоя к нейронам следующего слоя;

2. Быстрое обучение;

3. Отсутствие «патологий» сходимости. например, не возникает проблемы локальных минимумов;

4. Более длительное время их подготовки и настройки из-за необходимости выполнения более сложных расчетов;

5. RBF-сети - хорошие аппроксиматоры функций.

RBF-сети имеют только один слой скрытых нейронов. На рисунке 1.15 показана структура RBF-сети. Она содержит один входной слой, один скрытый слой нейронов, число которых обычно соответствует числу элементов в обучающей последовательности, и один выходной слой из одного (на рисунке 1.15 представлен именно такой случай) или нескольких нейронов. На рисунке 1.15 единственный выходной нейрон выдает значение функции:

$$y = f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1.15)$$

Таким образом, по своему построению RBF-сети – это двухслойные FF-сети первого порядка, причем оба слоя соединены весовой матрицей  $\mathbf{c}$ . Входной вектор  $\mathbf{x}$  передается на нейроны скрытого слоя. При этом каждый нейрон скрытого слоя получает полную информацию о входном векторе  $\mathbf{x}$ .

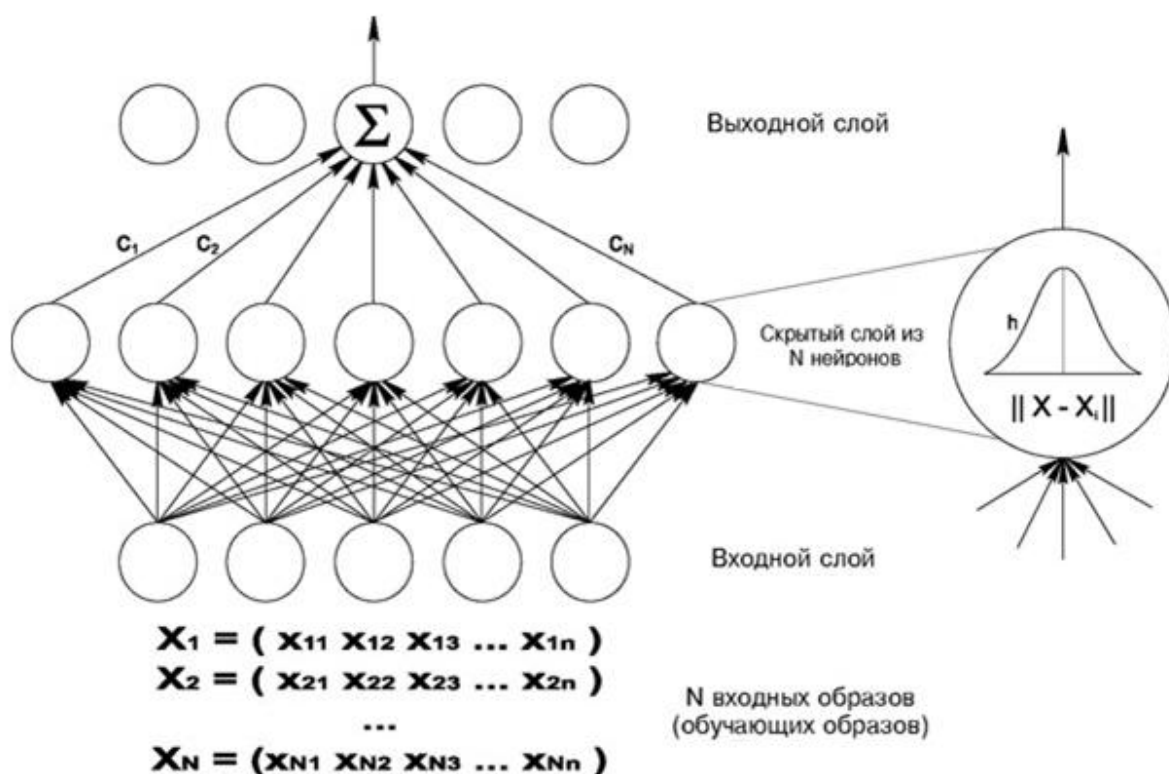


Рисунок 1.15 - Структура RBF-сети

Каждый нейрон  $i$  скрытого слоя рассчитывает значение одномерной функции  $h_i$  (например, «колокол» Гаусса):

$$h_i(x) = \exp\left[-\frac{(\|x - x_i\|)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (1.16)$$

где  $x$  – входной вектор,  $x_i$  –  $i$ -я опорная точка или  $i$ -й образ обучающей последовательности,  $\sigma_i$  – параметр рассеяния для одномерной функции  $h_i$ .

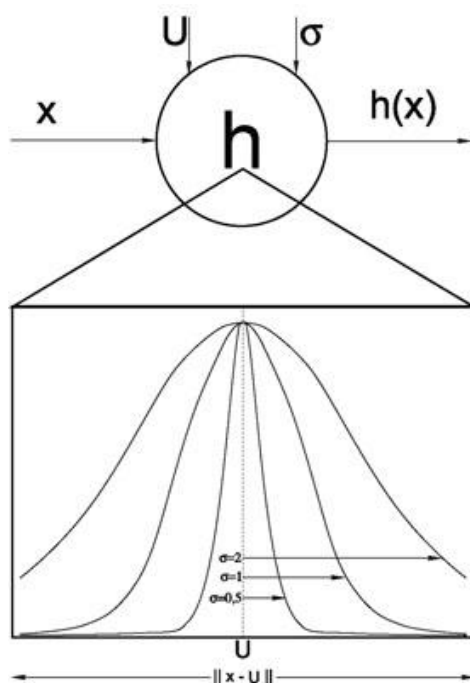
В качестве метрики  $\|x - x_i\|$  обычно используется эвклидово расстояние:

$$\|x - y\| = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad (1.17)$$

Радиальные базисные функции  $h_i$  (1.15) выполняют предварительную обработку входных векторов, определяя их близость к центрам  $x_i$ . Выходные значения  $h_i(x)$  – это степени сходства между входным вектором  $x$  и отдельными центрами  $x_i$ . На основе значений  $h_i(x)$  определяется взвешенная сумма [17].



Центры  $x_i$  определяются на основе обучающей последовательности и имеют ту же размерность  $n$ , что и входной вектор. Параметр  $\sigma_i$  определяется экспериментально. Рисунок 1.16. иллюстрирует принцип работы нейрона скрытого слоя.



**Рисунок 1.16 - Принцип работы нейрона скрытого слоя**

Из формулы (1.16) следует: выход нейрона  $i$  скрытого слоя тем больше, чем ближе текущий вход  $x$  к центру  $x_i$ . Выход  $f$  RBF-сети определяется в виде взвешенной суммы:

$$f(x) = y = \sum_{i=1}^k c_i h_i(x) \quad (1.18)$$

Нейроны выходного слоя образуют, следовательно, линейную комбинацию выходов нейронов скрытого слоя. Их функция активации или выхода – это радиальная базисная функция (1.16).

Одномерные RBF-сети могут быть обобщены на многомерные функции. В этом случае в выходном слое размещаются  $m$  нейронов по числу аппроксимируемых (или интерполируемых) функций, причем значения на выходе  $j$ -го нейрона выходного слоя определяются следующим образом:

$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^k c_{ij} h_i}{\sum_{i=1}^k h_i} \quad (1.19)$$

В RBF-сетях в качестве опорных точек в простейшем случае могут быть использованы образы обучающей последовательности. Отметим два преимущества RBF-сетей по сравнению с другими нейросетями:

1) Функция активации или выхода скрытого нейрона принимает большие значения лишь в тех случаях, когда входной образ находится вблизи от опорной точки этого нейрона. Для входов вне области, «покрытой» образами обучающей последовательности, сеть формирует лишь небольшие значения на своих выходах, причем для сетей с сигмоидальными функциями активации или выхода (например, в многослойных перцептронах) эти выходы могут быть вообще не предсказуемы [39].

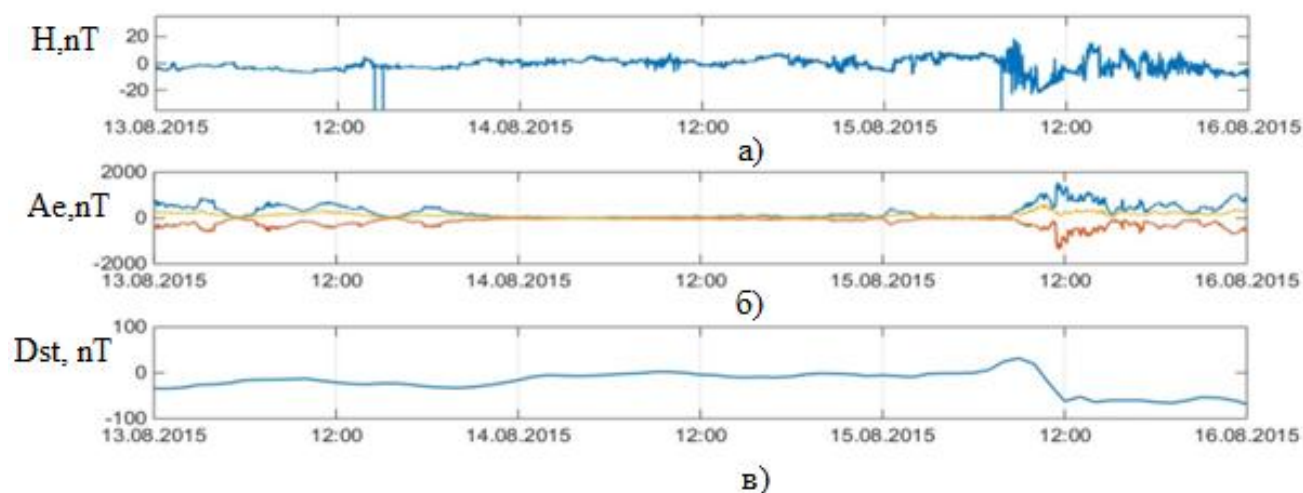
2) Простая структура RBF-сетей, содержащих только один слой скрытых нейронов, делает возможным прямой (не итеративный) расчет весов сети. В этом – их большое преимущество по сравнению с другими типами нейронных сетей, которые в большинстве случаев используют трудоемкие рекуррентные алгоритмы обучения.

## **ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА**

### **2.1 Постановка задачи. Виды эффектов космической погоды и рассматриваемые классы состояний поля Земли**

Известно, что изучение эффектов космической погоды - вариаций магнитного поля Земли является основой оценки свойств и состояния, электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве. В результате воздействия солнечной активности на околоземное космическое пространство, происходят магнитосферные возмущения различного масштаба и длительности, которые негативно воздействуют на современные технологические системы. В магнитном поле также могут проявляться катастрофические природные события или процессы на стадии их подготовки .

Регистрируемые вариации геомагнитного поля имеют сложную нестационарную структуру. В ночное время геомагнитная активность возрастает, а во время магнитных бурь могут наблюдаться резкие выбросы и колебания. На рис. 2.1 представлена обработка данных в период второй магнитной бури 15 августа 2015 года, которая была вызвана выбросом корональной массы солнечного вещества (СМЕ от 12августа) и высокоскоростными потоками от корональной дыры. Магнитная буря началась в 08:30 UTC резкого увеличения скорости солнечного ветра и повышения горизонтальной составляющей магнитного поля на всех анализируемых станциях. Примерно, за 12 часов до начала магнитной бури наблюдалось незначительное возрастание геомагнитной активности. Максимальных значений интенсивность возмущений достигала в период существенного понижения Dst-индекса.



**Рисунок 2.1 – Эффекты космической погоды: а) H-вариации; б) Dst-вариации; в) Ae-индекс [29]**

Сложная структура вариаций геомагнитного поля существенно усложняет процесс их изучения и делает малоэффективными для решения поставленной задачи классические методы анализа данных, которые не позволяют выявлять некоторые закономерности и приводят к потере важной информации. Недостатком используемых классических методов и подходов также является недостаточная степень их автоматизации, что является весьма важным в задачах оперативной обработки данных околоземного пространства и прогноза космической погоды.

Регулярные суточные вариации геомагнитного поля создаются, в основном, изменениями токов в ионосфере Земли из-за изменения освещенности ионосферы Солнцем в течение суток. Нерегулярные вариации магнитного поля возникают вследствие воздействия потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменений внутри магнитосферы и взаимодействия магнитосферы и ионосферы.

Индексы геомагнитной активности предназначены для описания вариаций магнитного поля Земли, вызванных этими нерегулярными причинами. В настоящее время наиболее распространенными являются локальные индексы K и Q, а также планетарные индексы, определяемые по сети магнитных обсерваторий, - Kp, Dst и AE. Вариации магнитного поля, а также индексы Q, Kp, Dst, и AE измеряются в нТл (гаммах). Kp, Dst, и AE

индексы характеризуют амплитуду вариаций за часовые или минутные интервалы, Q-индекс - за 15- минутный интервал.[16]

K-индекс - это квазилогарифмический (увеличивается на единицу при увеличении возмущенности приблизительно в два раза) индекс, вычисляемый по данным конкретной обсерватории за трехчасовой интервал времени. Индекс был введен Дж. Бартельсом в 1938 г. и представляет собой значения от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала (0-3, 3-6, 6-9 и т.д.) мирового времени. Для вычисления индекса берется изменение магнитного поля по компонентам H и D за трехчасовой интервал, из него вычитается регулярная часть, определяемая по спокойным дням, и полученная величина по специальной таблице переводится в K-индекс.

Определения K-индекса являются стандартной процедурой магнитных обсерваторий и широко распространены по сети обсерваторий

Качественно состояние магнитного поля в зависимости от K-индекса можно приблизительно охарактеризовать следующим образом:

$K \leq 2$  – спокойное;

$K = 2, 3$  – слабовозмущенное;

$K = 4$  – возмущенное;

$K = 5, 6$  – магнитная буря;

$K \geq 7$  – большая магнитная буря.

