

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ $H$ – ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ВЛИЯНИЯ СИЛ ГРАВИТАЦИИ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Назаров Алишер Искендерович

доцент, кафедра «Компьютерные системы»

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

[alisher.nazarov.1958@mail.ru](mailto:alisher.nazarov.1958@mail.ru)

+998973434519

**Аннотация:** Прикладным исследованиям по влиянию геомагнитной активности на качество радиосвязи посвящены работы ученых во всем мире. В мировой практике проводятся интенсивные прикладные исследования по разработке алгоритмов и программ прогнозирования индексов геомагнитной активности, с помощью которых оценивается степень воздействия магнитных бурь на устойчивость радиосвязи.

В статье приведена разработка прогностической регрессионной модели  $H$  – индекса геомагнитной активности на использовании гравитационных сил планет солнечной системы без процедур экстраполяции для оценки состояния магнитосферы, влияющие на передачу коротковолновой связи наземных радиосистем.

**Ключевые слова:** прогноз, магнитная буря, индекс геомагнитной активности, силы гравитации, корреляция, регрессия, модель, адекватность, коротковолновая связь

### I. ВВЕДЕНИЕ

Индексы геомагнитной активности является одним из наиболее значимых параметров в изучении пространственной и временной изменчивости магнитного поля Земли. Этот показатель позволяет описать активность геомагнитной среды в текущий момент времени и сравнивать ее со временем. Он рассчитывается на основе данных, полученных от магнитных обсерваторий и спутниковых наблюдений, и является важным инструментом для понимания процессов, происходящих в магнитосфере<sup>7</sup>.

Индекс геомагнитной активности (ГМА) позволяет отслеживать и анализировать процессы в магнитосфере и ионосфере Земли, которые влияют на поведение радиоволн, спутниковых систем и космических аппаратов. Этот показатель также является основой для разработки моделей и прогнозов геомагнитных условий. На сегодняшний день отсутствует единая теория предсказания индексов ГМА. Это связано с тем, что индексы ГМА, как правило, испытывают циклические и случайные колебания, которые ведут к непостоянству их средних величин за большие интервалы времени. Поэтому методы прогнозирования порой являются чисто эмпирико-статистическими, опирающимися исключительно на всевозможные статистические связи между различными характеристиками ГМА.

Прикладной характер геомагнитных исследований обусловлен необходимостью прогнозирования электромагнитного состояния околоземной

<sup>7</sup> Бердалиева Н, Карачик Н. «Уникальный архив солнечных данных Астрономического института АН РУз». Ташкент, 2018, с. 79.

среды с целью уменьшения негативного воздействия магнитных бурь на работу наземных радиосистем. Проведение таких исследований стало возможным наличием информационных ресурсов индексов ГМА, полученных на наземных станциях магнитного наблюдения.

В этой связи, в мировой практике проводятся интенсивные прикладные исследования по разработке алгоритмов и программных комплексов прогнозирования индексов ГМА для оценки уровня магнитных бурь<sup>8</sup>.

Существенное влияние на состояние коротковолновой (КВ) радиосвязи могут иметь ионосферные и магнитные бури (МБ), т.е. возмущения ионосферы и магнитного поля Земли под воздействием потоков заряженных частиц, извергаемых Солнцем. МБ проявляются не только в полярных областях, но и на всем земном шаре. В периоды геомагнитных бурь в магнитосфере протекает кольцевой ток, интенсивность которого показывает энерговыделение в магнитосфере. Исследования солнечно-земных связей и влияния космической погоды на процессы, рассматриваемые смежными разделами науки — метеорологией, сейсмологией, биофизикой, кроме планетарных индексов магнитной активности, таких как Кр, А, аа и др., используют локальные индексы  $H$  кольцевого тока. Для оценки интенсивности магнитосферного кольцевого тока разработаны среднеширотные индексы  $H$ , которые позволяют выделять компоненты кольцевого тока. Изучение солнечно-земных связей часто ведется статистическими методами с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. Следует иметь в виду, что при суточном усреднении межпланетных параметров изменяются показатели плазменных и магнитных структур в солнечном ветре и что при суточном усреднении земных параметров накладываются друг на друга разные фазы геомагнитных бурь, поэтому особенности бурь (фазы, интенсивность, длительность и др.) нивелируются. Но интенсивность солнечных вспышек влияет на возмущение магнитосферы Земли, которое оценивается с помощью локального  $H$  – индекса трехчасового разрешения, регистрируемого выбранной обсерватории.

