



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалаврская работа)

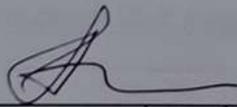
На тему: «Оценка эффективности прогноза A_p индекса геомагнитной
активности по ГОСТ 25645.120—85»

Исполнитель Федотов Тимур Максимович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой



(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 06 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Индексы геомагнитной активности.....	10
1.1. К и С индексы.....	10
1.2. Индексы aa и Aa.....	11
1.3. Kp, ap и Ap индексы.....	12
1.4. AE, AU, AL и AO индексы.....	14
2. Методика прогноза Ap-индекса геомагнитной активности.....	16
3. Формирование архива данных Ap-индексов геомагнитной активности и индексов F10.7 солнечной активности.....	19
4. Прогнозирование Ap-индекса геомагнитной активности и оценка эффективности прогноза.....	22
4.1. Прогноз Ap-индекса в год низкой солнечной активности.....	22
4.2. Прогноз Ap-индекса в год высокой солнечной активности.....	28
4.3. Сравнение эффективности 10-дневного и 30-дневного прогнозов для годов высокой и низкой солнечной активности.....	32
4.4. Анализ эффективности прогноза Ap-индекса для периодов спокойной геомагнитной активности в условиях высокой и низкой солнечной активности.....	34
4.5. Анализ эффективности прогноза Ap-индекса для периода высокой солнечной активности.....	41
4.6. Сравнение эффективности прогнозирования Ap-индекса в разные месяцы для высокой и низкой солнечной активности.....	45
4.7. Оценка эффективности прогнозирования Ap-индекса на основе матричной системы оценки успешности прогнозов.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	57
Список использованных источников.....	60
Приложение.....	61
Текст программы для прогнозирования индекса Ap.....	61

ВВЕДЕНИЕ

Период после начала освоения космоса, особенно последние десятилетия, характеризуется значительным увеличением объема информации об околоземном космическом пространстве. Основные исследования проводятся с использованием спутников, метеоракет и геофизических зондов, направленных на изучение верхних атмосферных слоёв и межпланетного пространства. Наряду с этими методами активно развиваются и дистанционные технологии мониторинга.

Изучение характеристик околоземного пространства имеет важное научное и практическое значение. Стратосфера и вышележащие слои оказывают значительное воздействие на процессы формирования погодных условий в нижних слоях — тропосфере. Обмен энергией между верхними атмосферными слоями и тропосферой влияет на возникновение и эволюцию ключевых элементов, определяющих погоду.

Кроме того, Солнце играет ключевую роль в формировании состояния верхней атмосферы Земли. Околоземное пространство является крайне подвижной системой, подверженной постоянным изменениям под воздействием внешних факторов, что делает её чувствительной к переходам в неустойчивые состояния. Для надежной эксплуатации современных технологий необходимы точные знания обо всех процессах и явлениях, происходящих в околоземном пространстве, которые отличаются большим многообразием.

Таким образом, именно высокая значимость данной проблемы объясняет повышенный интерес ученых-метеорологов и специалистов-геофизиков к исследованию верхних слоев атмосферы и солнечной активности.

Околоземное космическое пространство (ОКП) — это зона, где гравитационное поле Земли играет основную роль в движении космических аппаратов, преобладая над влиянием Солнца и других небесных тел. Считается, что граница этой области находится на расстоянии около 930 тысяч километров

от Земли (примерно 146 радиусов Земли, где средний радиус Земли $R_E = 6370$ км). При подъеме на высоту около 20 км уровень первичной космической радиации начинает превышать уровень вторичной (образованной в атмосфере). На этой же высоте заканчивается диапазон полетов для аэростатов и реактивных самолетов.

Околоземное пространство иногда делят на приземный (75–150 км), ближний (150–2000 км), средний (2–50 тыс. км) и дальний (свыше 50 тыс. км) космос. Согласно решению Международной авиационной федерации, космическим полетом считается достижение высоты не менее 100 км (линия Кармана). На этой отметке атмосфера становится настолько разреженной, что для создания подъемной силы летательный аппарат должен двигаться со скоростью, близкой к первой космической (8 км/с), что делает необходимым использование космических технологий вместо авиационных.

Протяженность околоземного космического пространства в направлении хвоста магнитосферы достигает нескольких сотен радиусов Земли. На сегодняшний день у человечества нет возможности вести постоянный мониторинг всех процессов в ОКП и полностью изучить происходящие в нём закономерности. Однако активные исследования с помощью космических аппаратов и станций позволили накопить обширные данные и получить новые ценные сведения, которые способствуют развитию космической науки и технологий.

Понимание параметров (ОКП) критически важно для решения практических задач космической деятельности. К ключевым характеристикам ОКП относятся:

- Экстремально высокий вакуум (сильно разреженная газовая среда).
- Ионизирующее космическое излучение.
- Солнечная радиация (электромагнитная и корпускулярная).
- Воздействие гравитационных, магнитных и электрических полей.

- Ионосферные процессы и фотохимические реакции.
- Наличие ионосферного слоя и радиационных поясов Земли.
- Влияние метеорных потоков.