В работе рассматривались пять возможных состояния геомагнитного поля (см. рисунок 2.2):

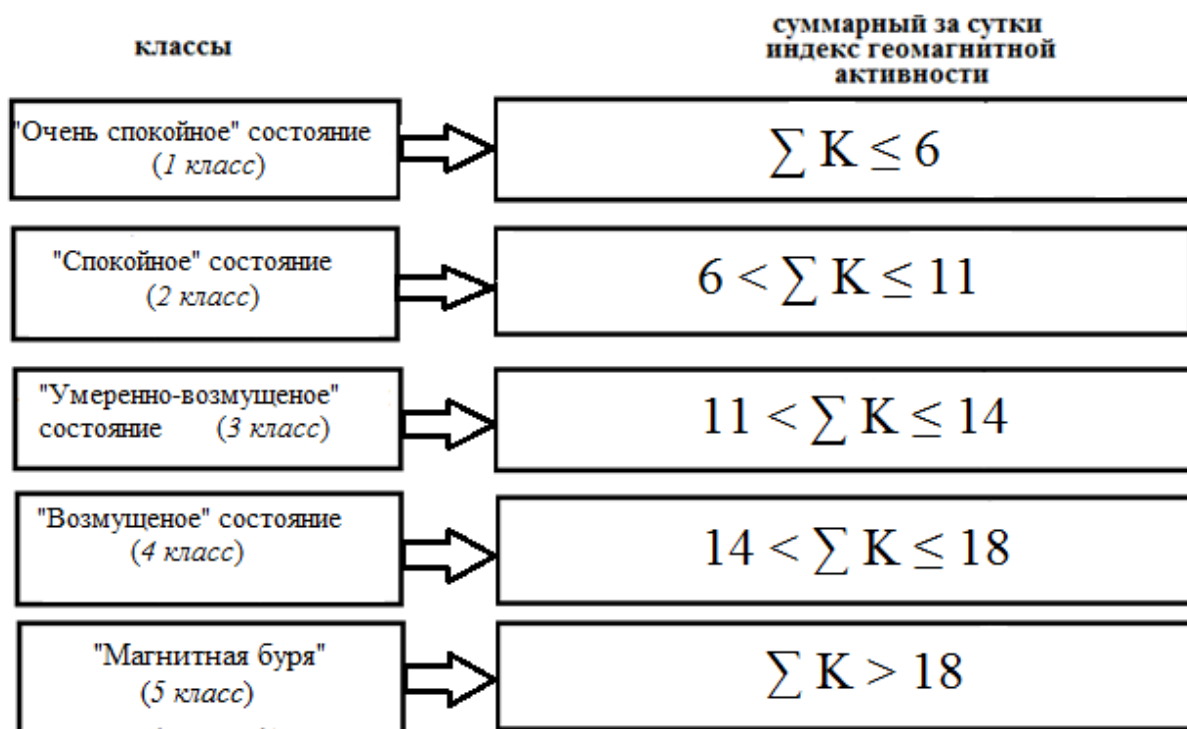


Рисунок 2.2 – Состояния геомагнитного поля и их суммарный К-индекс

На рисунке 2.2 показано схематическое представление определения геомагнитного состояния, где:

1) «Очень спокойное» состояние (1 класс), если суммарный за сутки индекс геомагнитной активности  $\sum K \leq 6$ ;

2) «Спокойное» состояние (2 класс), если  $6 < \sum K \leq 11$ ;

3) «Умеренно-возмущенное» (3 класс), если  $11 < \sum K \leq 14$

4) «Умеренно-возмущенное» (3 класс), если  $14 < \sum K \leq 18$

5) «Умеренно-возмущенное» (3 класс), если  $11 < \sum K \leq 14$

## 2.2 Разработка метода оценки состояния околоземного пространства на основе вейвлет-преобразования и нейронной сети

В основе разработанного метода лежат кратномасштабное вейвлет-разложение и вероятностные нейронные сети.

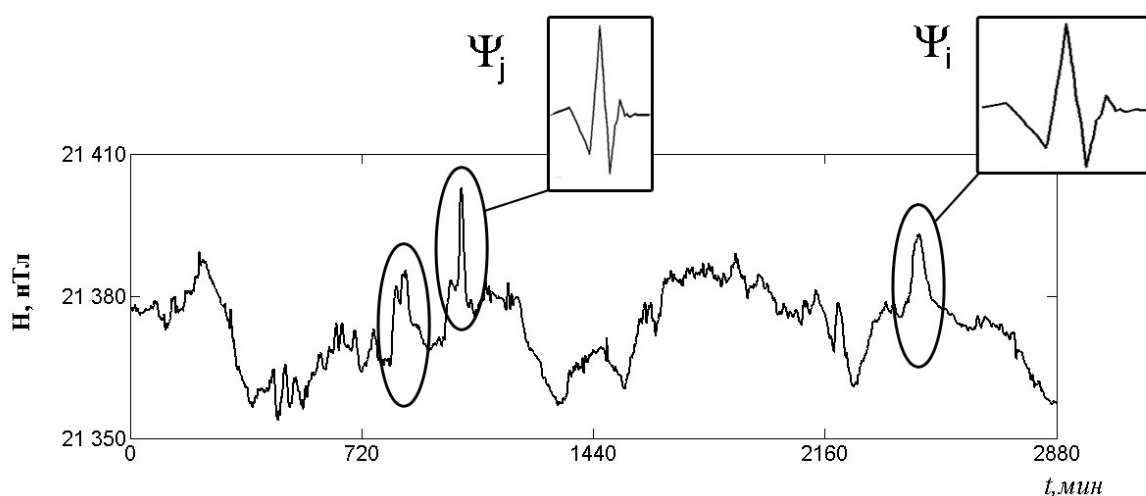
Суть метода заключается в следующем:

Кратномасштабное вейвлет-разложение выполняет декомпозицию поступающего сигнала на разномасштабные детализирующие компоненты, характеризующие возмущенность поля. Выделенные компоненты поступают в соответствующую им вероятностную нейронную сеть, выполняющую оценку степени их возмущенности. И решающее правило определяет, к какому классу относится исходная вариация геомагнитного поля.

Описание способа декомпозиция вариаций геомагнитного поля на разномасштабные компоненты:

Учитывая нерегулярную структуру геомагнитных данных, наличие локальных особенностей различной формы и длительности наиболее подходящим пространством для их представления является пространство, натянутое на базис смещенных функций или вейвлет-базис.

Широкий спектр вейвлет-базисов вейвлет-преобразования позволяет подобрать функции, обеспечивающие наилучшую аппроксимацию геомагнитного сигнала. На рисунке 2.3 показан геомагнитный сигнал, содержащий локальные особенности вида всплесков различной амплитуды и длительности и вейвлет-базисы Добеши 3-го порядка различных масштабных уровней.



**Рисунок 2.3** Регистрируемый геомагнитный сигнал: локальные особенности сигнала выделены овалом [27]

Анализ рисунка 2.3 показывает, что данные базисные функции соответствуют по форме локальным особенностям геомагнитного сигнала.

В качестве базового пространства регистрируемых дискретных данных  $f_0(t)$  рассматривается замкнутое пространство с разрешением  $j=0$ :

$$V_0 = \text{clos}_{L^2(R)} (2^0 \phi(2^0 t - k)) : k \in Z, \quad (2.1)$$

порожденное скейлинг-функцией  $\phi \in L^2(R)$  – Добеши 3-го порядка (выбран данный вейвлет-базис согласно работам д.т.н., профессора Мандриковой О. В. [7]). На основе кратномасштабного вейвлет-разложения до уровня  $m$  получается представление данных в виде суммы аппроксимирующей и детализирующих компонент (20):

$$f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-m} g[2^j t] + f[2^{-m} t], \quad (2.2)$$

где  $g[2^j t] \in W_j$ ,  $W_j$  – пространство с разрешением  $j$ , порожденное вейвлет-базисом  $\Psi_{j,n}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - n)$ , разномасштабные детализирующие компоненты:

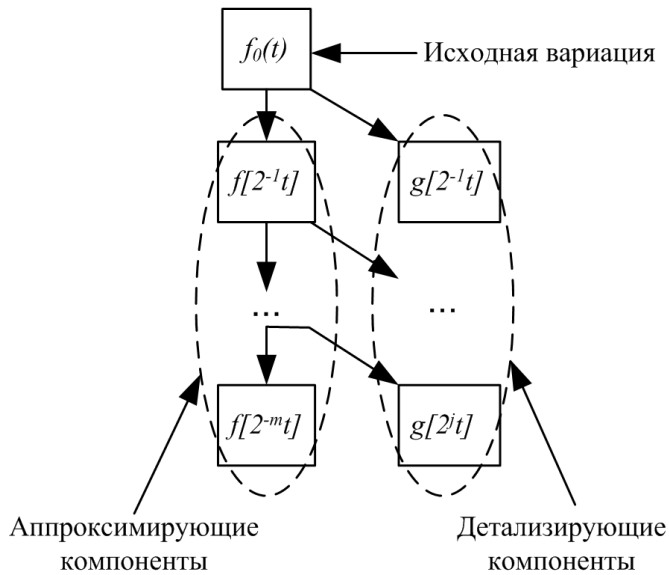
$$g[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t), \quad d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle, \quad (2.3)$$

где  $J$  – масштаб; аппроксимирующая компонента (14):

$$f[2^{-m} t] = \sum_k c_{-m,k} \phi_{-m,k}(t), \quad c_{-m,k} = \langle f, \phi_{-m,k} \rangle. \quad (2.4)$$

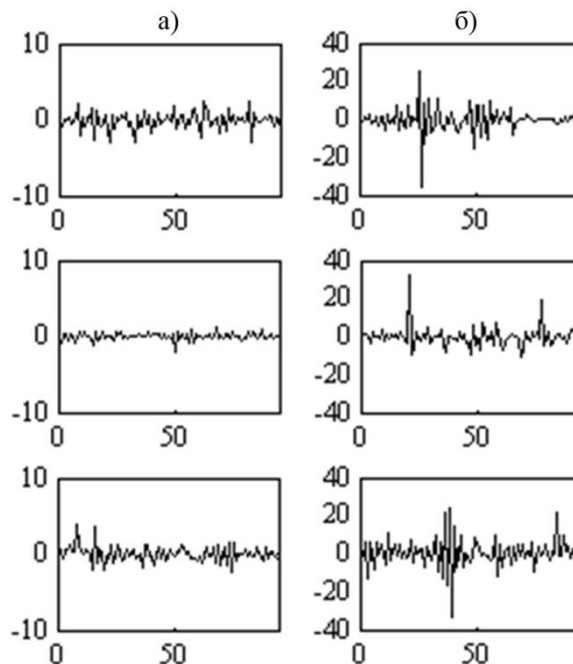
Схема представления данных на основе отображения (2.1) показана на рисунке 2.4.





**Рисунок 2.4 - Схема разложения данных до уровня  $m$**

Детальное изучение структуры геомагнитных данных показало, что коэффициенты  $d_{j,n}$  детализирующих компонент  $g[2^j t]$  масштабов  $j = -1, -2, \dots, -6$  характеризуют возмущенность поля и в периоды повышения геомагнитной активности существенно возрастают их абсолютные значения. На рисунке 2.5, в качестве примера, показаны детализирующие компоненты вариаций геомагнитного поля.



**Рисунок 2.5 - Детализирующие компоненты вариаций геомагнитного поля масштаба  $j=-4$ , полученные с помощью вейвлета Добеши 3-го порядка: а) – периоды «спокойного» состояния поля, б) – периоды «возмущенного» состояния поля**

После кратномасштабного вейвлет-разложение детализирующие компоненты вариаций геомагнитного поля масштаба  $j=-1,2,\dots,6$  поступают соответственно в свою вероятностную нейронную сеть.

Архитектура вероятностной нейронной сети базируется на архитектуре радиальной базисной сети, но в качестве выходного слоя использует конкурирующий слой, который подсчитывает вероятность принадлежности входного вектора к тому или иному классу и в конечном счете сопоставляет вектор с тем классом, вероятность принадлежности к которому выше. Структура вероятностной нейронной сети представлена на рисунке 2.6.

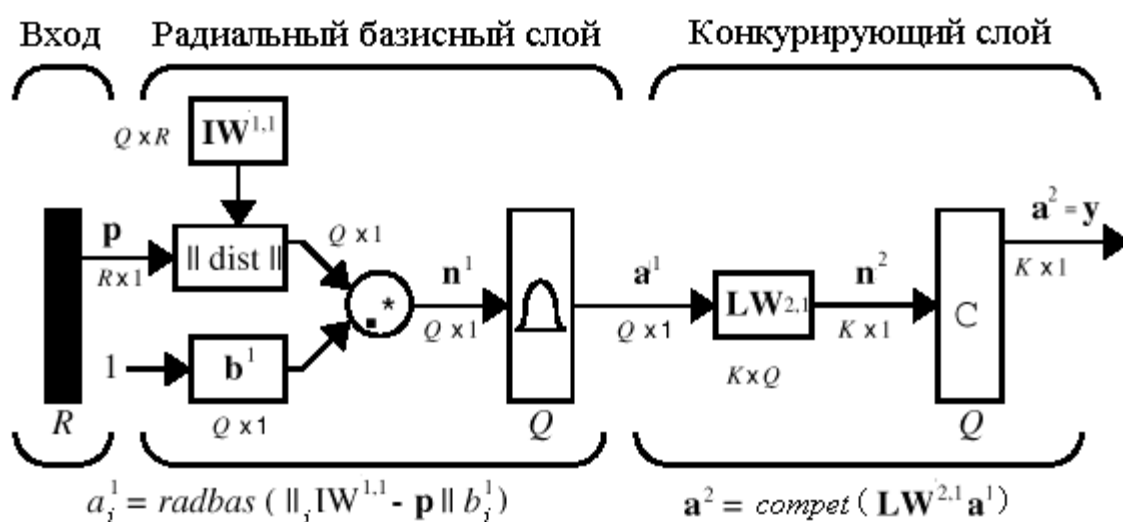


Рисунок 2.6 - Структура вероятностной нейронной сети

В нейронной сети задано обучающее множество, состоящее из  $Q$  пар векторов вход/цель. Каждый вектор цели имеет  $K$  элементов, указывающих класс принадлежности, и, таким образом, каждый вектор входа ставится в соответствие одному из  $K$  классов. В результате образована матрица связности  $T$  размера  $K \times Q$ , состоящая из нулей и единиц, строки которой соответствуют классам принадлежности, а столбцы – векторам входа. Таким образом, если элемент  $T(i,j)$  матрицы связности равен 1, то это означает, что  $j$ -й входной вектор принадлежит к классу  $i$ . [16]

Весовая матрица первого слоя  $IW^{11}$  формируется с использованием векторов входа из обучающего множества в виде матрицы  $P^1$ . Когда подается новый вход, блок "||dist||" вычисляет близость нового вектора к векторам обучающего множества; затем вычисленные расстояния умножаются на смещения и подаются на вход функции активации "Гаусса" - "radbas"(23).

$$F(S) = \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right); \quad (2.5)$$

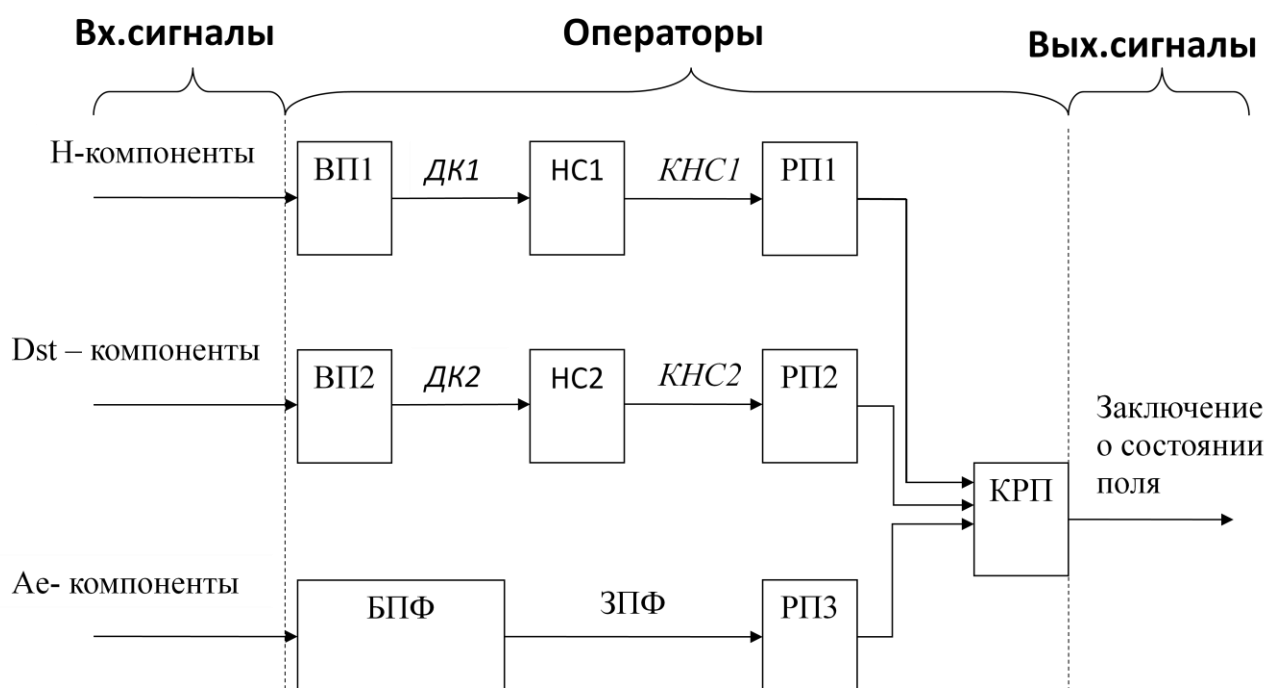
Радиальная функции активации (2.5), изменяется монотонно, в зависимости от расстояния до центральной точки. Параметр  $\sigma$  определяет радиус влияния каждой базисной функции и быстроту стремления к нулю при удалении от центра. Вектор обучающего множества, наиболее близкий к вектору входа, будет представлен в векторе выхода  $a^1$  числом близким к 1.