В последнее время увеличивается количество работ посвященных исследованию влияния сил гравитации на природные процессы. Профессор астрономии Калифорнийского технологического института отмечал, что планеты силой своего притяжения должны вызывать приливы в газообразном веществе Солнца. В 1936 году Английский ученый П. Стетсон предположил, что может срабатывать резонансный эффект от планет, который может создавать на Солнце приливы до 5 км под действием гравитационных сил.

Классические методы прогноза индексов ГМА используются для краткосрочного прогнозирования, т.к. основаны на временных рядах.

---

<sup>8</sup> Гвишиани А. Д., Старостенко В. И., Сумарук Ю. П. и др. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19 – 24-й цикл // Геомагнетизм и аэрномия. 2015. Т 55. № 3. С. 314–322.

В данной статье предлагается построение регрессионных уравнений прогноза индекса  $H$ , основанной на использовании гравитационных сил планет солнечной системы в качестве параметра времени без процедур экстраполяции. Рассмотрим связь между среднесуточными значениями индекса  $H$  – индекса с одной стороны, и гравитационными силами планет солнечной системы с другой стороны.

**Постановка задачи** - при наличии необходимой информации процесс прогнозирования с помощью статистических методов, как правило, включает следующие этапы:

1. Предварительная обработка исходных данных.
2. Предварительный анализ исходных данных.
3. Исследование адекватности построенных моделей и выбор наилучшей из них на данный момент времени.
4. Анализ и интерпретация полученных результатов.

## II. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Изложим прогнозирование локального  $H$  – индекса на основе перераспределения гравитационных сил планет в солнечной системе. Все расчеты гравитационных сил ведутся относительно конкретной географической точки Земли.

$H$  – индекс зависит от степени возмущения магнитосферы Земли солнечным ветром. При этом вращение Земли вокруг своей оси и обращение Земли вокруг Солнца определяют суточные и годовые вариации  $H$  – индекса. Качественное и количественное значение  $H$  – индекса зависит от многих факторов, которые условно можно разбить на следующие категории:

1. Категория «Место наблюдения ( $M(i)$ )».
2. Категория «Время».  $H$  – индекс меняется в течение суток  $t$ .
3. Категория «Дата (Время года)».  $H$  – индекс меняется в течение года.
4. Категория «Гравитационные силы».  $H$  – индекс зависит от распределения масс в солнечной системе относительно точки наблюдения.

Таким образом, для получения эффективных прогнозов по динамике  $H$  – индекса, необходимо производить построение регрессионного уравнения в виде:

$$H = f(M(i), t, Data, F(k)) \quad (1)$$

В этом случае, математическая модель прогноза  $H$  – индекса будет зависеть от многих факторов, которые в свою очередь непрерывно меняются во времени и пространстве. Это приводит к нарушениям требований метода наименьших квадратов<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.

Для повышения однородности при решении задачи прогнозирования индексов ГМА предлагается способ<sup>10</sup>.

1. **Фактор «Место наблюдения»** - любая географическая точка характеризуется следующими характеристиками: географическая широта и долгота, высота над уровнем моря, степень загрязненности атмосферы.

Если из исходного статистического массива данных  $N$  – индекса отобрать наблюдения, зафиксированные в одной географической точке, то полученный массив данных будет являться однородным по отношению к специфическим особенностям места наблюдения. В этом случае можно считать, что отмечаемые изменения значений  $N$  – индекса обусловлены факторами других категорий.

Таким образом, факторы категории «Место наблюдения» из разряда переменных переходят в разряд постоянных величин  $M(i) = \text{const}$  и исходная модель (2) преобразуется к виду:

$$N = f(t, \text{Data}, F(k)) \tag{2}$$

Используя этот способ, мы повышаем однородность исходного массива данных за счет исключения из рассмотрения характеристик, описывающих специфические особенности места наблюдения. Для каждой географической точки будет строиться своя прогностическая модель  $N$  – индекса.

2. **Фактор «Время суток» и «Дата (Время года)»** - с астрономической точки зрения «Время» и «Дата» четко разделены. Время суток  $t$  определено вращением Земли вокруг своей оси, а  $\text{Data}$  – координатами расположения центра Земли на своей орбите по отношению к Солнцу. При этом сезонность описывается углом наклона оси вращения Земли к эклиптике.