Геомагнитная активность играет важную роль в космической погоде, существенно воздействуя на многие сферы человеческой деятельности. Особенно заметно ее влияние на работу спутниковых систем связи, точность навигационного оборудования, энергетические сети и безопасность авиаперелетов. Особую проблему представляет влияние магнитных бурь на работу космических аппаратов, которые используют геомагнитную ориентацию. В спокойных условиях она работает эффективно, но во время магнитных возмущений может давать значительные погрешности. При сильных бурях граница магнитосферы (магнитопауза) может смещаться внутрь геостационарной орбиты (примерно 6.6 радиусов Земли). В этом случае спутники оказываются в зоне солнечного ветра, где характеристики магнитного поля кардинально отличаются от земных.

Ионосфера Земли существенно влияет на распространение радиоволн и качество связи во самых различных частотных диапазонах. Она выполняет двойственную функцию: служит своеобразным "зеркалом", отражающим короткие волны и позволяющим осуществлять дальнюю радиосвязь (вплоть до охвата всей Земли), но одновременно с этим поглощает часть радиосигналов. Поскольку характеристики ионосферы непостоянны, для стабильной связи необходимо учитывать ее изменчивость. Особенно сильные возмущения происходят во время геомагнитных бурь, которые вызывают:

- Колебания электронной концентрации, изменяющие критическую частоту отражения радиоволн
- Усиленное поглощение радиосигналов
- Замирания радиосигналов.

Наиболее серьезные нарушения связи наблюдаются в высоких широтах на радиотрассах, пересекающих зоны полярных сияний. Дополнительные проблемы создают внезапные ионосферные возмущения, вызванные солнечными вспышками. Их рентгеновское излучение может полностью нарушить связь на освещенной стороне Земли, затрагивая воздушные и морские суда.

Современные системы радиолокации и радионавигации предъявляют повышенные требования к точности данных об ионосферных и тропосферных характеристиках. При этом важна не только оперативная диагностика текущего состояния данных характеристик, но и возможность их заблаговременного прогнозирования на срок от нескольких часов до месяцев. Проблема прогнозирования представляет значительную научную сложность, поскольку эти параметры формируются под воздействием множества различных факторов. Скорость распространения радиоволн в ионосфере и тропосфере равна c , она отличается от скорости в вакууме c_0 и равна $c = c_0/n$, где n — это показатель преломления среды. Это различие приводит к временной задержке сигнала Δt , что в свою очередь вызывает дополнительные (помимо аппаратурных) погрешности в определении координат навигационной аппаратуры потребителя (НАП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) или радиолокационного объекта. Величина задержки навигационного сигнала $\Delta d = c\Delta t$ при вертикальном распространении волны для одночастотного стандартного режима работы НАП СРНС с одним приемником в ионосфере может достигать значительных значений: около 30 метров в ионосфере и примерно 3 метра в тропосфере. При этом величина задержки существенно варьируется в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активности, а также от географической широты места наблюдения. Наряду с эффектом многолучевого распространения сигнала, эти ошибки вносят наиболее существенный вклад в общую погрешность навигационных измерений. Следует отметить, что ошибки, обусловленные изменчивостью ионосферы и тропосферы, невозможно

полностью устранить ни в навигационных, ни в радиолокационных системах (Кулешов Ю.В., Краснов В.М. и др., 2022).

Таким образом, как было отмечено выше геомагнитная активность играет важную роль в космической погоде, существенно воздействуя на многие сферы человеческой деятельности. Особенно заметно ее влияние на работу спутниковых систем связи, точность навигационного оборудования, энергетические сети и безопасность авиаперелетов.

Одним из ключевых показателей, характеризующих уровень геомагнитной активности, является Ар-индекс. Этот индекс представляет собой эквивалентную среднесуточную планетарную амплитуду возмущения магнитного поля Земли и широко используется для оценки интенсивности геомагнитных возмущений.

Прогнозирование Ар-индекса представляет собой актуальную научную задачу, поскольку позволяет заранее оценивать возможные последствия геомагнитных бурь и принимать меры для минимизации их негативного воздействия.

В настоящее время существуют различные методы прогнозирования геомагнитной активности. Один из способов представлен ниже.

В исследовании (Шклярук и др., 2024) представлен метод краткосрочного прогнозирования геомагнитной активности с использованием региональных индексов. В основе метода лежит анализ данных с российских обсерваторий сети INTERMAGNET, что позволяет учитывать локальные особенности геомагнитных возмущений на территории Российской Федерации.

Для повышения точности прогнозирования авторами разработаны три региональных индекса геомагнитной активности. Индекс K_{Rus_C} охватывает центральную часть России и рассчитывается по данным обсерваторий в Санкт-Петербурге и Москве. Индекс K_{Rus_S} отражает активность на Урале и в Сибири, включая станции в Екатеринбурге, Новосибирске и Иркутске. Для Дальнего Востока введён индекс K_{Rus_V} , основанный на измерениях в Якутске, Хабаровске, Магадане и Петропавловске-Камчатском. Каждый индекс

представляет собой среднее значение К-индексов по станциям соответствующего региона.