Весовая матрица второго слоя  $LW^{21}$  соответствует матрице связности  $T$ , построенной для данной обучающей последовательности. Произведение  $T*a^1$  определяет элементы вектора  $a^1$ , соответствующие каждому из  $K$  классов. В результате конкурирующая функция активации второго слоя "compnet" формирует на выходе значение, равное 1 для самого большего по величине элемента вектора  $a^1$  и 0 в остальных случаях. Таким образом, сеть базисная радиальная нейронная сеть выполняет классификацию векторов входа по  $K$  классам [15].

Входными данными метода являются три параметра, определяющих возмущение магнитного поля:  $H$ -компоненты - горизонтальная составляющая магнитного поля Земли (любезно предоставленные ИКИР ДВО РАН. Минутные данные, взятые за 2007 год, измеряемые в нТл);  $Dst$  – вариации (характеризует геомагнитные возмущения в период магнитных бурь Минутные данные, взятые за 2007 год, измеряемые в нТл) [20] ;  $A_e$  – индекс авроральной электроструи (суммарный размах магнитных флуктуаций в  $\Delta H$ , характеризует геомагнитную активность в зоне высоких широт Минутные данные, взятые за 2007 год, измеряемые в нТл) [20].

Итак, принцип метода заключается в следующем: на вход оператора подается каждый из вышеизложенных параметров в виде сигнала, оператор преобразует сигнал на полезные составляющие (коэффициенты), коэффициенты сравниваются с коэффициентами обученными заранее. Затем по каждой компоненте создается предварительное решающее правило, на основе которого будет присвоен класс возмущенности геомагнитному полю. Эти результаты поступают на завершающее решающее правило, которое окончательно присваивает класс геомагнитному полю.

На рисунке 2.6 изображена функциональная схема метода.



**Рисунок 2.6 – Функциональная схема метода выделения эффектов космической погоды**

На рисунке видно, что имеются три входных параметра космической погоды, сигнал за сутки: Н-компоненты; Dst – вариации; Ae – индекс. Первые два сигнала поступают на операторы «вейвлет-преобразования» (ВП) ВП<sub>n</sub>, где n=1,2. Оператор ВП<sub>n</sub> на основе дискретного вейвлет-преобразования раскладывает входной сигнал на две составляющие детализирующую и

аппроксимирующую с заданной глубиной разложения. Затем коэффициенты вейвлет-разложения детализирующие компоненты (ДК) сигнала поступают на оператор «нейронная сеть» (НС)  $НС_n$ , где  $n=1,2$ . Оператор  $НС_n$  формирует коллектив нейронных сетей (КНС) для каждого уровня разложения и соотносит к классам, на основе заданного обучающего множества. Далее с выходными данными оператора НС поступают на вход оператора «решающее правило» (РП)  $РП_n$ , где  $n=1,2$ . Оператор РП представляет значения собой правила, которые анализируют входные данные и присваивают класс. Третий сигнал -  $A_e$ -индекс поступает на оператор «блок пороговых функций» (БПФ), где на выходе получается разделенный сигнал  $A_e$ -индекс на  $A_l$  (отрицательные значения) и  $A_u$  (положительные). Затем значения пороговых функций (ЗПФ) поступают на решающее правило №3 (РПЗ), на основе которого принимается решение (примечание): «есть суббурия» или «нет суббурии». Присвоенные классы от каждого входного сигнала поступают на вход оператора конечное решающее правило (КРП). Данный оператор имеет решающее правило, на основе которого принимается окончательное решение о присвоении рассматриваемому дню соответствующий класс.

Преимущество данного метода заключается в том, что вейвлет-преобразование позволяет детально изучить структуру данных и выделить информативные компоненты, что в свою очередь позволяет оптимизировать процедуру обучения нейронной сети и повысить эффективность ее работы. В настоящее время вейвлет-преобразование широко применяется в задачах анализа вариаций магнитного поля Земли [Nayar, 2006, Ротанова, ZhonghuaXu, Jach A., Mandrikovaetal., 2013; Mandrikovaetal., 2014;], в том числе для исследования связи короткопериодных колебаний геомагнитного поля, параметров солнечного ветра и межпланетного поля в периоды геомагнитных бурь (Nayar, 2006), при исследовании вековых вариаций магнитного поля (Ротанова) и т.д. На основе вейвлет-преобразования решаются такие задачи, как удаление шума и исключение периодической

компоненты вариаций геомагнитного поля, вызванной вращением Земли [ZhonghuaXu, Jach A.]. Используя дискретное вейвлет-преобразование и нейронные сети предложен алгоритм автоматического определения периодов начальной фазы магнитной бури. В настоящей работе предложен метод и алгоритм, где особое внимание уделяется разработке вычислительных решений по выделению и оценке кратковременных геомагнитных возмущений, которые могут возникать накануне магнитных бурь и имеют важное прикладное значение. Важным моментом здесь также является возможность использования регистрируемых на земной поверхности данных геомагнитного поля, методы анализа которых могут значительно дополнить существующие прогностические методы. Учитывая неполные априорные знания о динамике магнитосферных токовых систем, особенно в возмущенные периоды, а также ограниченный объем получаемой информации о процессах в околоземном пространстве, наличие шумов, возможные аппаратные сбои др., успешное решение сложной задачи прогноза космической погоды требует комплекса методов и технологий благодаря механизму нейронных сетей возможно постоянное обучение и самообучения, расширения коллектива нейронных сетей для каждого отдельного класса, тем самым уменьшая погрешность выходных результатов и увеличивая базу всевозможных проявлений космической погоды.

### **2.3 Решающие правила и система оценки состояния геомагнитного поля**

Решающее правило №1 (№2). Принцип РП1 и РП2 идентичен, т.к. используется один и тот же аппарат принятия решения.

В соответствии с рассматриваемыми состояниями поля в пункте 2.1 считается, что компонента  $g[2^{-j}t]$  может иметь одно из пяти возможных классов (состояний) – «очень спокойное» (класс 1), «спокойное» (класс 2), «умеренно-возмущенное» (класс3), «умеренное» (класс 4) или «магнитная

буря» (класс 5) состояние. Состояние компонент  $g[2^{-j}t]$ ,  $j=1,2,\dots,5$  определяет состояние геомагнитного поля. Для оценки его состояния введем следующее решающее правило №1 (№2):

1) если все компоненты имеют «очень спокойное» состояние, то геомагнитное поле имеет «очень спокойное» состояние (1 класс);

2) если хотя бы одна из компонент имеет «спокойное» состояние, а остальные «очень спокойное», то геомагнитное поле имеет «спокойное» состояние (2класс);

3) если хотя бы одна из компонент имеет «умеренно-возмущенное» состояние, а остальные «очень спокойное» и « спокойное», то геомагнитное поле имеет «умеренно-возмущенное» состояние (3класс);

4) если хотя бы одна из компонент имеет «возмущенное» состояние, а остальные «очень спокойное», «спокойное», умеренно-возмущенное, то геомагнитное поле имеет «возмущенное» состояние (4класс);

5) если хотя бы одна из компонент имеет состояние «магнитная буря», то поле имеет состояние «магнитная буря» (5 класс).

Оценка состояния каждой из 6-ти выделенных компонент выполняется на основе вероятностных нейронных сетей, архитектура такой сети представлена на рисунок 2.7.

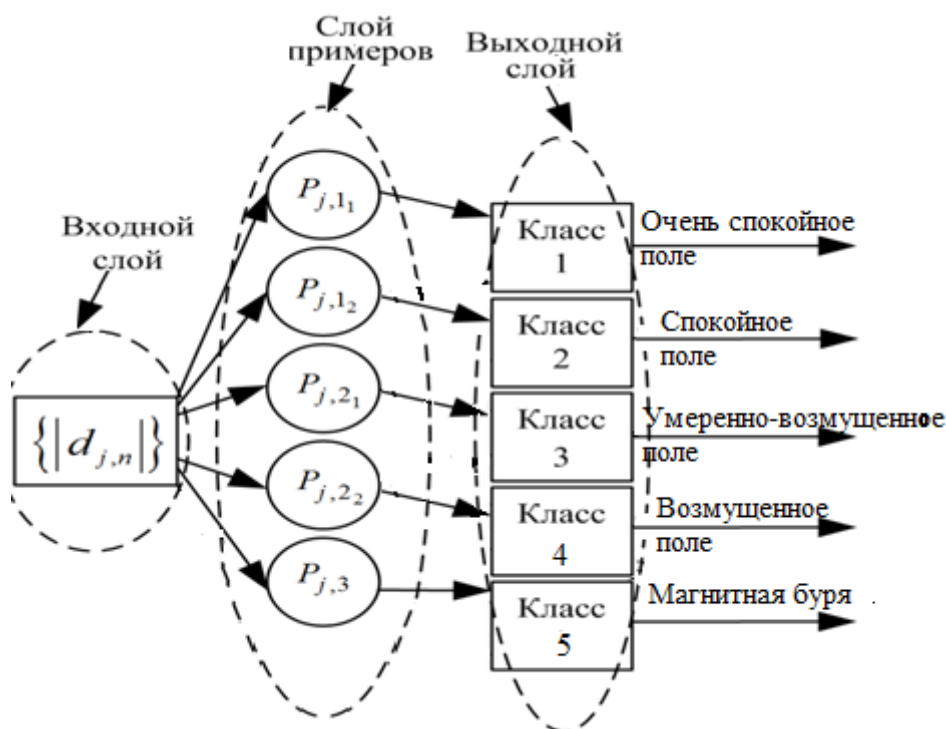


Рисунок 2.7 – Архитектура нейронной сети

Используется 5 классов состояний компонент, которые образуют радиальный слой (слой примеров) в нейронной сети. Введение 5 классов обусловлено сложным характером процесса и отсутствием четких границ между рассматриваемыми классами в

Выходного слой является конкурирующим слоем, который подсчитывает вероятность принадлежности входного вектора к тому или иному классу и в конечном счете сопоставляет вектор с тем классом, вероятность принадлежности к которому выше.

Рисунок 2.8 иллюстрирует принцип работы решающего правила №1 и №2.

Коллектив радиально-базисных сетей оценивает в каждом дне детализирующие компоненты  $D_1, D_2, \dots, D_6$ , к которым присваивается номер  $i$  класса состояний компонент ( $k_i$ ), где  $i=1,2,\dots, 5$ . Далее по следующему решающему правилу определяется итоговое состояния геомагнитного поля.

- 1 класс:  $\max |k_i| = 1$  – "очень спокойное поле" состояние геомагнитного поля;



- 2 класс :  $\max|k_i| = 2$  – "спокойное поле" состояние геомагнитного поля;
- 3 класс :  $\max|k_i| = 3$  – "умеренно-возмущенное поле" состояние геомагнитного поля;
- 4 класс :  $\max|k_i| = 4$  – "возмущенное поле" состояние геомагнитного поля;
- 5 класс :  $\max|k_i| = 5$  – "магнитная буря" состояние геомагнитного поля;

**Оценка классов состояний компонент коллективом вероятностных сетей**

Класс	Очень спокойное		Спокойное		Умеренно-возмущенное		Возмущенное		Магнитная буря	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D <sub>1</sub>	1	1	1	2	2	3	2	2	2	2
D <sub>2</sub>	1	1	2	1	1	2	2	3	3	4
D <sub>3</sub>	1	1	1	1	3	3	3	4	4	3
D <sub>4</sub>	1	1	1	2	1	1	4	3	2	5
D <sub>5</sub>	1	1	1	2	2	2	1	4	4	5
D <sub>6</sub>	1	1	1	2	1	2	3	2	5	2

1 класс	2 класс	3 класс	4 класс	5 класс
---------	---------	---------	---------	---------

Решающее правило:  $\max|k_i| = 1$      $\max|k_i| = 2$      $\max|k_i| = 3$      $\max|k_i| = 4$      $\max|k_i| = 5$

Рисунок 2.8 - Принцип работы решающего правила №1, №2

Из рисунка 2.8 видно, что имеются десять тестируемых дней, которые разделены на 5 класса по К-индексу геомагнитной активности и результаты оценки подклассов состояний детализирующих компонент коллективом вероятностных сетей. На рисунке 2.8 кругами обведены максимальные значения (i) подклассов состояний компонент (k<sub>i</sub>) и стрелками показаны их разделение на классы, удовлетворяющие соответствующим условиям.

Решающие правило №3.

Данное решающее №3 правило будет оповещать эксперта о том, что при определении классов от 1 до 4 присутствует ли суббуря или нет. Суббурей называется магнитная буря протекающая локально в магнитном поле Земли. Для суббури рассматриваются следующие состояния магнитного поля:

- 1) «Есть суббуря» - состояния поля, которое соответствует классу 5;
- 2) «Нет суббури» - состояние поля, которое соответствует классам 1,2,3,4

Для определения суббури используется следующее правило, разработанное на основе пробных входных данных Ae-индекса за 2007. Ae – индекс авроральной электроструи (суммарный размах магнитных флуктуаций в  $\Delta H$ , характеризует геомагнитную активность в зоне высоких широт. Входной сигнал Ae-индекс разделяется на сигналы  $Au$  и  $Al$ . Где  $Au$  это значения отрицательного отклонения, а  $Al$  – значения положительного отклонения.

Блок пороговых функции (БПФ) имеет жесткие границы, которые отбирают значения входного сигнала. Границы определяются следующим способом: дни сигналов Ae-индекса  $Au$  и  $Al$  сопоставляются с классами состояния поля по k-индексу. Затем значения индексов  $Al$  и  $Au$  суммируется за день. И получают массивы значений дней  $Al$  и  $Au$  соответствующих классов. Определяется минимум и максимум порогов для каждого класса. И принимается решение на основе определенных границ  $Al_+$ ,  $Au_+$ . Где  $Al_+$ ,  $Au_+$  есть порог значений  $AL$  и  $AU$  соответствующих состояний. Решающее правило №3:

- 1) Если  $AL < Al_+$ , состояние поля «Нет суббури»;
- 2) Если  $AU < Au_+$ , состояние поля «Нет суббури»;
- 3) Если  $AL \geq Al_+$ , состояние поля «Есть суббуря»;
- 4) Если  $AU \geq Au_+$ , состояние поля «Есть суббуря».

Конечное решающее правило (КРП).

Конечное решающее правило принимает окончательную оценку исследуемому дню и присваивает класс от 1 до 5 и определяет, есть суббуря или нет, что касается только классов от 1,2,3,4.

Входными данными для КРП являются:

1) Номер класса  $H=1,2,\dots,5$  поля от РП№1 (входной сигнал  $H$ -компоненты);

2) Номер класса  $DST = 1,2,\dots,5$  поля от РП№2 (входной сигнал  $Dst$ -вариации);

3) Дополнительное сообщение  $AE=1$ - «Нет суббури»;  $AE = 2$  - «Есть суббуря», входным сигналом является  $Ae$ -индекс.