Пусть положение Земли относительно Солнца соответствует 01.01. 1952 году. Один год соответствует 1 обороту Земли по своей орбите относительно Солнца, т.е. эта позиция Земли по отношению к Солнцу будет отмечаться каждый год 1 января (таблица 1).

Таблица 1.

**Значения  $N$  – индекса на 1 января с 1938 – 1987 годы.**

№	$N$ – индекс	Время	День	Год
1	$N_1$	03	1 января	1938
2	$N_2$	03	1 января	1939
3	0	03	1 января	1940
--	---	---	---	---
--	---	---	---	---
k	$N_n$	03	1 января	1987

<sup>10</sup> Назаров А.И. Прогнозирование чисел Вольфа без процедур экстраполяции.

“Innovations in Science and Technologies” scientific electronic journal ISSN: 3030-3451  
[www.innoist.uz](http://www.innoist.uz). Volume 1 6 OCTOBER, 2024.

Особенностью этого массива данных является то, что Земля находится в одной позиции по отношению к Солнцу. Это означает, что такие факторы как вращение Земли вокруг своей оси, координаты Земли на орбите по отношению к Солнцу являются постоянными. При этом параметр «Год» это количество оборотов, которое совершила Земля вокруг Солнца от момента, принятого за начальный. В нашем случае для исходных данных таблицы 1 это означает, что параметры  $t = \text{const}$ ,  $\text{Data} = \text{const}$ , и, следовательно, исходная модель (2) преобразуется к виду (3):

$$H = f(F(k)) \quad (3)$$

Таким образом, можно констатировать, что использование 2 позволяет параметры категорий «Время», «Дата» перевести в разряд констант и, соответственно, задача сводится к определению динамики  $H$  – индекса на основе гравитационных сил солнечной системы.

Предлагаемый способ позволяет повысить однородность исходной выборки данных, но при этом вынуждает нас производить построение прогностической модели  $H$  – индекса для каждого момента времени и дня года в отдельности<sup>11</sup>.

3. **Фактор «Гравитационные силы»** - на предыдущих этапах при помощи способа влияния параметров факторов «место наблюдения», «время суток» и «время года» были сведены к постоянному уровню, что позволило исходную задачу (1) преобразовать к виду (3).

4. **Предварительная обработка** – исходные данные получены из источников: индексы СП: <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/sunspot/ru>. индексы  $H$ : <http://www.wdcb.ru/stp/data/geomagni.ind/H/>.

5. вследствие того, что точность статистических оценок и адекватность математических моделей во многом определяется качеством исходных данных, была выполнена следующая предварительная обработка статистической информации:

- заполнение пробелов в таблице данных методом восстановления при помощи кубического сплайна;
- робастная предобработка экспериментальных данных;

На основе критерия Романовского исключались резко выделяющиеся наблюдения с последующим их восстановлением при помощи кубических сплайнов.

В соответствии с медианной оценкой для упорядоченной выборки значений каждого входного параметра  $x_{j1} < x_{j2} < \dots < x_{jN}$ ;  $j = \overline{1, k}$  определяется число классов по правилу Старджеса  $L = \lceil 1 + 3,322 \lg N \rceil$ , где  $\lceil \cdot \rceil$  знак округления в сторону ближайшего большего целого. Применительно к каждому  $i$ -му выходному параметру внешней среды в каждом классе определяются медианы

<sup>11</sup> Константиновская Л.В. Положение планет и долгосрочное прогнозирование. — Математические методы анализа цикличности в геологии, вып.6, РАЕН, М., 1994, с.113 –117.

центров с оординатами  $(x_{jl}^*, y_{ijl}^*)$ ,  $l = \overline{1, L}$ , как медианы вариационных рядов 5 оценок абсцисс  $\overline{x_{jl}}, x_{jl}^c, x_{jl}^p, x_{jl}^m, \overline{x_{jl}^{0,5}}$  и ординат  $\overline{y_{ijl}}, y_{ijl}^c, y_{ijl}^p, y_{ijl}^m, \overline{y_{ijl}^{0,5}}$   $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$

При организации робастной процедуры построения эмпирической линии регрессии с последующей параметрической идентификацией методом наименьших квадратов приняты медианы вариационных рядов пяти оценок абсцисс и ординат<sup>12</sup> (см. рис 1.).