Прогнозирование осуществляется с помощью метода SARIMAX, которая сочетает методы временного анализа с учётом сезонных колебаний и внешних факторов. Модель обучается на данных о вариациях магнитного поля за пятидневный период и способна прогнозировать изменения геомагнитной обстановки на ближайшие сутки. При этом отмечается, что текущая версия алгоритма демонстрирует высокую точность в условиях спокойной геомагнитной обстановки, но требует доработки для прогнозирования резких возмущений, связанных с солнечными бурями.

В данной работе прогнозирование Ар-индекса геомагнитной активности проводилось на основе Методики расчёта индексов солнечной и геомагнитной активности для определения плотности по ГОСТ 25645.120—85.

Актуальность данной работы заключается в необходимости оценки эффективности прогнозирования Ар-индекса геомагнитной активности в связи с тем, что геомагнитная активность играет большую роль в космической погоде, заметно влияя на многие сферы человеческой деятельности. Геомагнитные бури, которые обычно сопровождаются ионосферными бурями, особенно влияют на работу спутниковых систем связи, точность навигационного оборудования, энергетические сети и авиацию. Особую проблему представляет влияние магнитных бурь на работу космических аппаратов, которые используют геомагнитную ориентацию. В спокойных условиях она работает эффективно, но во время магнитных возмущений может давать значительные погрешности. Ионосфера Земли существенно влияет на распространение радиоволн и качество связи во самых различных частотных диапазонах. Одним из ключевых показателей, характеризующих уровень геомагнитной активности, является Ар-индекс. Эффективное прогнозирование Ар-индекса геомагнитной активности позволяет заранее узнавать о геомагнитных бурях, что способствует предотвращению возможных негативных последствий.

Цель работы — проверка методики прогноза Ар-индекса для различных уровней солнечной активности.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Определить годы и месяцы высокой и низкой солнечной активности.
2. Сформировать архив фактических данных индексов геомагнитной и солнечной активности (Ар-индекса и индекса F10.7, соответственно) для года высокой и низкой солнечной активности.
3. Спрогнозировать Ар-индекс в годы высокой и низкой солнечной активности на основе методики расчета индексов геомагнитной активности (РД 50-25645.120-85) для выбранных лет.
4. На основе фактических и прогностических значений Ар-индекса рассчитать статистические показатели для оценки успешности прогнозов индекса геомагнитной активности.
5. На основе фактических и прогностических значений Ар-индекса построить матрицы сопряжённости альтернативных прогнозов индекса геомагнитной активности и рассчитать критерии успешности.
6. Проанализировать полученные результаты и оценить эффективность прогнозирования Ар-индекса исследуемым методом.

1. Индексы геомагнитной активности

Индексы геомагнитной активности — это численные показатели, которые используются для оценки изменений магнитного поля Земли. Эти изменения возникают из-за влияния солнечного ветра на магнитосферу, процессов внутри самой магнитосферы, а также взаимодействия магнитосферы с ионосферой. Каждый индекс рассчитывается на основе измерений и отражает лишь отдельные аспекты сложной системы солнечной и геомагнитной активности.

Можно выделить три группы индексов геомагнитной активности.

Первая группа включает локальные индексы, рассчитываемые на основе данных одной обсерватории. Они показывают уровень магнитных возмущений на конкретной территории. Примеры таких индексов — С и К.

Вторая группа объединяет планетарные индексы, которые характеризуют геомагнитную активность в глобальном масштабе. К ним относятся, например, Kp, ap, Ap, am, Am, aa и Aa.

Третья группа состоит из индексов, которые отражают интенсивность магнитных возмущений, вызванных конкретными источниками. Среди них — Dst, AE и PC.

Ниже подробнее рассматриваются некоторые индексы.

1.1. К и С индексы

К-индекс — это квазилогарифмический индекс, рассчитываемый за трёхчасовой интервал. Этот индекс характеризует изменение геомагнитной активности на конкретной обсерватории в трёхчасовых интервалах времени, начиная с 00 UTC. К индекс выражается в баллах и принимает значения от 0 (спокойное магнитное поле) до 9 (сильное геомагнитное возмущение). К-индекс был введен Дж. Бартельсом в 1939 году.

С-индекс — это локальный индекс геомагнитной активности, который используется для оценки уровня возмущений магнитного поля Земли на основе данных одной обсерватории. Он рассчитывается за трёхчасовые интервалы и отражает изменения в горизонтальной компоненте магнитного поля. С-индекс

имеет трёхбалльную шкалу (0, 1, 2). Этот индекс полезен для анализа локальных геомагнитных возмущений, но не даёт полной картины глобальной активности. Это простейший индекс геомагнитной активности.

1.2. Индексы aa и Aa

Индекс aa — это планетарный индекс геомагнитной активности, который используется для оценки глобальных изменений магнитного поля Земли. Aa-индекс рассчитывается по трёхчасовым значениям K-индекса, измеренным на двух почти диаметрально противоположных магнитных обсерваториях в северном и южном полушариях. На данный момент это Хартланд в Великобритании и Канберра в Австралии.

При расчёте aa-индекса значения K-индекса преобразуются обратно в амплитуды. Индекс aa определяется как среднее значение между амплитудами используемых обсерваторий.