Конечное решающее правило:

1) Если  $H=1$ , то «Класс 1»

2) Если  $H=5$ ,  $4 \leq DST \leq 5$ , то «Класс 5»

3) Если  $H=2$ ,  $DST \leq 2$ ,  $AE=1$ , то «Класс 2 - Нет суббури»

4) Если  $H=2$ ,  $DST \leq 2$ ,  $AE=2$ , то «Класс 2 - Есть суббуря»

5) Если  $H=3$ ,  $2 \leq DST \leq 3$ ,  $AE=1$ , то «Класс 3 - Нет суббури»

6) Если  $H=3$ ,  $2 \leq DST \leq 3$ ,  $AE=2$ , то «Класс 3 - Есть суббуря»

7) Если  $H=4$ ,  $3 \leq DST \leq 4$ ,  $AE=1$ , то «Класс 4 - Нет суббури»

8) Если  $H=4$ ,  $3 \leq DST \leq 4$ ,  $AE=2$ , то «Класс 4 - Есть суббуря»

## **2.4 Построение алгоритма на основе метода оценки состояния околоземного пространства**

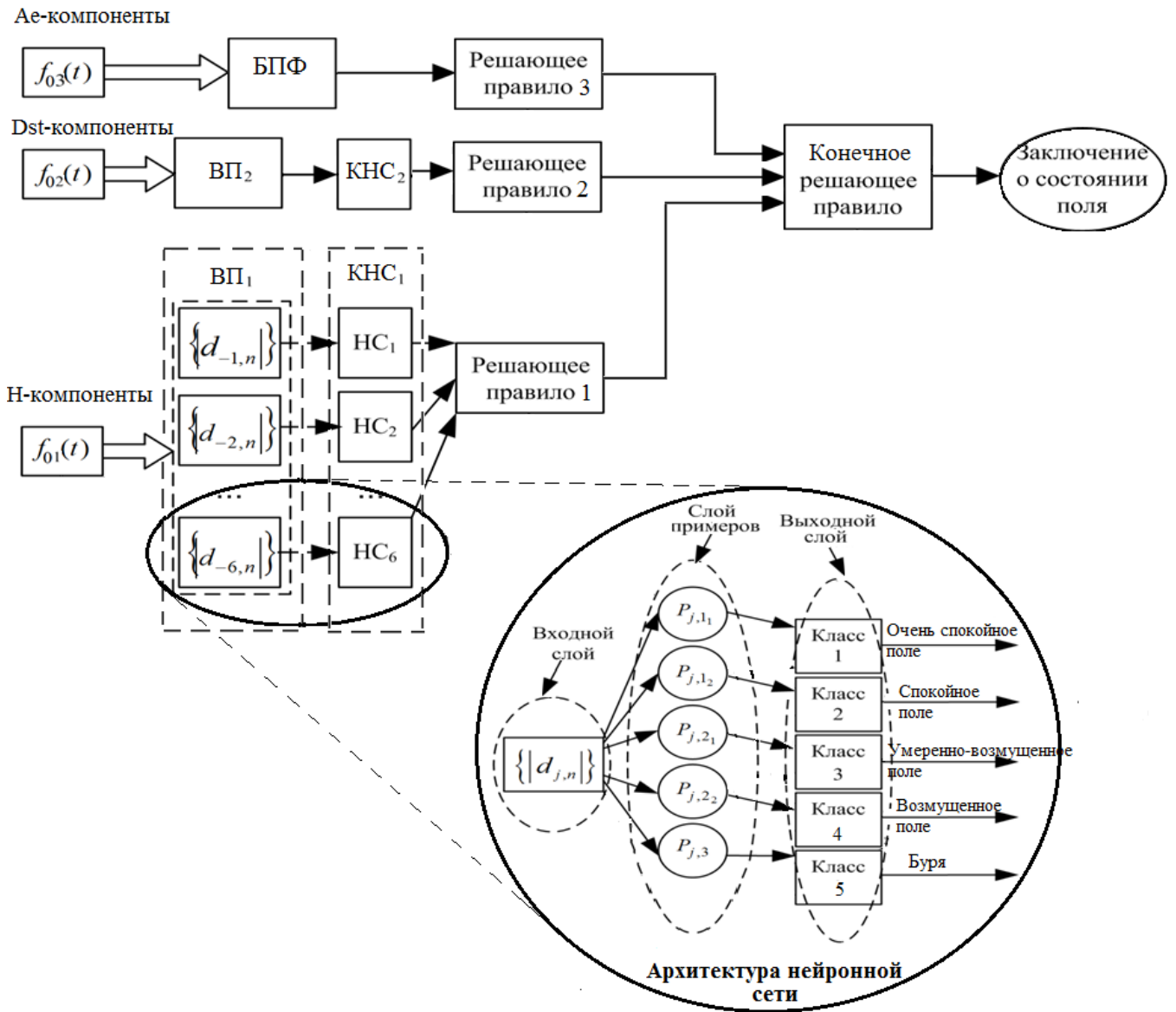
Входными данными метода являются:  $H$ -компоненты - горизонтальная составляющая магнитного поля Земли (любезно предоставленные ИКИР ДВО РАН. Минутные данные, взятые за 2007 год, измеряемые в нТл);  $Dst$  - вариации (характеризует геомагнитные возмущения в период магнитных бурь Минутные данные, взятые за 2007 год, измеряемые в нТл) [20] ;  $Ae$  - индекс авроральной электроструи (суммарный размах магнитных

флуктуаций в  $\Delta H$ , характеризует геомагнитную активность в зоне высоких широт Минутные данные, взятые за 2007 год, измеряемые в нТл) [20].

Данные обучаемые. Н-компоненты  $f_{01}(t)$  Dst-вариации  $f_{02}(t)$ , Ae-компоненты  $f_{03}(t)$ , имеют 365 дней за 2007 год, где: 113 дней имеют состояние "очень спокойное поле» (класс 1); 76 дней - "спокойное поле" (класс 2), из которых 13 дней имеют состояние «Есть суббурия», а остальные 63 дня – «Нет суббурии»; 40 дней - "умеренно-возмущенное поле» (класс 3), из которых 19 дней имеют состояние «Есть суббурия», а остальные 21 дня – «Нет суббурии»; 57 дней - " возмущенное поле» (класс 4), из которых 34 дней имеют состояние «Есть суббурия», а остальные 23 дня – «Нет суббурии»; 79 дней имеют состояние «Магнитная буря» (класс 5).

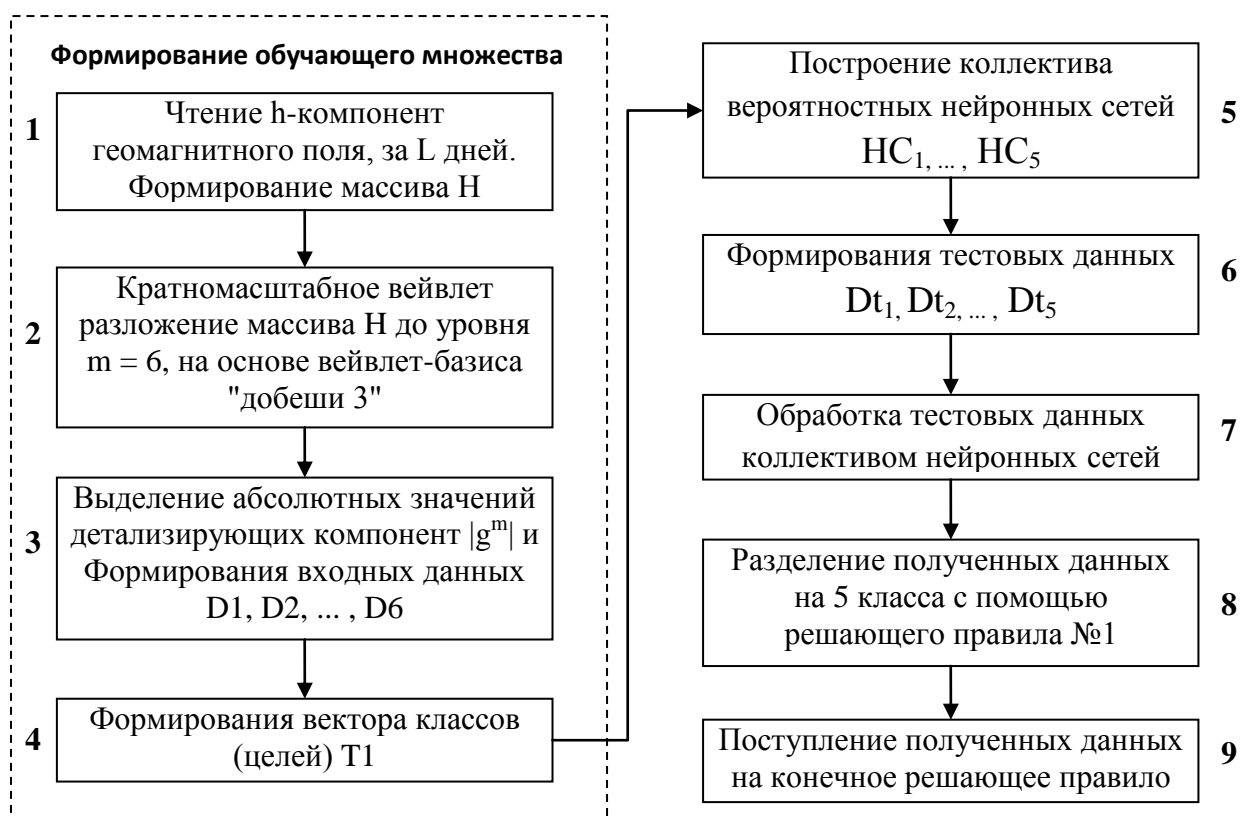
Тестируемые данные: Н-компоненты, Dst-вариации, Ae-компоненты за 2003 год. Всего 365 дней, из которых: 121 дней имеют состояние "очень спокойное поле» (класс 1); 82 дней - "спокойное поле" (класс 2), из которых 21 дней имеют состояние «Есть суббурия», а остальные 61 дня – «Нет суббурии»; 32 дней - "умеренно-возмущенное поле» (класс 3), из которых 16 дней имеют состояние «Есть суббурия», а остальные 16 дня – «Нет суббурии»; 64 дней - «возмущенное поле» (класс 4), из которых 49 дней имеют состояние «Есть суббурия», а остальные 15 дней – «Нет суббурии»; 66 дней имеют состояние «Магнитная буря». Все данные сопоставлены по К-индексу. К-индекс считается эталонным значением.

По разработанному методу (рисунок 2.9), построены алгоритмы анализа и обработки входных сигналов.



**Рисунок 2.9 – Принцип работы метода**

Для входного параметра  $N$  создан алгоритм №1, который определяет процесс анализа и обработки входного параметра  $N$ -вариации и присвоения соответствующего класса на основе «Решающего правила №1» (Рисунок 2.10)



**Рисунок 2.10 - Этапы построения алгоритма №1**

Словесное описание алгоритма:

Начало.

Шаг 1. Загружается массив  $N[N \times L]$ , где  $N$ -количество векторов напряженности геомагнитного поля  $i$ -го дня, где  $i=1,2,\dots,N$ , а  $L$  -количество дней.

Шаг 2. Декомпозируется массив  $N[N \times L]$  с помощью кратномасштабного вейвлет-разложения до уровня  $j$ , где  $j=1,2,\dots,6$ , на суммы аппроксимирующей и детализирующих компонент (12), на основе вейвлет-базиса "Добеши 3-го порядка".

Шаг 3. Выделение абсолютных детализирующих компонент  $g[2^{-j}]$   $i$ -го дня для формирования входных данных нейронной сети:  $D_1[g[2^{-1}] \times L]$ ,  $D_2[g[2^{-2}] \times L]$ , ... ,  $D_6[g[2^{-6}] \times L]$ , где  $[2^{-j}]$  – количество абсолютных коэффициентов  $|d_{j,n}|$  детализирующих компонент.

Шаг 4. Формирования вектора индексов классов (целей)  $T_C[1 \times L]$ , где  $T_C \in \{1,2,\dots,5\}$ . и формирования матрицы связности  $T1[j \times L]$  в соответствии индексному вектору  $T_C[1 \times L]$ .

Шаг 5. Построение коллектива вероятностных нейронных сетей (НС)  $НС_j$ , где  $j=1,2,\dots,5$ , на основе заданного обучающего множества, состоящего из  $L$  пар входных данных  $D_j[ [2^{j_t}] \times L ]$ , и векторов целей  $T1[j \times L]$ .

Шаг 6. Формирования тестовых данных  $Dt_j[g[2^{j_t}] \times R]$  по принципу выполнения шагов 1-3, где  $R$  - количество тестовых дней.

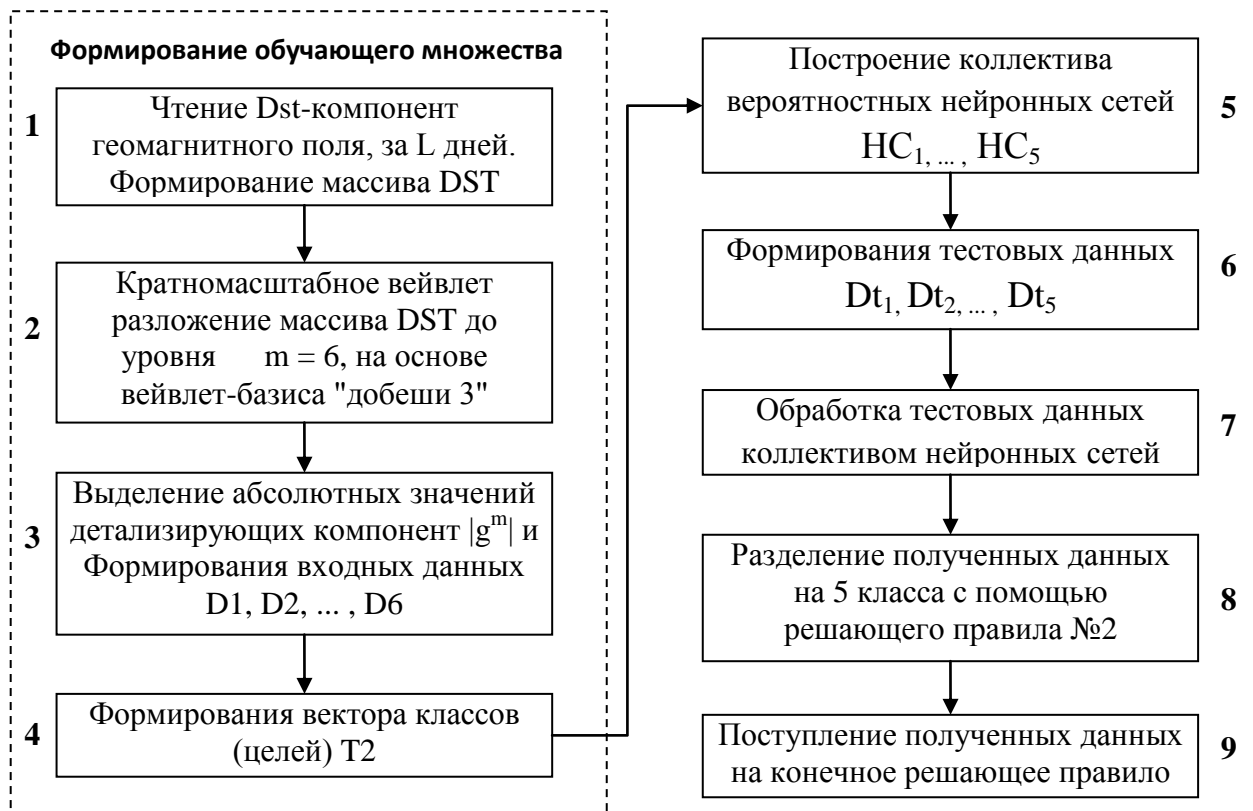
Шаг 7. Поступление сформированных тестовых данных  $Dt_j$ , на обученный коллектив нейронных сетей  $НС_j$ , соответственно.