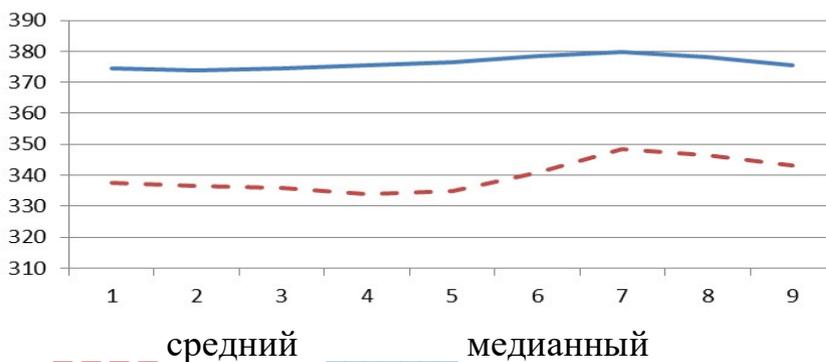


Рис.1. Робастная предобработка данных по Н– индексу

Из графика видно, что медианная оценка повышает точность прогностического регрессионного моделирования.

6. **Прогностическое моделирование** - ряд исследований посвящены влиянию сил гравитации планет системы на солнечную активность, определим корреляционные связи чисел Вольфа с Н– индексом.

Таблица 2.

**Корреляционные связи чисел Вольфа и индекса Н**

Correlations (v01.sta)									
Marked correlations are significant at $p < 0,05000$									
N=10805 (Casewise deletion of missing data)									
	W	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
W	1	0,1458	0,1480	0,1705	0,1912	0,2092	0,194	0,1805	0,1571
H1	0,1458	1	0,8054	0,6839	0,6070	0,5406	0,4903	0,4563	0,4152
H2	0,1480	0,8054	1	0,8138	0,6934	0,6106	0,5478	0,5003	0,4463
H3	0,1705	0,6839	0,8138	1	0,8179	0,7084	0,6317	0,5692	0,5043
H4	0,1912	0,6070	0,6934	0,8179	1	0,8200	0,7141	0,6298	0,5568
H5	0,2092	0,5406	0,6106	0,7084	0,8200	1	0,8233	0,6976	0,6095
H6	0,1946	0,4903	0,5474	0,6317	0,7141	0,8233	1	0,8037	0,6799
H7	0,1803	0,4566	0,5003	0,569	0,6298	0,6976	0,8037	1	0,7980
H8	0,1571	0,4152	0,4463	0,5043	0,5568	0,6098	0,679	0,7980	1

<sup>12</sup> Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния: Пер. с англ. / Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. – М.: Мир, 1989. – 512с.

Из корреляционной матрицы видно, что имеет место корреляционной связи между числами Вольфа и индекса Н.

Поэтому произведем построение моделей прогноза в виде регрессионных уравнений на основе только те характеристики сил гравитации, которые имеют достоверную корреляционную связь со значениями Н – индекса ( $p < 0,05$ ).

В нашем случае, из кинематических характеристик в рассмотрение были включено только смещение (14850 характеристик). Чтобы исключить нарушение предположений о ранге МНК гравитационные волны были объединены в 6 групп в зависимости от проекции S (mer, par, ver) и характера корреляционной связи с К ( $r > 0$ ,  $r < 0$ ): S1 (mer, r +), S2 (mer, r -), S3 (par, r +), S4 (par, r -), S5 (ver, r +), S6 (ver, r -). Общее количество замеров составило 17824, получено 384 прогностических моделей Н – индекса.

Прогностические модели Н – индекса строились в виде простой регрессии через каждые 3 часа. За окончательный результат принималась средне-арифметическая значений простых регрессий.

В частности на 1 мая 15.00 они приняли вид:

$$\begin{aligned} N &= 26,8037 + 0,6622641 * S1 \text{ mer, } r^+ \\ N &= 20,28984 - 0,5435406 * S2 \text{ mer, } r^- \\ N &= 23,27794 + 0,7290367 * S3 \text{ par, } r^+ \\ N &= 23,45833 - 0,6500917 * S4 \text{ par, } r^- \\ N &= 16,02242 + 1,012723 * S5 \text{ ver, } r^+ \\ N &= 31,52211 - 1,083519 * S6 \text{ ver, } r^- \\ N_{\text{cp.}} &= (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6) / 6 \end{aligned}$$

где: S1mer, r+ – меридианный гравитационный потенциал, имеющий положительное корреляционное воздействие на Н – индекс;

S2 mer, r - – меридианный гравитационный потенциал, имеющий отрицательное корреляционное воздействие на индекс Н – индекс;

S3par, r + – параллельный гравитационный потенциал, имеющий положительное корреляционное воздействие на Н – индекс;

S4 par, r - – параллельный гравитационный потенциал, имеющий отрицательное корреляционное воздействие на Н – индекс;

S5 ver,r+ – вертикальный гравитационный потенциал, имеющий положительное корреляционное воздействие на Н – индекс;

S6 ver, r - – вертикальный гравитационный потенциал, имеющий отрицательное корреляционное воздействие на индекс Н – индекс.