Индекс aa представляет уровень активности на инвариантной магнитной широте 50° и измеряется в нанотеслах (нТл).

Индекс aa был введен П.Майо в 1972 году с целью получения однородного ряда индекса планетарной возмущённости за максимально возможный интервал времени. Значения aa индекса определены с 1868 года.

Таблица 1.2.1 — Обсерватории, в которых в разное время определялся индекс aa

Северное полушарие			Южное полушарие		
Период	Обсерватория	Весовой коэффициент стандартизации по широте	Период	Обсерватория	Весовой коэффициент стандартизации по широте
1868-1925	Гринвич	1.007	1868-1919	Мельбурн	0.967
1926-1956	Абингер	0.934	1920-1979	Туланги	1.033
1957-н.в.	Хартланд	1.059	1980-н.в.	Канберра	1.084

Aa-индекс представляет собой среднесуточное значение индекса aa.

1.3. Кр, ар и Ар индексы

Кр-индекс — это глобальный показатель, который отражает степень возмущения магнитного поля Земли за трёхчасовой период. Он рассчитывается как среднее значение возмущений двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, измеренных на 13 специально отобранных обсерваториях. Эти обсерватории расположены в субавроральных зонах (между 48° и 63° северной и южной геомагнитных широт). Для вычисления Кр-индекса используются стандартизированные значения локальных К-индексов (Ks) с этих станций. Кр-индекс введён Дж. Бартельсом в 1949 году.

Таблица 1.3.1 — Обсерватории, на которых измеряются возмущения горизонтальных компонент магнитного поля

Номер	Код IAGA	Город	Страна	Широта	Долгота	K=9 (нТл)
1	LER	Леруик	Шотландия	60° 08'	358° 49'	1000
2	MEA	Меанук	Канада	54° 37'	246° 40'	1500
3	SIT	Ситка	США	57° 03'	224° 40'	1000
4	ESK	Эскдейлмьюир	Шотландия	55° 19'	356° 48'	750
5	UPS	Уппсала	Швеция	59° 54'	17° 21'	600
6	OTT	Оттава	Канада	45° 24'	284° 27'	750
7	BFE	Брорфельде	Дания	55° 37'	11° 40'	600
8	HAD	Хартленд	Великобритания	50° 58'	355° 31'	500
9	WNG	Вингст	Германия	53° 45'	9° 04'	500
10	NGK	Нимегк	Германия	52° 04'	12° 41'	500
11	FRD	Фредериксберг	США	38° 12'	282° 38'	500
12	CNB	Канберра	Австралия	-35° 18'	149° 00'	450
13	EYR	Эйруэлл	Новая Зеландия	-43° 25'	172° 21'	450

Кр-индекс варьируется от 0 до 9, определяется с точностью до 1/3: 0₀, 0₊, 1₋, 1₀, 1₊, ... 8₋, 8₀, 8₊, 9₋, 9₀.

Ниже представлена таблица с качественной характеристикой магнитного поля в зависимости от значения К_p-индекса.

Таблица 1.3.2 — Качественная характеристика магнитного поля в зависимости от значения К_p-индекса

Значение индекса К _p	Состояние магнитного поля
$K_p \leq 2$	Спокойное
$K_p = 2-3$	Слабовозмущённое
$K_p = 4$	Возмущённое
$K_p = 5-6$	Магнитная буря
$K_p \geq 7$	Большая магнитная буря

Индекс а_p — это глобальный показатель, который рассчитывается на основе К_p-индекса и отражает степень возмущения магнитного поля Земли. В отличие от квазилогарифмического К_p, А_p выражается в линейной шкале (от 0 до 400) и измеряется в нанотеслах (нТл). А_p определяется по наиболее возмущённому компоненту геомагнитного поля (Н или D) на среднеширотных станциях за трёхчасовой интервал. А_p является "линейной версией" К_p. Значение К_p=9 соответствует А_p=400 нТл — это минимальный порог возмущения для максимального уровня активности. Чем выше а_p, тем сильнее геомагнитные возмущения. Шкала значений индекса а_p позволяет сравнивать активность в физических единицах (нТл), а не в условных баллах.

А_p-индекс — это среднесуточный показатель геомагнитной активности, выраженный в линейной шкале. Он рассчитывается как среднее значение восьми трёхчасовых а_p-индексов за сутки и отражает общий уровень возмущения магнитного поля Земли. Диапазон значений — от 0 до 280 нТл, где 0 соответствует спокойному состоянию, а 280 — максимальной активности.

1.4. AE, AU, AL и AO индексы

Индексы геомагнитной активности AE, AU, AL и AO отражают уровень магнитных возмущений в зоне полярных сияний, которые возникают из-за усиления ионосферных токов, текущих вдоль границы аврорального овала (восточного и западного токов полярного электроджета). Индексы AE, AU, AL и AO были предложены Т. Дэвисом и М. Сугиурой в 1966 году и измеряются в гаммах.

Эти индексы рассчитываются на основе определения величины отклонения горизонтальной компоненты H геомагнитного поля от её спокойного уровня — среднемесячного значения, определённого по данным пяти международных спокойных дней. Для их вычисления используются показания с 12 обсерваторий, расположенных в авроральных и субавроральных широтах и равномерно распределённых по долготе.