Шаг 8. Разделение полученных данных на 5 класса с помощью «Решающего правила №1».

Шаг 9. Поступление полученных данных на конечное решающее правило

Конец.

Для входного параметра Dst-вариаций создан алгоритм №2, который определяет процесс анализа и обработки входного параметра H-вариации и присвоения соответствующего класса на основе «Решающего правила №1» (Рисунок 2.11)



**Рисунок 2.11 - Этапы построения алгоритма №2**  
**Словесное описание алгоритма №2:**

Начало.

Шаг 1. Загружается массив  $DST[N \times L]$ , где  $N$ -количество векторов напряженности геомагнитного поля  $i$ -го дня, где  $i=1,2,\dots,N$ , а  $L$  -количество дней.

Шаг 2. Декомпозируется массив  $DST[N \times L]$  с помощью кратномасштабного вейвлет-разложения до уровня  $j$ , где  $j=1,2,\dots,6$ , на суммы аппроксимирующей и детализирующих компонент (12), на основе вейвлет-базиса "Добеши 3-го порядка".

Шаг 3. Выделение абсолютных детализирующих компонент  $g[2^{-j}]$   $i$ -го дня для формирования входных данных нейронной сети:  $D_1[g[2^{-1}] \times L]$ ,  $D_2[g[2^{-2}] \times L]$ , ... ,  $D_6[g[2^{-6}] \times L]$ , где  $[2^{-j}]$  – количество абсолютных коэффициентов  $|d_{j,n}|$  детализирующих компонент.

Шаг 4. Формирования вектора индексов классов (целей)  $T_C[1 \times L]$ , где  $T_C \in \{1,2,\dots,5\}$ . и формирования матрицы связности  $T_2[j \times L]$  в соответствии индексному вектору  $T_C[1 \times L]$ .

Шаг 5. Построение коллектива вероятностных нейронных сетей (НС)  $НС_j$ , где  $j=1,2,\dots,5$ , на основе заданного обучающего множества, состоящего из  $L$  пар входных данных  $D_j[ [2^{-j}] \times L]$ , и векторов целей  $T_2[j \times L]$ .

Шаг 6. Формирования тестовых данных  $D_{tj}[g[2^{-j}] \times R]$  по принципу выполнения шагов 1-3, где  $R$  -количество тестовых дней.

Шаг 7. Поступление сформированных тестовых данных  $D_{tj}$ , на обученный коллектив нейронных сетей  $НС_j$ , соответственно.

Шаг 8. Разделение полученных данных на 5 класса с помощью «Решающего правила №2».

Шаг 9. Поступление полученных данных на конечное решающее правило

Конец.



Для входного параметра Ae-индекса создан алгоритм №3, который определяет процесс анализа и обработки входного параметра Ae-вариаций и вывод соответствующего сообщения на основе «Решающего правила №3» (Рисунок 2.12)

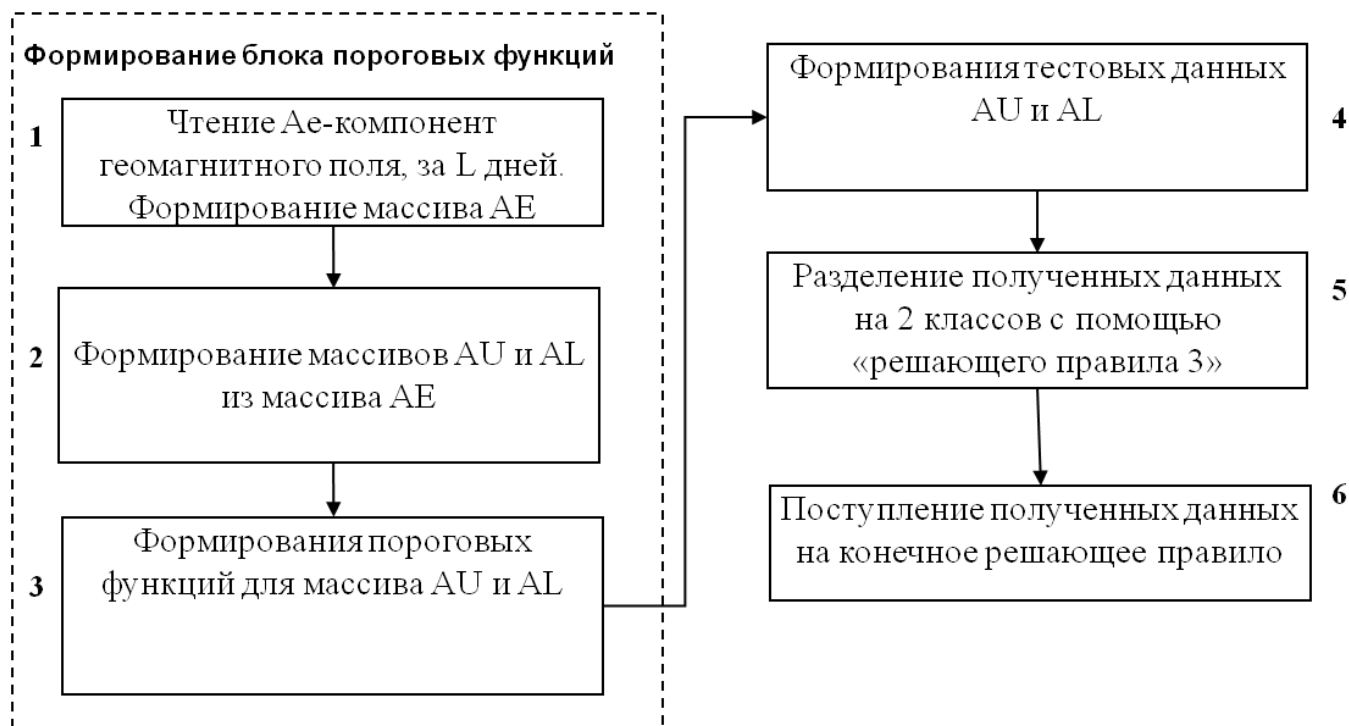


Рисунок 2.12 - Этапы построения алгоритма №3

Словесное описание алгоритма №3:

Начало.

Шаг 1. Загружается массив  $AE[N \times L]$ , где  $N$ -количество векторов напряженности геомагнитного поля  $i$ -го дня, где  $i=1,2,\dots,N$ , а  $L$  -количество дней.

Шаг 2. Формируется массивы  $AU[N \times L]$  и  $AL[N \times L]$ , где  $N$ -количество векторов напряженности геомагнитного поля  $i$ -го дня, где  $i=1,2,\dots,N$ , а  $L$  - количество дней.

Шаг 3. Формирование пороговых функций. Определение значений  $Al-, Al+, Au-, Au+$ .

Шаг 4. Формирования тестовых данных  $AU[N \times L]$  и  $AL[N \times L]$

Шаг 5. Разделение полученных данных на 2 класса с помощью «Решающего правила №3».

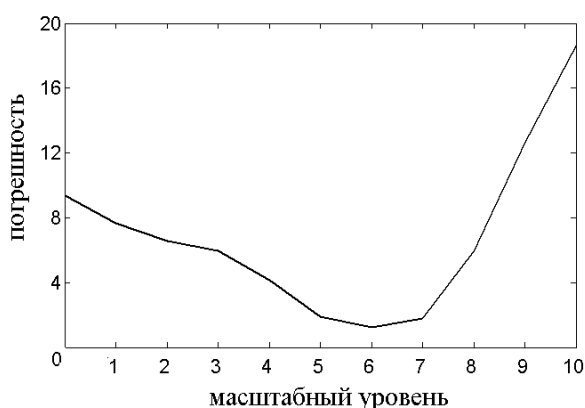
Шаг 6. Поступление полученных данных на конечное решающее правило

## ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

### 3.1 Результаты работы метода и оценка погрешностей его вычислительных алгоритмов

Для тестирования предложенного метода использованы следующие параметры: Н-компоненты - горизонтальная составляющая магнитного поля Земли (любезно предоставленные ИКИР ДВО РАН. Минутные данные, взятые за 2003 год, измеряемые в нТл); Dst – вариации (характеризует геомагнитные возмущения в период магнитных бурь Минутные данные, взятые за 2003 год, измеряемые в нТл) [20]; Ae – индекс авроральной электроструи (суммарный размах магнитных флуктуаций в ΔН, характеризует геомагнитную активность в зоне высоких широт Минутные данные, взятые за 2003 год, измеряемые в нТл) [20].

В результате апробации метода определен уровень глубины разложения вейвлет-преобразования (рисунок 3.1). На рисунке 3.1 показан график зависимости погрешности выделения спокойной составляющей сигнала от уровня вейвлет-разложения [27-28].



**Рисунок 3.1 – График зависимости погрешности выделения геомагнитного сигнала от уровня вейвлет-разложения. По горизонтальной оси - уровни вейвлет-разложения, по вертикальной оси – погрешность [15]**

Анализ рисунка (3.1) показывает, что наименьшую погрешность обеспечивает шестой уровень разложения сигнала.

На рисунке 3.2 показан пример вейвлет-разложения дня с состоянием поля «магнитная буря».

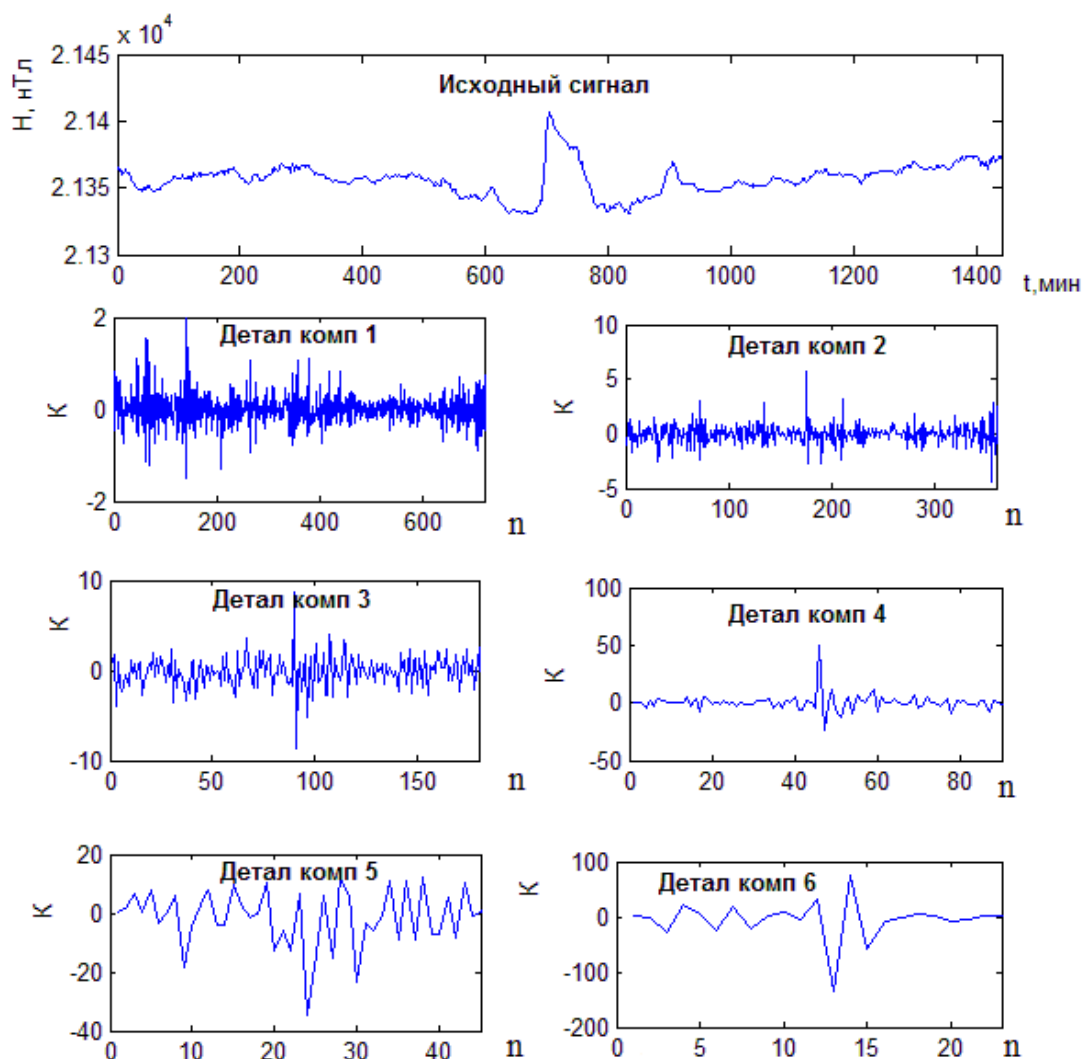
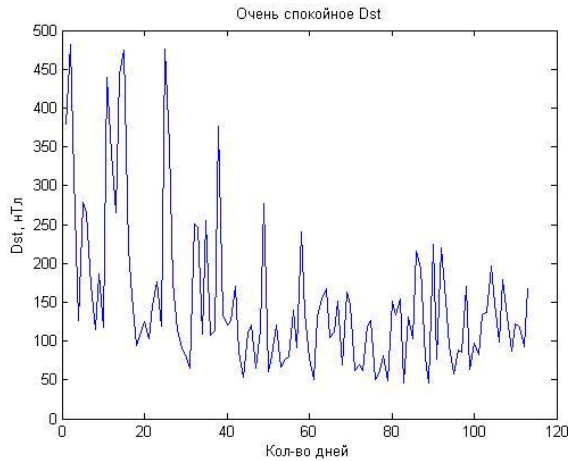


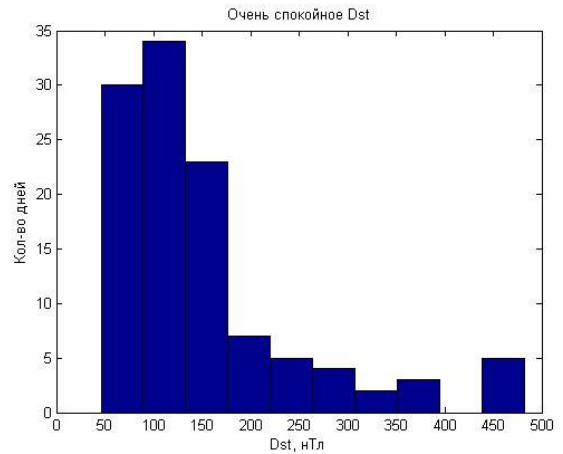
Рисунок 3.2 – Вейвлет разложение геомагнитного сигнала [16]

На рисунке 3.2 видно, что с глубиной разложения амплитуда детализирующих компонент возрастает. И части сигнала детализирующей компоненты все больше напоминают базис вейвлета. Поэтому данный математический аппарат –вейвлет-анализ хорошо подходит для изучения сложных сигналов.

С помощью коллектива нейронных сетей определяется и решающих правил опеределяется класс возмущения. На графиках и гистограммах (рисунок 3.3-3.7) полученных входе эксперимента представлены значения суточных значений Dst-вариаций (нТл) и количество дней соответствующих классов.