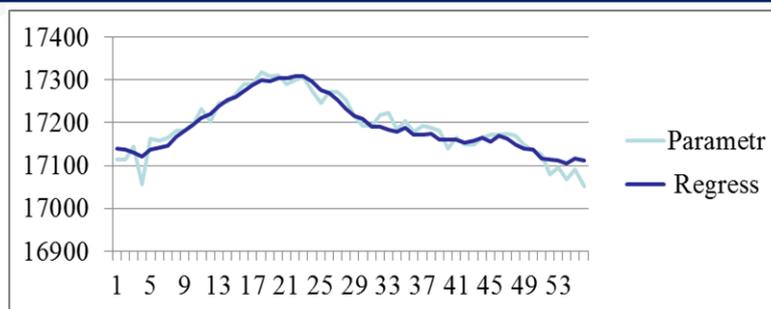


Рис. 2. Графики значений регрессионного и реального Н – индекса

О степени соответствия прогностических моделей исходным статистическим данным Н – индекса можно судить по рис. 2.

Оценка адекватности регрессионных моделей до и после медианной предобработки приведена в таблице 3.

Таблица 3.

**Оценка до и после медианной предобработки данных Н – индекса**

Модель	$\sigma$	$R^2$	$F$	$p$
Оценка Н – индекса до медианной предобработки данных	$\pm 0,110$	0,854	61,97	$> 99,95$
Оценка Н – индекса после медианной предобработки данных	$\pm 0,112$	0,985	63,12	$> 99,95$

Символьные обозначения:  $\sigma$  – статистическая ошибка; R – коэффициент детерминации; F – коэффициент Фишера; p – уровень достоверного различия.

Проверка адекватности регрессионных моделей прогноза показало, что повышение F– отношения и увеличение коэффициента детерминации при сравнимых статистических ошибках, свидетельствуют о повышении уровня адекватности регрессионных моделей, построенных на выборке, подвергшейся предварительной обработке.

Для оценки эффективности предлагаемого метода с использованием гравитационных сил, было проведено построение прогностических моделей на основе временных рядов в виде полиномов: 4-го порядка VR4, 5-го порядка VR5 и 6-го порядка VR6.

Полиномиальные модели Н – индекса трехчасового разрешения имеют вид VR4, VR5, VR6 соответственно.

$$H = 2E-08x^4 - 2E-06x^3 - 0,0009x^2 + 0,134 + 10,493, R^2 = 0,0332.$$

$$H = -3E-10x^5 + 2E-07x^4 - 5E-05x^3 + 0,0034x^2 - 0,0205x + 11,81,$$

$$H = -4E-11x^6 + 3E-080x^3 - 8E-06x^4 + 0,0011x^2 - 0,0662x^2 + 1,735x + 0,9937, R^2 = 0,0946.$$

Из приведенного рис.3 видно, что точность и устойчивость долгосрочного прогноза по регрессионным моделям на основе сил гравитации выше, чем у полиномиальных моделей, построенных по временным рядам, соответственно выше и эффективность моделей.

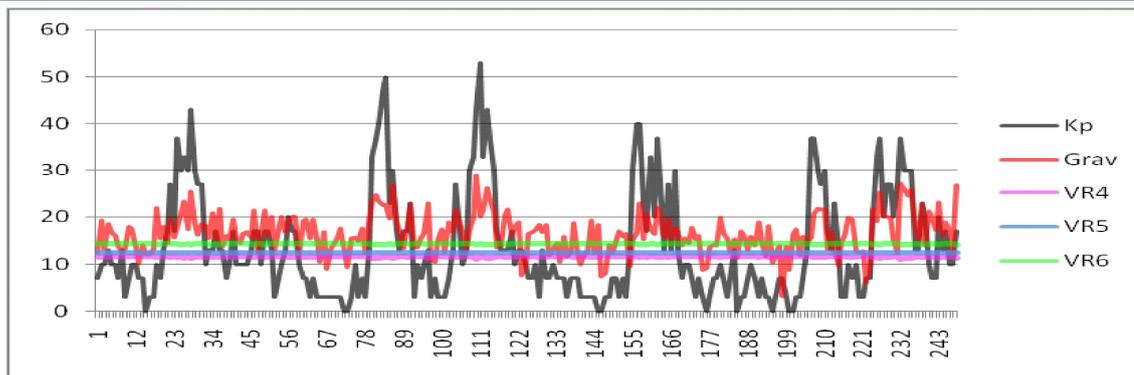


Рис. 3. Сравнительный график прогноза регрессионных и полиномиальных моделей

Далее полученные результаты расчетов анализируются и на основе общепринятых градаций вырабатываются рекомендации.