Количество станций, используемых для расчёта индексов AE, AU, AL и AO, может варьироваться в зависимости от периода наблюдений. Например, если данные с какой-либо обсерватории поступают с задержкой или содержат помехи (особенно во время сильных магнитных бурь), такие записи исключаются из расчётов. В результате список станций, по которым определяются индексы, сокращается. Известны случаи, когда во время мощных геомагнитных возмущений индексы вычислялись всего по трём обсерваториям.

Отклонения горизонтальной компоненты (H) геомагнитного поля от фонового уровня вычисляются с помощью огибающих кривых. Эти кривые строятся методом наложения (суперпозиции) данных H -компоненты со всех участвующих станций.

Значения AU-индекса соответствуют верхней огибающей кривой, а AL-индекса — нижней. Таким образом, каждая точка на этих кривых даёт численную величину соответствующего индекса в конкретный момент времени.

AU-индекс (auroral upper) фиксирует наибольшее положительное отклонение горизонтальной компоненты (H) геомагнитного поля от среднего спокойного уровня среди всех обсерваторий авроральной зоны. AL-индекс (auroral low) отражает максимальное отрицательное отклонение H-компоненты от спокойного фона на станциях того же региона.

Геомагнитные индексы AU и AL отражают суточные вариации авроральных электроджетов. Положительные отклонения (AU) наблюдаются преимущественно в вечерние часы и связаны с восточным током полярного электроджета. Отрицательные отклонения (AL) характерны для утреннего и ночного времени и соответствуют западному току электроджета.

В спокойные дни AU индекс приближается к 0 γ , при сильных возмущениях достигает +1500 γ . AL индекс варьирует от 0 γ до -3000 γ в периоды магнитных бурь.

Индекс AE рассчитывается как сумма абсолютных величин индексов AU и AL, что отражает общую амплитуду вариаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Этот интегральный показатель характеризует уровень магнитной активности во всей авроральной зоне, независимо от локализации конкретных возмущений.

Фактически, AE-индекс служит количественной мерой интенсивности полярных магнитных суббурь — возмущений, связанных с полярными сияниями. Его значения варьируют от 0 γ в периоды спокойного состояния магнитосферы до 3000 γ во время сильных геомагнитных возмущений.

АО-индекс рассчитывается как среднее арифметическое значений AU и AL индексов. Физически он представляет собой центральную точку между текущими значениями AU и AL, показывая средний уровень геомагнитной активности. В спокойные дни АО-индекс равен 0 γ , во время магнитных бурь может достигать -1500 γ или 1000 γ .

2. Методика прогноза Ар-индекса геомагнитной активности

Прогнозирование индекса геомагнитной активности осуществлялось на основе Методики расчёта индексов солнечной и геомагнитной активности для определения плотности (РД 50-25645.120-85) по ГОСТ 25645.120—85.

Прогноз индекса Ар осуществляется путём прогнозирования индекса Кр и переводом этого индекса в индекс Ар.

Прогнозирование Кр-индекса основано на статистическом анализе фактических данных с учётом уровня солнечной активности (низкий, средний и высокий). Данное деление соответствует ГОСТ 25645.102—83.

Данная методика расчёта индексов солнечной и геомагнитной активности была создана на основе систематических наблюдений, проводившихся в период с 1973 по 1984 год. В исследованиях использовались мониторинг солнечной активности, измерения земного магнитного поля и данные о торможении искусственных спутников Земли, позволяющие определить плотность верхних слоёв атмосферы.

Индексы моделируются как гауссовы случайные процессы с корреляционной функцией, включающей циклическую составляющую (промежуток в 27 суток, соответствующий периоду вращения Солнца вокруг своей оси на широтах около 30° , что соответствует наиболее интенсивной области солнечной активности) и экспоненциальную составляющую, которая учитывает затухание корреляции со временем.

Для расчёта прогностических значений Кр-индекса геомагнитной активности используются фактические значения этого показателя, полученные в период, предшествующий прогностическому интервалу.

Прогнозирование начинается с момента последних доступных измерений индексов. Длительность прогностического интервала d в сутках рассчитывается по формуле

$$d = D - D_n \quad (2.1)$$

Где D — дата, на которую прогнозируется индекс;

D_n — дата, в которую известно последнее измеренное значение индекса K_p .

Значения прогностического интервала d лежит в пределах от 1 до 90 суток. Даты учитываются как количество суток от фиксированной начальной точки.

Среднесуточный индекс K_p , прогнозируемый на d суток, вычисляется по следующей формуле

$$K_{p(n+d)} = K_p^{KB} + \sum_{\tau=0}^{70} a(d)_\tau [K_{p(n-\tau)} - K_p^{KB}] \quad (2.2)$$

Где $K_{p(n+d)}$ — среднесуточное значение индекса K_p , рассчитываемое при прогнозе на d суток;

K_p^{KB} — осреднённое за квартал значение K_p , которое соответствует интервалу времени от D_{n-90} до D_n .

$a(d)_\tau$ — коэффициенты для различных периодов прогноза (от 1 до 90 дней) и трёх уровней солнечной активности (низкого, среднего и высокого). Данные коэффициенты зависят от индекса τ , который выбирается на основе длины ряда фактических значений индекса K_p , с помощью которого осуществляется прогноз.