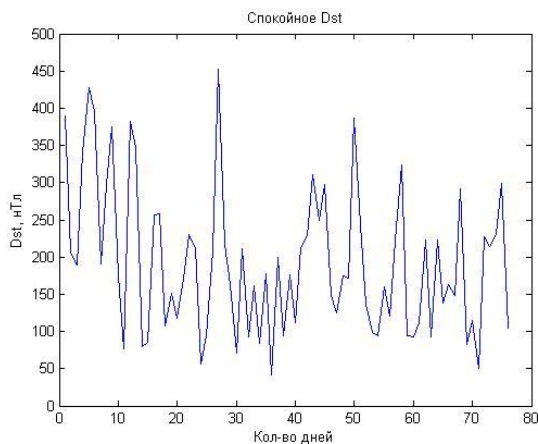
а)



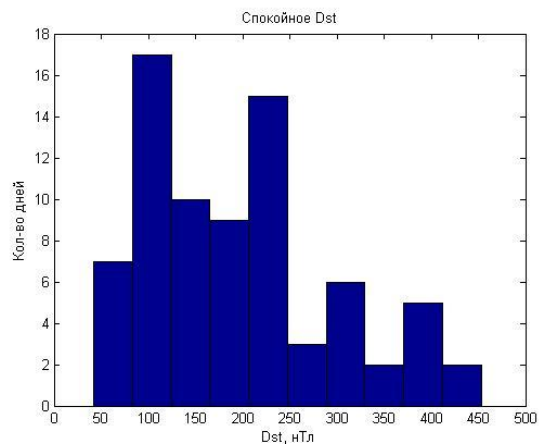
б)

**Рисунок 3.3 – Dst-вариации состояния «Очень спокойное поле», класс 1:**  
**а) график суточных значений «Класса 1»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Класса 1»**

На рисунке 3.3а) видно, что максимальное значение Dst-вариации «Класса1» находится около 480 нТл, минимальное около 50 нТл. А рисунок 3.3б) показывает, что наибольшее количество дней находятся в интервалах от 50 нТл до 150 нТл.



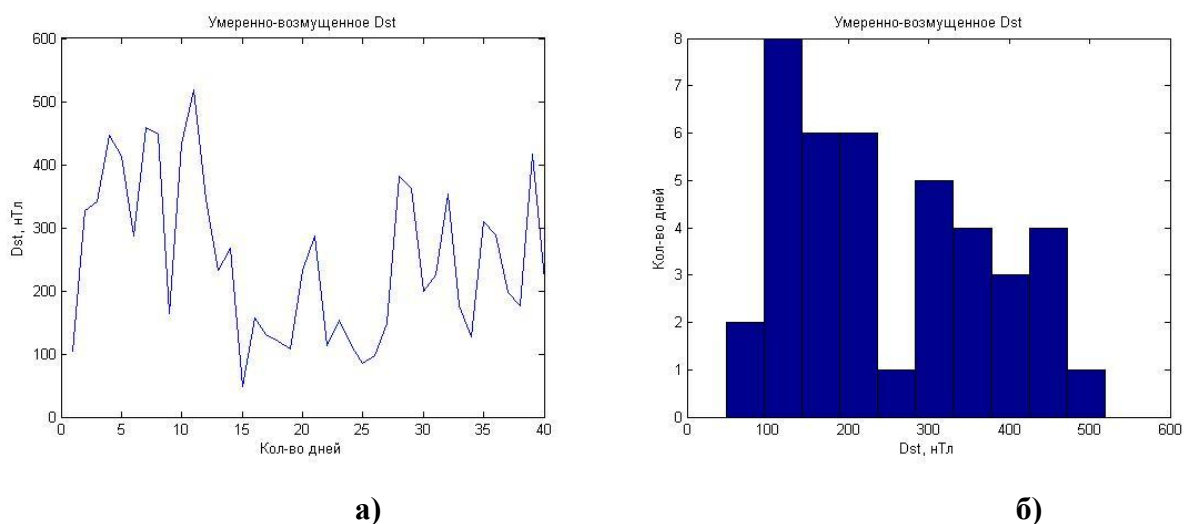
а)



б)

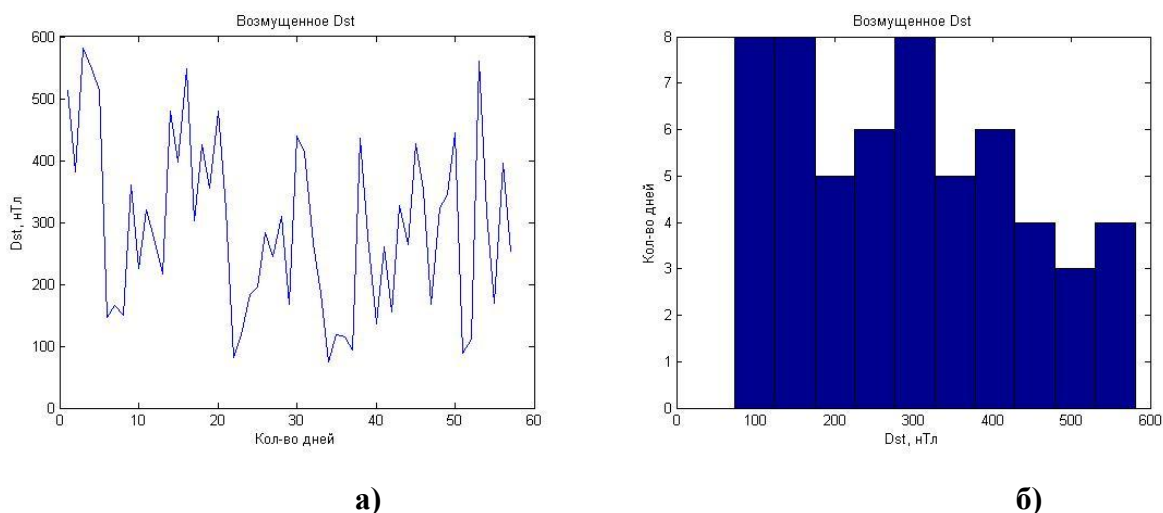
**Рисунок 3.4 – Dst-вариации состояния «Спокойное поле», класс 2:**  
**а) график суточных значений «Класса 2»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Класса 2»**

На рисунке 3.4а) видно, что максимальное значение Dst-вариации «Класса2» находится около 480 нТл, минимальное около 50 нТл, как и у первого класса. А рисунок 3.4б) показывает, что наибольшее количество дней находятся в интервалах от 50 нТл до 250 нТл. И в отличие от первого класса больше дней преобладают в области высоких значений Dst-вариаций.



**3:** **а) график суточных значений «Класса 3»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Класса 3»**

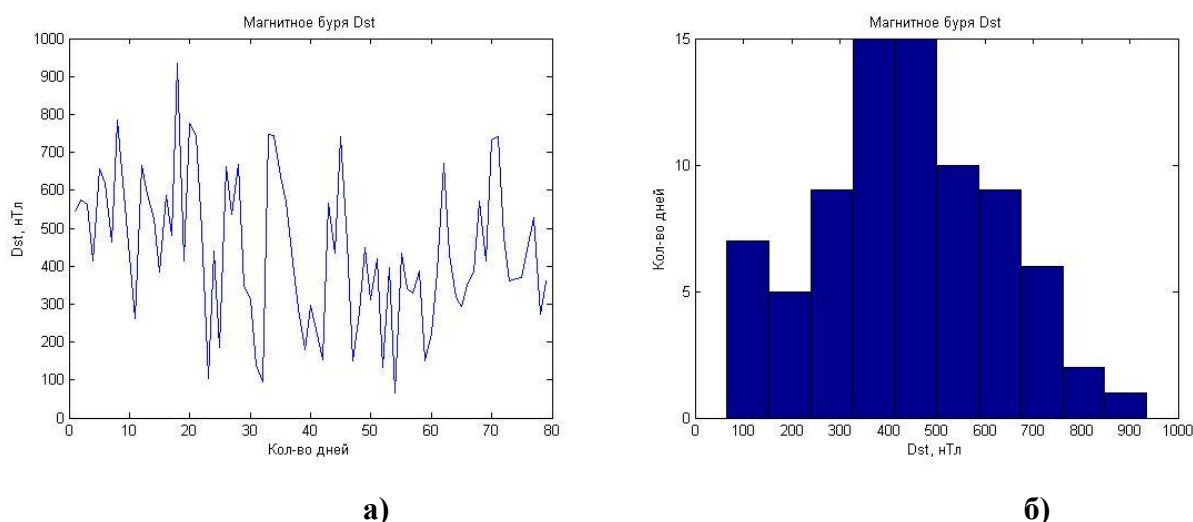
На рисунке 3.5а) видно, что максимальное значение Dst-вариации «Класса 3» находится около 550 нТл, минимальное около 60 нТл, что больше первого и второго классов. А рисунок 3.5б) показывает, что наибольшее количество дней сосредоточены в интервалах от 50 нТл до 250 нТл и в области максимальных значений от 300 нТл до 550 нТл.



**Рисунок 3.6 – Dst-вариации состояния «Возмущенное поле», класс 4:**  
**а) график суточных значений «Класса 4»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Класса 4»**

На рисунке 3.6а) видно, что максимальное значение Dst-вариации «Класса 4» достигают 600 нТл, а минимальное начинается от 100 нТл, что больше первого, второго, третьего классов. А рисунок 3.6б) показывает, что

наибольшее количество дней сосредоточены в интервалах от 100 нТл до 300 нТл и в области максимальных значений от 400 нТл до 600 нТл.



**Рисунок 3.7 – Dst-вариации состояния «Магнитная буря», класс 5:**  
**а) график суточных значений «Класса 5»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Класса 5»**

На рисунке 3.7а) видно, что максимальное значение Dst-вариации «Класса 5» достигают 950 нТл, а минимальное начинается от 100 нТл, что больше максимальных значений 1,2,3,4-классов. А рисунок 3.7б) показывает, что наибольшее количество дней сосредоточены в интервалах от 300 нТл до 700 нТл.

Результаты работы вычислительных алгоритмов №1 и №2 (входные сигналы Н-компоненты и Dst-вариации) на основе решающих правил №1 и №2 соответственно, представлены в таблицах 3.1 и 3.2.

В таблицах 3.1 и 3.2 присутствует параметр "spread", который обозначает величину влияния или протяжения или коэффициент сглаживания радиальной базисной функции (Гаусса) и определяет ширину «колпаков» гауссовых функций с центром в каждом обучающем наблюдении. Малая величина протяжения приводит к функции с резкими пиками и малой ошибкой аппроксимации.

В данной работе погрешность является относительной и вычисляется как:

$$y = 1 - \frac{X_{\text{изм}}}{X_{\text{ном}}} \times 100\%, \quad (3.1)$$

где  $X_{\text{ИЗМ}}$  - измеренное значение,  $X_{\text{НОМ}}$  - номинальное значение.

**Таблица 3.1 - Результаты работы решающего правила №1 (входного параметра Н-компоненты )**

	Погрешность в %					Средняя погрешность в %
	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс	5 класс	
spread=1	17, 24	18, 18	28, 12	30, 70	1, 7,53	22,48
spread=2	24, 76	22, 72	31, 72	34, 33	1, 7,53	26,21
spread=3	17, 24	18, 18	33, 18	36, 27	1, 7,53	24,48
spread=4	14, 55	13, 63	33, 18	36, 27	1, 7,53	23,032
spread=5	14, 55	13, 63	40, 52	44, 64	1, 7,53	26,17
spread=6	10, 08	11, 66	40, 52	44, 64	2, 4,02	26,18
spread=7	10, 08	11, 66	40, 52	44, 64	2, 4,02	26,18
spread=8	10, 08	11, 66	45, 76	47, 48	2, 4,02	27,80
spread=9	8,3 9	9,1 4	49, 31	52, 75	3, 1,80	30,28
spread=10	8,3 9	9,1 4	49, 31	55, 39	3, 1,80	30,80

**Таблица 3.2 - Результаты работы решающего правила №2 (входного параметра Dst-вариации)**

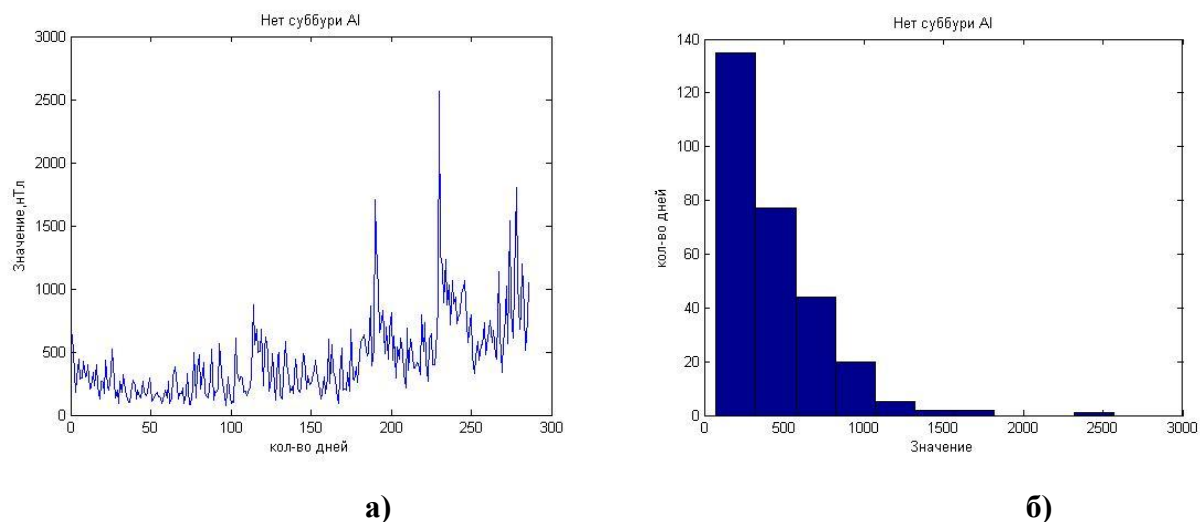
	Погрешность в %					Средняя погрешность в %
	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс	5 класс	
spread=1	20, 41	23, 20	30, 88	28, 17	2, 2,09	24,95
spread=2	27, 23	27, 73	35, 26	32, 29	2, 2,09	28,92
spread=3	20, 41	23, 85	38, 53	35, 30	2, 2,09	28,04
spread=4	17, 58	18, 27	43, 10	39, 99	2, 2,09	28,20
spread=5	17, 58	18, 27	43, 10	39, 99	2, 2,09	28,21
spread=6	17, 58	18, 27	43, 10	39, 99	2, 7,48	29,28
spread=7	14, 14	15, 15	47, 47	44, 44	2, 2	29,85



	66	01	87	25	7,48	
spread=8	14,	15,	47,	44,	2	
	66	01	87	25	7,48	29,85
spread=9	14,	15,	47,	50,	3	
	66	01	87	02	6,17	32,75
spread=10	12,	11,	56,	53,	3	
	97	46	33	19	6,17	34,02

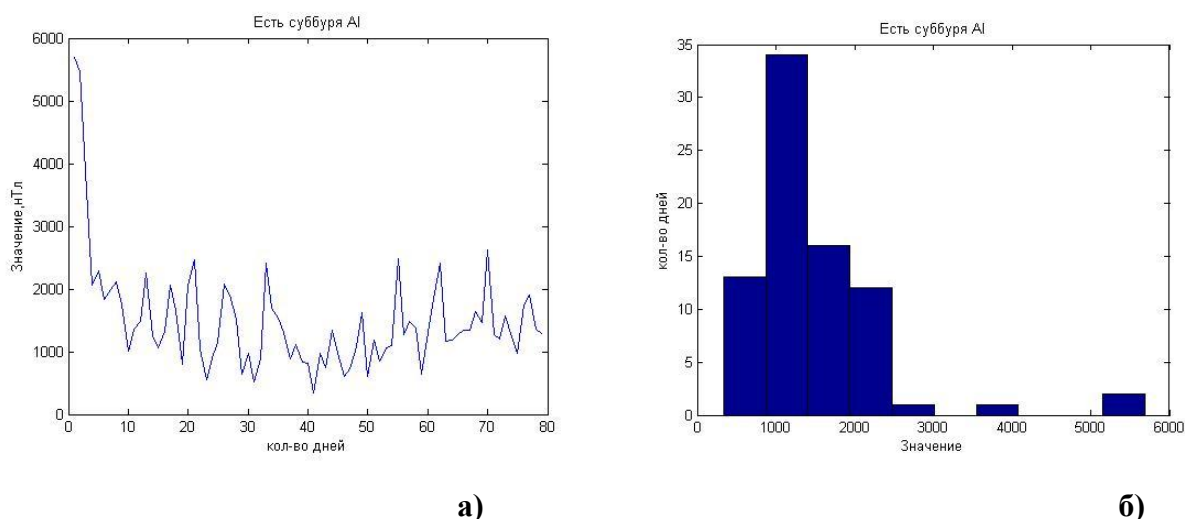
Из таблицы 3.1 и 3.2 видно, что с увеличением параметра "spread" погрешность класса 1 и 2 уменьшается, а погрешность 3, 4, 5 классов увеличивается. Самым оптимальными значениями погрешностей является, когда "spread" равен 1.