В частности, для результатов расчета по прогнозу  $H$  – индекса (нТл) используется следующие производционные правила:

- если  $25 < H \leq 550$ , то спокойная геомагнитная активность.
- если  $550 < H \leq 1000$ , то возможны незначительные сбои в работе энергосистем.
- если  $1000 < H \leq 1650$ , то возможны неполадки на трансформаторных подстанциях.
- если  $1650 < H \leq 2000$ , то возможны кратковременные сбои GPS–навигации, низкочастотной радионавигации и перебои коротковолновой связи.
- если  $2000 < H \leq 2500$ , то будет отмечаться отсутствие КВ–связи, GPS–навигации и средневолновой радионавигации.
- если  $H > 2500$ , то возникает экстремально сильная магнитная буря, повсеместное отсутствие всех видов радиопеленгации и навигации, отсутствие высокочастотной связи, повсеместное отсутствие работы железнодорожной автоматики и телемеханики, аварийность всех видов трансформаторных станций.

В зависимости от значений  $H$  – индекса прогнозируется уровень магнитной бури и, согласно выше приведенных градаций, на объекте управления производится выбор частоты передачи сигнала, которая обеспечивает устойчивость радиосвязи.

Преимуществами предлагаемого подхода прогнозирования является отсутствие процедур экстраполяции, т.е. точность прогноза  $H$  – индекса не зависит от срока прогнозирования.

### III. ВЫВОДЫ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Системный анализ геомагнитной активности показал, что имеется влияние сил гравитации планет солнечной системы на  $H$  – индекс геомагнитной активности.

2. Предварительная обработка показала, что робастная предобработка экспериментальных данных повысила устойчивость моделей.

3. Произведен расчет сумм проекций гравитационных сил планет солнечной системы и определены их корреляционные связи с  $H$  – индексом.

4. Разработаны статистические модели долгосрочного прогноза  $H$  - индекса трехчасового разрешения на основе суммы проекций сил гравитации планет солнечной системы.

5. Разработаны алгоритм и программа по прогнозированию  $H$  – индекса на основе их корреляционных связей со значениями суммы проекций гравитационных сил планет солнечной системы.

В связи с тем, что состояние ионосферы изменяется, связь ионосферной волной требует правильного выбора частот в течение суток:

- в дневное время используются частоты 12–30 МГц;
- в утреннее время 8–12 МГц;
- вечернее время 3–8 МГц.

В периоды влияния геомагнитных бурь на ионосферу, устойчивость радиосвязи может быть обеспечена на частотах СВ-диапазона (0,3 – 3 МГц), т.к. имеет место малая зависимость от ионосферных возмущений и магнитных бурь.

В периоды слабых магнитных бурь рекомендуется скорректировать максимальную применимую частоту радиосигнала, которая обеспечит устойчивость коротковолновой связи.

В периоды средних и сильных магнитных бурь рекомендуется выбрать частоту верхнего средневолнового диапазона, обеспечивающая устойчивость радиосвязи.

### IV. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердалиева Н, Карачик Н. «Уникальный архив солнечных данных Астрономического института АН РУз». Ташкент, 2018, с. 79.

2. Константиновская Л.В. Положение планет и долгосрочное прогнозирование. — Математические методы анализа цикличности в геологии, вып.6, РАЕН, М., 1994, с.113 –117.

3. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.

4. Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния: Пер. с англ. / Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. – М.: Мир, 1989. – 512с.

5. Cartwright D.E., Tayler R.I. New Computations of the Tide-generating Potential. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 23, 45–47 (1971)

6. Назаров А.И. Прогнозирование чисел Вольфа без процедур экстраполяции.

“Innovations in Science and Technologies” scientific electronic journal ISSN: 3030-3451 [www.innoist.uz](http://www.innoist.uz). Volume 1 6 OCTOBER, 2024.