Если срок прогнозирования превышает максимальный, то значения индекса K_p вычисляются по формуле

$$K_{p(n+d)} = K_p^{KB}. \quad (2.3)$$

Перевод индексов K_p в A_p осуществляется по таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Соответствие индексов Кр и Ар

Кр	Ар	Кр	Ар	Кр	Ар	Кр	Ар
0	0	2+	9	5-	39	7	132
0+	2	3-	12	5	48	7+	154
1-	3	3	15	5+	56	8-	179
1	4	3+	18	6-	67	8	207
1+	5	4-	22	6	80	8+	236
2-	6	4	27	6+	94	9-	300
2	7	4+	32	7-	111	9	400

3. Формирование архива данных Ар-индексов геомагнитной активности и индексов F10.7 солнечной активности

При формировании архива данных Ар-индексов геомагнитной активности и индексов F10.7 солнечной активности первоочерёдной задачей являлось определение годов максимальной и минимальной солнечной активности.

Наиболее ярко выраженным циклом солнечной активности является 11-летний период, известный как «цикл Швабе» или «цикл Швабе — Вольфа».

В первой половине XIX века немецкий астроном Генрих Швабе, а позже Рудольф Вольф обнаружили, что количество солнечных пятен меняется с периодичностью около десяти лет и характеризует интенсивность солнечной активности. Хотя этот цикл принято называть «одиннадцатилетним», на самом деле его продолжительность варьировалась: с XVIII по XX век она составляла от 7 до 17 лет, а в XX столетии в среднем была около 10,5 лет.

Цикл проявляется в том, что число солнечных пятен и другие признаки активности Солнца сначала быстро растут (примерно за 4 года), а затем медленно снижаются (около 7 лет). Кроме того, в течение цикла происходят и другие изменения — например, зона образования пятен постепенно смещается к экватору, что известно как «закон Шпёрера».

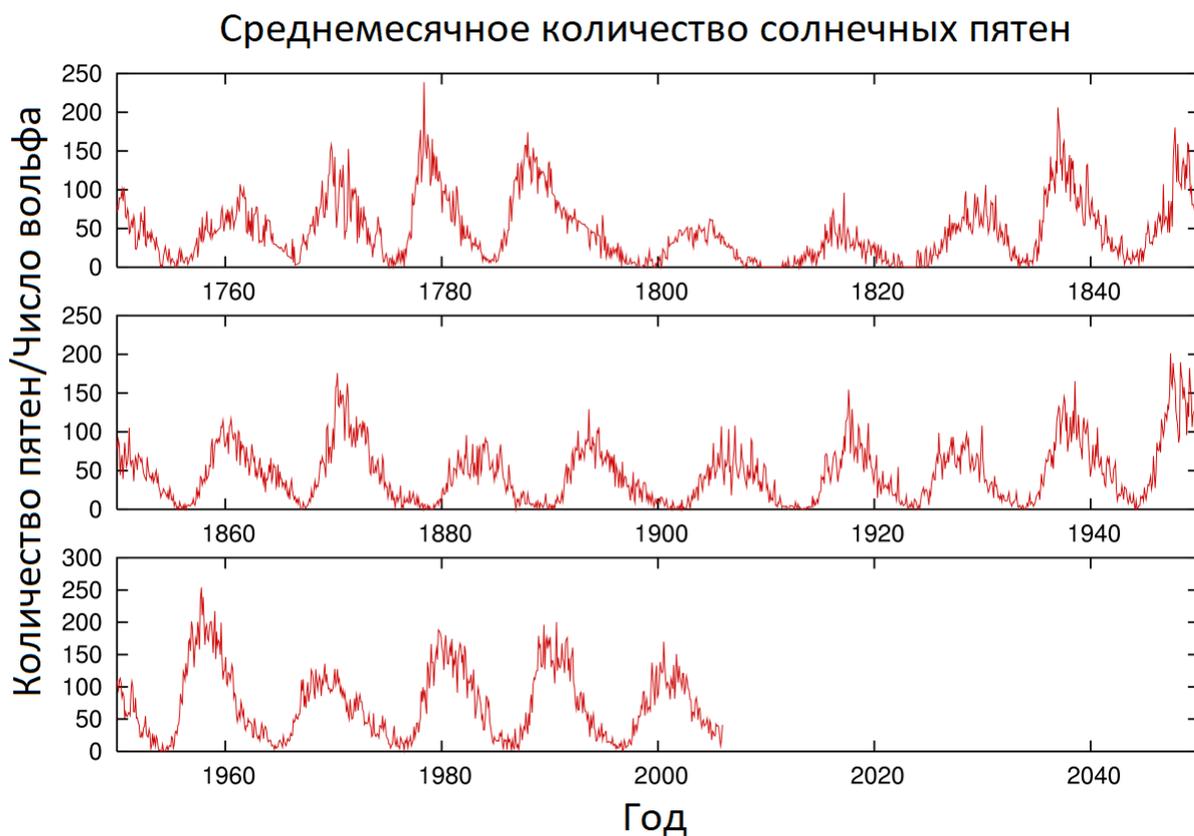


Рисунок 3.1 — Уровень солнечной активности (среднемесячные числа Вольфа)

Другим показателем, характеризующим солнечную активность, является поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см (2800 МГц), который измеряется в солнечных единицах потока: 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/(м²*Гц). Индекс интегральной солнечной активности F10.7 характеризует среднесуточный поток радиоизлучения Солнца, регистрируемый на длине волны 10.7 см (2800 МГц) (Филиппов М.Ю., Ходатаев Н.А., 2019).