На основе экспериментов с Ae-индексом (рисунок 3.8-3.11) определены пороги для двух состояний «Есть суббурия» и «Нет суббурии»



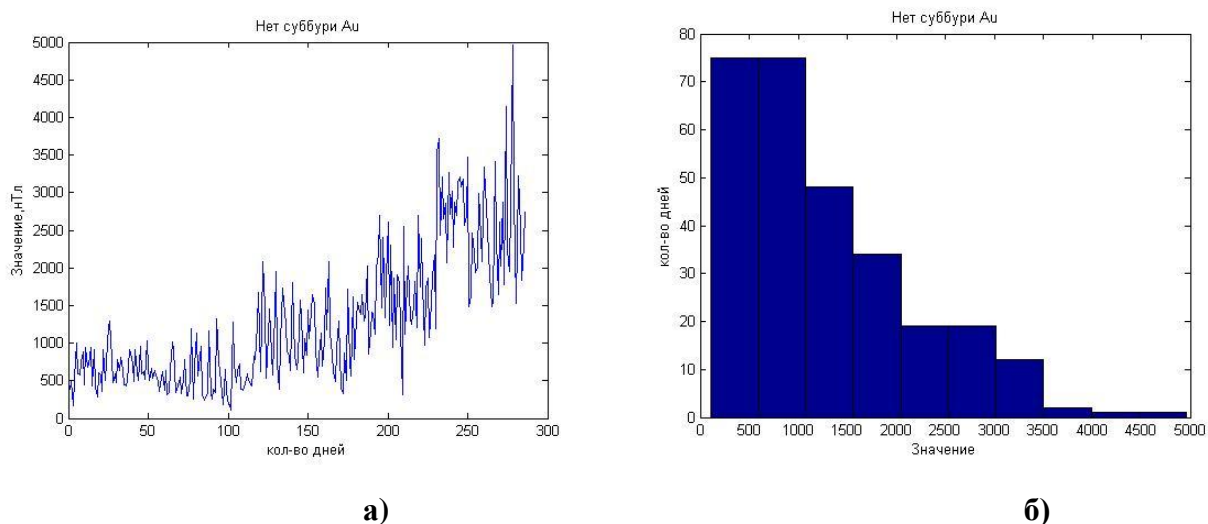
**Рисунок 3.8 - AI-индекс состояния поля, «Нет суббурии»:**  
**а) график суточных значений «Нет суббурии»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Нет суббурии»**

На рисунке 3.8а) видно, что максимальное значение AI-индекса класса «Нет суббурии» достигают 2500 нТл, а минимальное начинается от 50 нТл. А рисунок 3.8б) показывает, что наибольшее количество дней сосредоточены в интервалах от 50 нТл до 500 нТл.



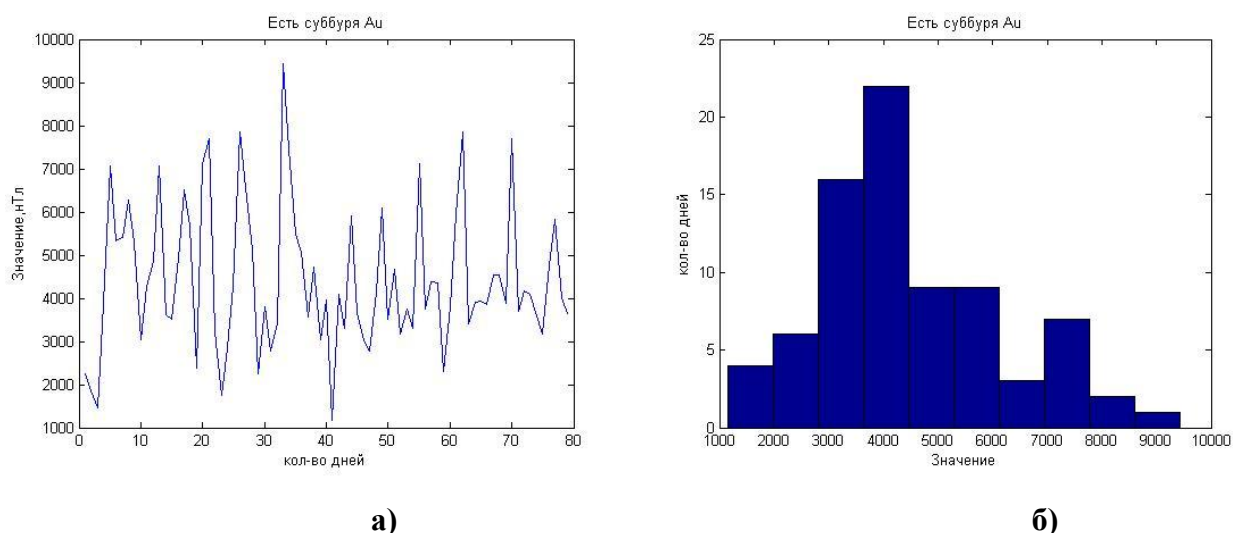
**Рисунок 3.9 - AI-индекс состояния поля, «Есть суббурия»:**  
**а) график суточных значений «Есть суббурия»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Есть суббурия»**

На рисунке 3.9а) видно, что максимальное значение AI-индекса класса «Есть суббурия» достигают 5800 нТл, а минимальное начинается от 400 нТл. А рисунок 3.9б) показывает, что наибольшее количество дней сосредоточены в интервалах от 1000 нТл до 2000 нТл, что по сравнению с классом «Нет суббурия» имеет отличительный характер.



**Рисунок 3.10 - Au-индекс состояния поля, «Нет суббурия»:**  
**а) график суточных значений «Нет суббурия»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Нет суббурия»**

На рисунке 3.10а) видно, что максимальное значение Au-индекса класса «Нет суббурия» достигают 5000 нТл, а минимальное начинается от 50 нТл. А рисунок 3.11б) показывает, что наибольшее количество дней сосредоточены в интервалах от 50 нТл до 3000 нТл.



**Рисунок 3.11 - Au-индекс состояния поля, «Есть суббурия»:**  
**а) график суточных значений «Есть суббурия»;**  
**б) гистограмма суточных значений «Есть суббурия»**

На рисунке 3.11а) видно, что максимальное значение Au-индекса класса «Есть суббурия» достигают 9500 нТл, а минимальное начинается от 1000 нТл, что значительно больше класса «Нет суббурии». А рисунок 3.11б) показывает, что наибольшее количество дней сосредоточены в интервалах от 3000 нТл до 6000 нТл, что по сравнению с классом «Нет суббурии» имеет отличительный характер.

Для определения порогового значения проведен ряд экспериментов, где порог изменялся с интервалом 50 нТл и вычислялась для каждого погрешность определения класса относительно эталонному сопоставленному по К-индексу. Результаты работы решающего правила и его оптимизация представлены в таблице 3.3. В качестве примера приведены три варианта порогов.

**Таблица 3.3 – Результаты работы решающего правила №3**

<b>Порог</b>	<b>Вариант №1</b>	<b>Вариант №2</b>	<b>Вариант №3</b>
$A_l, \text{нТл}$	500	800	1000
<b>Погрешность, %</b>	<b>42,6</b>	<b>35,1</b>	<b>24,5</b>
$A_u, \text{нТл}$	2500	3000	3500
<b>Погрешность, %</b>	<b>37,2%</b>	<b>21,7</b>	<b>43,8</b>

Из таблицы видно, что наименьшая погрешность у порога  $A_l$  имеет «Вариант №3», а наименьшей погрешностью у порога  $A_u$  является «Вариант

№2». Следовательно средняя погрешность решающего правила №3 равна 23,1%.

С помощью разработанного метода на основе тестируемых геомагнитных данных Н-компоненты, Dst-вариации, Ae-компоненты за 2003 год определены суточные состояния поля к классам. Результаты экспериментов по обнаружению суточных состояний поля на основе КРП (конечного решающего правила) приведены в таблице (3.4).

Для определения погрешности состояния поля и погрешности работы метода, используется выражение (3.1).

$$\varepsilon = \frac{n}{N_{\text{кл}}}, \quad (3.1)$$

где  $\varepsilon$  – погрешность работы алгоритма;  $n$  – количество дней в классе, определенное с помощью разработанного алгоритма;  $N_{\text{кл}}$  – количество дней в классе, определенное с помощью К-индекса [16].

**Таблица 3.4 – Результаты работы КРП (разработанного метода) и его погрешность**

Состояние поля	Суббурия	Кол-во дней определенных по К-индексу, $N_{\text{кл}}$		Количество выявленных дней, $n$	
Очень спокойное	–	121		101	
Спокойное поле	Есть суббурия	82	21	109	16
	Нет суббурии		61		93
Умеренно-возмущенное поле	Есть суббурия	32	16	24	9
	Нет суббурии		16		15
Возмущенное поле	Есть суббурия	64	49	78	59
	Нет суббурии		15		19
Магнитная буря	–	66		53	
<b>Погрешность, <math>\varepsilon</math></b>	–	<b>0%</b>		<b>23,51%</b>	

Анализ таблицы (3.4) показывает, с помощью разработанного метода на вход которого подавались тестируемые геомагнитных данных Н-компоненты, Dst-вариации, Ae-компоненты за 2003 год удалось определить суточные состояния поля к классам. Всего 365 дней, из которых: 101 дней

имеют состояние "очень спокойное поле» (класс 1); 109 дней - "спокойное поле" (класс 2), из которых 16 дней имеют состояние «Есть суббуря», а остальные 93 дня – «Нет суббури»; 24 дней - "умеренно-возмущенное поле» (класс 3), из которых 9 дней имеют состояние «Есть суббуря», а остальные 15 дня – «Нет суббури»; 78 дней - «возмущенное поле» (класс 4), из которых 59 дней имеют состояние «Есть суббуря», а остальные 19 дней – «Нет суббури»; 53 дней имеют состояние «Магнитная буря».

Предлагаемый метод обнаружения возмущений имеет погрешность – 23,51%. Преимущество данного метода заключается в том, что вейвлет-преобразование позволяет детально изучить структуру данных и выделить информативные компоненты, что в свою очередь позволяет оптимизировать процедуру обучения нейронной сети и повысить эффективность ее работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы достигнута. Поставленные задачи решены.

Основные научные и практические результаты работы можно сформулировать следующим образом:

- 1) Проведены эксперименты с данными мониторинга состояния ОКП;
- 2) Разработан метод оценки состояния ОКП(околоземного пространства):

- Предложен подход, основанный на объединении двух аппаратов: *вейвлет-преобразования*, для выделения информативных составляющих сигналов, и *вероятностные нейронные сети*, определяющие состояния компонент сигналов;

- Разработана структура коллектива нейронных сетей по анализу детализирующих компонент Н-вариации;

- Разработана структура коллектива нейронных сетей по анализу детализирующих компонент Dst-вариации;

- Создан блок пороговых функций для анализа данных АЕ-индекса

- 3) Разработан автоматический алгоритм реализации разработанного метода;

- 4) Определена погрешностью (23,51%) разработанного метода;

- 5) Разработанный метод может быть реализован в аппаратной среде и использоваться геомагнитными обсерваториями в задачах оценки состояния ОКП.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Космическая среда вокруг нас [Текст] / Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б; – Троицк: ТРОВАНТ, 2006. – 232 с.
2. Нечаев, С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений [Текст] / С.А. Нечаев. – Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2006. –140 стр.
3. Митра, С. К. Верхняя атмосфера, пер. с англ., М., 1955;
4. Фельдштейн, Я.И., Зайцев, А.Н. Возмущенные солнечно-суточные вариации в высоких широтах в период ММГ. – Геомагнетизм и аэрономия / Я.И.Фельдштейн, А.Н. Зайцев. – М.:, 1965., – Т.5, № 3 С.481-487.
5. Квазипериодические пульсации магнитного поля Земли с периодами 20-200 мин и их связь с аналогичными пульсациями в радиоизлучении Солнца перед протонными вспышками.-Геомагнетизм и аэрономия [Текст] / М.В. Быстров, М.М Кобрин, С.Д.Снегирев .-1979 ,№ 2, С.306-310.
6. Жеребцов, Г.А., Коваленко, В.А. Проявление глобальных изменений в климатических характеристиках Прибайкалья. Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физики Солнца [Текст] / Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко. – 2001. вып. 113. С.172-177.
7. Сергеев, В. А., Цыганенке, Н. А. Магнитосфера Земли [Текст] / В. А. Сергеев, Н. А. Цыганенке. – М.: 1980.
8. Заболотная, Н.А. Индексы геомагнитной активности: Справочное пособие / Н.А. Заболотная. – 2007. - 88 с.
9. Брюнелли, Б.Е., Ляцкий, В.Б. Физика авроральных явлений [Текст] / Б.Е. Брюнелли, В.Б. Ляцкий. – М: Наука, 1988. – 263с.
10. Бат, М. Спектральный анализ в геофизике / Бат М.; Пер с англ. – Москва, Недра, 1980, 535 с.
11. Бокс, Дж. Анализ временных рядов прогноз и управление [Текст] / Дж. Бокс, – М.: Мир, 1274. - 604 с.

12. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. М.: – ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 816 с.

13. Головков, В.П., Папиташвили, В.О., Папиташвили Н.Е. Автоматизированное вычисление К-индексов с использованием метода естественных ортогональных составляющих // М.: Геомагнетизм и аэрономия. - 1989. - Т.29. № 4. – С.667-670.

14 Яновский, Б.М. Земной магнетизм. Учеб. пособие. Изд. 4-е, перераб. и дополн. / Б.М. Яновский. Под Ред. В. В. Металлова. – Л.: изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 592с.

15. Мандрикова, О.В., Соловьев, И.С. Вейвлет-технология обработки и анализа геомагнитных данных / О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев // М.: Цифровая обработка сигналов. – 2012. №2 С. 24-29.

16. Коновалов, А.А. Разработка автоматического алгоритма определения состояний магнитного поля земли по геомагнитным данным [Текст]: выпускная квалификационная работы бакалавра: защищена 2015 / Коновалов Алексей Александрович. – Белгород, 2015. – 79 с.

17. Коновалов, П.А. Исследование вариаций геомагнитного поля (на примере n-компонент) и выделения и оценки возмущений [Текст] / П.А. Коновалов , А. В. Киселенко// 13 Курчатовская молодежная научная школа: сб. аннотаций. – Белгород, 2015. – С. 159-160.

18. Коновалов, П.А. Разработка метода выделения эффектов космической погоды, влияющих на средства распространения радиоволн [Текст] / П.А. Коновалов // Естественнонаучные, инженерные и экономические исследования в технике, промышленности, медицине и сельском хозяйстве: сб. статей. – Белгород, 2017. – С. 230-233.

19. Новиков, Л.В. Адаптивный вейвлет-анализ сигналов / Л.В. Новиков // Научное приборостроение. -1998. -Т.9. -№2. -С.30-37.



20. Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова ФГБУ "ИПГ" [Электрон. ресурс] // ФГБУ – 2017 . Режим доступа: <http://ipg.geospace.ru/>, свободный.

21. Долгаль, А.С. Использование быстрого вейвлет-преобразования при решении прямой задачи гравиразведки / А.С. Долгаль // Доклады РАН. – 2004. Т.399, № 8. С.1177-1179

22. Дремин, И.М., Иванов, О.В., Нечитайло, В.А. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. Т.171, № 3. С.465-501

23. Чуи, К. Введение в вейвлеты./ К. Чуи; Пер. с английского, М.: Мир.– 2001. 128 с.

24. Коновалов, П.А. Исследование и разработка алгоритмов анализа вариаций геомагнитного поля (на примере n-компонент) и выделения и оценки возмущений [Текст]: выпускная квалификационная работы бакалавра: защищена 2015 / Коновалов Павел Александрович. – Белгород, 2015. – 68 с.

25. Дмитриев, Э.М., Филиппов, В.А. Алгоритм расчета индексов геомагнитной активности. / Э.М. Дмитриев, В.А. Филиппов // V международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. 2010. - С.110-113.

26. Мандрикова, О.В. Моделирование геохимических сигналов на основе вейвлет-преобразования [Текст] / О.В. Мандрикова. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 123с.

27. Мандрикова, О.В., Соловьев, И.С. Вейвлет-технология обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли / О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев // М.: Информационные технологии –2011. №1 – С. 34-38.

28. Мандрикова, О.В., Соловьев, И.С. Вейвлет-технология анализа вариаций геомагнитного поля / О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев // 13-я

международная конференция: цифровая обработка сигналов и ее применение – М.: Информпресс – 2011. - Т. 2 – С. 247-250.

29. Мандрикова, О.В., Соловьев, И.С. Вейвлет-технология обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли / О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев // 8-я международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» (ИОИ-8), Москва: МАКСС Пресс, 2010. – С.430-433.

30. Мандрикова, О.В. Многокомпонентная модель сигнала со сложной структурой / О.В. Мандрикова // Проблемы эволюции открытых систем. 2008. -Вып. 10. -Т. 2 - С.161-172.

31. Яновский, Б.М. Земной магнетизм: Учеб. пособие / Б.М. Яновский. - 4-е изд. - Л.: изд-во Ленингр. ун-та, 2012. - 592 с.

32. Berthelier, A. Menvielle, M. Bitterly, M. Quasi real time determination of K-derived planetary indices - 1. The K index derivation. / A. Berthelier, M. Menvielle, M. Bitterly // Proc. VI-th International Workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition and processing. 18-24 September 2006 г. - Dourbes, Belgium, 2006. - P. 144-147.

33. Nowozynski K. Calculate geomagnetic activity K indices using the adaptative smoothing method // URL: <http://www.intermagnet.org> (дата обращения: 08.05.2015).

34. Бархатов, Н.А. Ревунов, С.Е. Урядов, В.П. Технология искусственных нейронных сетей для прогнозирования критической частоты ионосферного слоя F2 / Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов, В.П. Урядов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. - 2005. - Т. 48. - 1. - С. 1 - 15.

35. Белинская, А.Ю. Хомутов, С.Ю. Возможности магнитно-ионосферных наблюдений в задачах прогноза и диагностики природных и техногенных экстремальных событий / А.Ю. Белинская, С.Ю. Хомутов // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. - 2012. - Т. 3. - 1. - С. 37 - 45.

36. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам [Текст] / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 463 с.: ил.

37. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс [Текст] / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.: ил.

38. Савченко, А.В. Распознавание изображений на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности / А.В. Савченко // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37 – №2. – С.254-262.

39. Мандрикова, О.В. Жижикина, Е.А. Оценка состояния геомагнитного поля на основе совмещения вейвлет-преобразования с радиальными нейронными сетями / О.В. Мандрикова, Е.А. Жижикина // Машинное обучение и анализ данных. - 2014. - Т. 1. - 10. - С. 1335 - 1344.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

В данном приложении представлен листинг разделения дней на 5 классов по  $k$  - индексу геомагнитной активности.

```
%Суммирование Кр - индекса. Создание решающих правил Кр-индексов.
Соответствие номеров дней к созданным классам.
clc
clear
[aa,bb]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Кр.xls');
A1=aa';
N=length(A1);

n=1;b=0;c=0;q=0;e1=0;e2=0;e3=0;e4=0;e5=0; k=0;
for i=n:8:N
    A=0;k=k+1;
    for n=i:i+7
        b=b+1;
        q=q+1;
        A=A+A1(n); % Суммирование К-индекса
        W1(q)=A1(n); % Массив данных значений Кр-индекс
    end
    W(k)=A; % Массив данных значений Кр-индекс
    q=0;

%Решающие правила
%1 ОЧЕНЬ-СПОКОЙНОЕ ПОЛЕ - КЛАСС 1
    if A<=6 %РП №1
        for j=1:8;
            C1(j+8*e1,1)=W1(j); % Массив данных значений Кр-индекс КЛАСС 1
        end
        e1=e1+1; % Счетчик 1,2,3,...
        ee1(e1)=k; % Массив данных с номерами дней в году 1-ого класса

%2 СПОКОЙНОЕ ПОЛЕ - КЛАСС 2
    elseif A<=11 % РП №2
        for j=1:8;
            C2(j+8*e2,1)=W1(j); % Массив данных значений Кр-индекс КЛАСС 2
        end
        e2=e2+1; % Счетчик 1,2,3,...
        ee2(e2)=k; % Массив данных с номерами дней в году 2-ого класса

%3 УМЕРЕННО-ВОЗМУЩЕННОЕ ПОЛЕ - КЛАСС 3
    elseif A>11 & A<=14 % РП №3
        for j=1:8;
            C3(j+8*e3,1)=W1(j); % Массив данных значений Кр-индекс КЛАСС 3
        end
        e3=e3+1; % Счетчик 1,2,3,...
        ee3(e3)=k; % Массив данных с номерами дней в году 3-ого класса

%4 ВОЗМУЩЕННОЕ ПОЛЕ - КЛАСС 4
    elseif A>14 & A<=18 % РП №4
        for j=1:8; % Счетчик 1,2,3,...
            C4(j+8*e4,1)=W1(j); % Массив данных значений Кр-индекс КЛАСС 4
        end
        e4=e4+1; % Счетчик 1,2,3,...
        ee4(e4)=k; % Массив данных с номерами дней в году 4-ого класса
```

```

%5 БУРЯ (Сильновозмущенное) - КЛАСС 5
elseif A>18 % РП №5
for j=1:8;
    C5(j+8*e2,1)=W1(j); % Массив данных значений Кр-индекс КЛАСС 5
end
e5=e5+1; % Счетчик 1,2,3,...
ee5(e5)=k; % Массив данных с номерами дней в году 4-ого класса
end
n=n+8;
end

```

Ниже представлен листинг: алгоритм определения состояний магнитного поля Земли по Dst-вариациям.

```

clc
clear
[aa1,bb1]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 1 кл - Очень спокойное.xls');
[aa2,bb2]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 2 кл - Спокойное.xls');
[aa3,bb3]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 3 кл - Умеренно-возмущенное.xls');
[aa4,bb4]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 4 кл - Возмущенное.xls');
[aa5,bb5]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 5 кл - Буря.xls');
%[dst,D]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Dst 2007\Dst_2007_часовые.xls');
[DST,D]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Dst 2007\Dst_2007_дневные.xls');
Kp1=aa1; Kp2=aa2; Kp3=aa3; Kp4=aa4; Kp5=aa5; %Массивы с Кр-индексами соотв-но
классам
N=length(DST);
Dst=DST';

% % Определения суммарного Dst-индекса за каждый день
% n=1;b=0;c=0;q=0;e1=0;e2=0;e3=0;e4=0;e5=0; k=0;
% for i=n:24:N
%     DS=0;k=k+1;
%     for n=i:i+23
%         b=b+1;
%         q=q+1;
%         D=abs(dst(n));
%         DS=DS+D; % Суммирование Dst-индекса
%         W1(q)=D; % Массив Dst-индексов за один день
%     end
%     %DST1(k)=DS;
%     %DST=DST1'% Массив Dst-индексов за год
%     q=0;
% end

%1 класс
N1=length(Kp1);
for i=1:N1
    Dst1(i)=Dst(Kp1(i));
end
%2 класс
N2=length(Kp2);
for i=1:N2
    Dst2(i)=Dst(Kp2(i));
end
%3 класс

```

```

N3=length (Kp3) ;
for i=1:N3
    Dst3 (i) =Dst (Kp3 (i)) ;
end
%4 класс
N4=length (Kp4) ;
for i=1:N4
    Dst4 (i) =Dst (Kp4 (i)) ;
end
%5 класс
N5=length (Kp5) ;
for i=1:N5
    Dst5 (i) =Dst (Kp5 (i)) ;
end

```

Ниже представлен листинг: алгоритм определения состояний магнитного поля Земли по Ae-индексам сопоставляемых K-индексу.

```

% Суммирование Ae-индекса.
clc
clear
[aa1,bb1]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 1 кл - Очень спокойное.xls');
[aa2,bb2]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 2 кл - Спокойное.xls');
[aa3,bb3]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 3 кл - Умеренно-возмущенное.xls');
[aa4,bb4]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 4 кл - Возмущенное.xls');
[aa5,bb5]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Кр 2007\Номера дней 5 кл - Буря.xls');
%[dst,D]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Dst 2007\Dst_2007_часовые.xls');
[Au,D]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Ae 2007\AU_2007_часовые.xlsx');
[Al,D]=xlsread('D:\ПАШКИНО\УНИВЕР\Магистратура\ДИССЕРТАЦИЯ\Данные для
обучения\Ae 2007\AL_2007_часовые.xlsx');
Kp1=aa1; Kp2=aa2; Kp3=aa3; Kp4=aa4; Kp5=aa5; %Массивы с Kр-индексами соотв-но
классам
N=length (Au) ;

% Определения суммарного AU,AL-индекса за каждый день
n=1;b=0;c=0;q=0;e1=0;e2=0;e3=0;e4=0;e5=0; k=0;
for i=n:24:N
    AL=0;AU=0;k=k+1;
    for n=i:i+23
        b=b+1;
        q=q+1;
        D1=abs (Au (n)) ;
        D2=abs (Al (n)) ;
        AU=AU+D1; % Суммирование AU-индекса
        W1 (q) =D1; % Массив AU-индексов за один день

        AL=AL+D2; % Суммирование AL-индекса
        W2 (q) =D2; % Массив AL-индексов за один день

    end
    AUU (k) =AU;
    ALL (k) =AL;
    AU=AUU'; % Массив AU-индексов за год
    AL=ALL'; % Массив AL-индексов за год

```

```

    q=0;
end

%% AU - классы
%1 класс - Спокойное
N1=length(Kp1);
for i=1:N1
    Au1(i)=AU(Kp1(i));

end
N2=length(Kp2);
for i=1:N2
    Au1(i+N1)=AU(Kp2(i));
end
%2 класс - Слабовозмущенное
N3=length(Kp3);
for i=1:N3
    Au1(i+N1+N2)=AU(Kp3(i));
end
N4=length(Kp4);
for i=1:N4
    Au1(i+N2+N1+N3)=AU(Kp4(i));
end
%5 класс - Сильновозмущенные
N5=length(Kp5);
for i=1:N5
    Au3(i)=AU(Kp5(i));
end
%% AL - классы
%1 класс - Спокойное
N1=length(Kp1);
for i=1:N1
    Al1(i)=AL(Kp1(i));

end
N2=length(Kp2);
for i=1:N2
    Al1(i+N1)=AL(Kp2(i));
end
%2 класс - Слабовозмущенное
N3=length(Kp3);
for i=1:N3
    Al1(i+N2+N1)=AL(Kp3(i));
end
N4=length(Kp4);
for i=1:N4
    Al1(i+N3+N1+N2)=AL(Kp4(i));
end
%3 класс - Сильновозмущенные Суббурия
N5=length(Kp5);
for i=1:N5
    Al3(i)=AL(Kp5(i));
end

```

Ниже представлен листинг алгоритма определения состояний магнитного поля Земли по геомагнитным данным.

```

clc
clear
H=dlmread('D \obuchay.txt'); ;
[N,L]=size(H); % где L-кол-во столбцов и N-кол-во строк

```





```

net=newpnn(H,T,S);Y=sim(net,H); % Обучение и модел-ние нейронной сети на H-
комп-тах

net1=newpnn(D1,T,1); % Обучение нейронной сети 1|1
net2=newpnn(D2,T,1); % Обучение нейронной сети 2|1
net3=newpnn(D3,T,1); % Обучение нейронной сети 3|1
net4=newpnn(D4,T,4); % Обучение нейронной сети 4|4
net5=newpnn(D5,T,4); % Обучение нейронной сети 5|4
net6=newpnn(D6,T,8); % Обучение нейронной сети 6|8

% Моделироание нейроной сети
Y1=sim(net1,D1); Y2=sim(net2,D2);
Y3=sim(net3,D3); Y4=sim(net4,D4);
Y5=sim(net5,D5); Y6=sim(net6,D6);
% Преобразование м-цы связности в индексный вектор (ВЕКТОР КЛАССА)
Y1c=vec2ind(Y1); Y2c=vec2ind(Y2);
Y3c=vec2ind(Y3); Y4c=vec2ind(Y4);
Y5c=vec2ind(Y5); Y6c=vec2ind(Y6);
%=====
% //////////////////////////////////ПРОВЕРКА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ\////////////////////////////////////
%=====
% Чтение H-компонент для проверки нейроной сети: 200 дней (50-возмущенных,60-
слабовозмущенных,90-спокойных)
H_prov=dlmread('D:\Мои документы\Леха Паха\Мои работы\ЛЕШКИНО не
ТРОГАТЬ\ВелГУ\Диплом\proverka.txt');%

[NN,LL]=size(H_prov); % где LL-кол-во столбцов и NN-кол-во строк
clear k i j c l dlina
for j=1:6 % где j - номер детализирующей компоненты
clear A_prov
for i=1:LL % цикл детализирующих компонент
Hi_prov=H_prov(:,i); % i-ый столбец массива H_prov (№ дня)
[c,l]=wavedec(Hi_prov,6,'db3');% вейвлет-разложение до 6 уровня
[D_prov]=detcoef(c,l,j);% выделение детализирующих компонент
dlina=length(D_prov);
for k=1:dlina;
A_prov(k,i)=abs(D_prov(k));%/max(D_prov);
end
%-----
if j==1; D1_prov=A_prov; % проверочные детализирующие компоненты всех
дней 1-го уровня
else if j==2; D2_prov=A_prov; % проверочные детализирующие компоненты
всех дней 2-го уровня
else if j==3; D3_prov=A_prov; % проверочные детализирующие компоненты
всех дней 3-го уровня
else if j==4; D4_prov=A_prov; % проверочные детализирующие
компоненты всех дней 4-го уровня
else if j==5; D5_prov=A_prov; % проверочные
детализирующие компоненты всех дней 5-го уровня
else if j==6; D6_prov=A_prov; % проверочные
детализирующие компоненты 6-го уровня
end
end
end
end
end
end
end
end
% Моделироание нейроной сети-----
Y1_prov=sim(net1,D1_prov); Y2_prov=sim(net2,D2_prov);
Y3_prov=sim(net3,D3_prov); Y4_prov=sim(net4,D4_prov);
Y5_prov=sim(net5,D5_prov); Y6_prov=sim(net6,D6_prov);
% Преобразование м-цы связности в индексный вектор (ВЕКТОР КЛАССА)-----

```



end

Магистерская диссертация выполнена мной совершенно самостоятельно. Все использованные в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ г

\_\_\_\_\_ (*Коновалов Павел Александрович*)  
(подпись)