Этот индекс был введен после обнаружения радиоизлучения Солнца в 1947 году. Этот показатель отражает колебания температуры и плотности вещества по всей видимой поверхности Солнца. Его динамика тесно связана с изменениями чисел Вольфа и общей площади солнечных пятен, что делает его удобным инструментом для ежедневного мониторинга солнечной активности.

Условно выбраны следующие пороги для качественной оценки солнечной активности:

- $F10.7 < 100$ — низкая солнечная активность.
- $100 < F10.7 < 200$ — умеренная солнечная активность.
- $F10.7 > 200$ — высокая солнечная активность.

В своей работе при формировании архива фактических значений индекса геомагнитной активности A_p и индекса солнечной активности $F10.7$ я пользовался данными с сайта Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике (wdcb.ru/stp). Суточные индексы A_p и K_p для выбранных лет находятся в приложении А.

Ниже представлены годы и месяцы минимальной и максимальной солнечной активности.

Таблица 3.1 — Годы и месяцы максимальной и минимальной солнечной активности

Годы и месяцы максимальной солнечной активности	Годы и месяцы минимальной солнечной активности
1937 апрель	1944 январь
1947 июнь	1954 апрель
1958 март	1964 октябрь
1968 ноябрь	1976 июнь
1979 декабрь	1986 сентябрь
1989 июль	1996 август
2000 апрель	2008 декабрь
2014 апрель	2019 декабрь

В качестве года с высокой солнечной активностью я выбрал 1958 год, так как на протяжении почти всего года значения индекса $F10.7$ превышали 200. В качестве года с низкой солнечной активностью я выбрал 2019 год, так как каждый день на протяжении всего года значения индекса $F10.7$ были меньше 100.

4. Прогнозирование Ap-индекса геомагнитной активности и оценка эффективности прогноза

В своей работе я использовал метод, изложенный в главе 3. Прогноз осуществлялся с использованием программы на языке Fortran, текст которой приведён в Приложении. Сначала на основе периодов в 10 и 30 дней производилось прогнозирование Kp-индекса, а затем происходил его перевод в индекс Ap.

4.1. Прогноз Ap-индекса в год низкой солнечной активности

На графиках ниже представлен годовой ход фактического и прогностического индекса (на основе 10 и 30 дней) Ap в 2019 году.

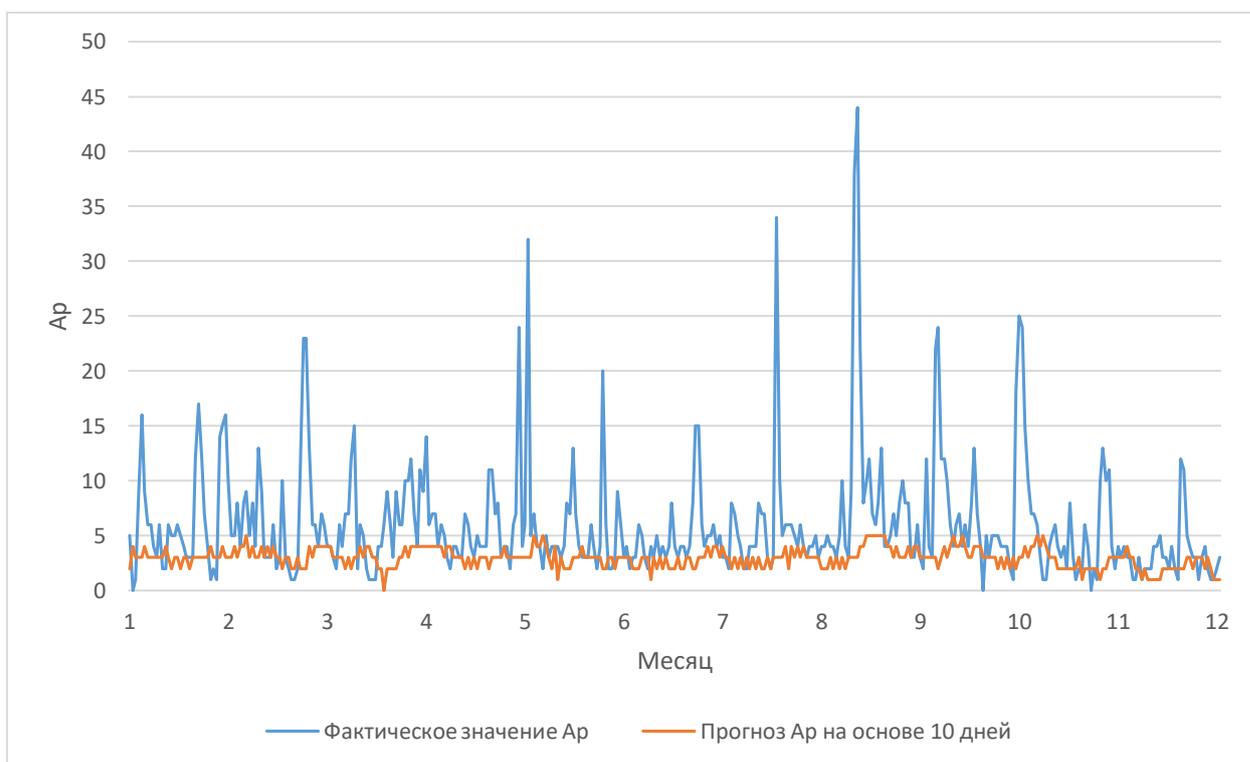


Рисунок 4.1.1 — Годовой график хода фактического и прогностического (10 дней) индекса Ap

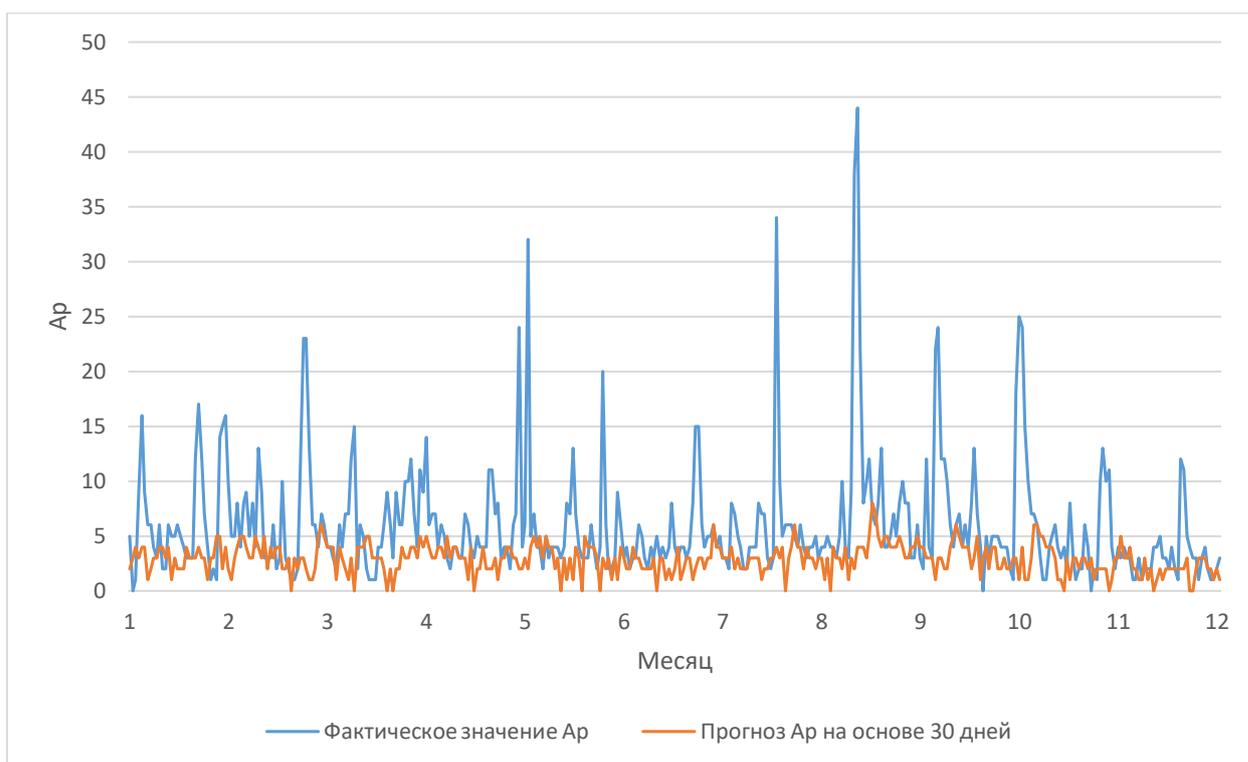


Рисунок 4.1.2 — Годовой график хода фактического и прогностического (30 дней) индекса Ap

Визуально, ряд прогностических значений индекса на основе периода в 10 дней имеет более сглаженный характер по сравнению с 30-дневным прогнозом. Это означает, что он менее чувствителен к резким максимумам фактических значений.

30-дневный прогноз тоже сглажен, но его форма чуть ближе к фактическому ряду, видны моменты, где он лучше улавливает тренды резких изменений.

На обоих графиках пики фактического индекса практически не предсказываются верно — прогностическая линия остаётся стабильной и не реагирует на экстремумы. Это говорит о недостаточной чувствительности модели на всплески геомагнитной активности.

Мною были рассчитаны значения абсолютной ошибки прогностических значений на основе 10 и 30 дней по следующей формуле:

$$\Delta = |y - y_{10,30}| \quad (4.1.1)$$

Где y — это фактические значения Ар-индекса;

$y_{10,30}$ — это прогностические значение индекса Ар на основе 10 и 30 дней соответственно.

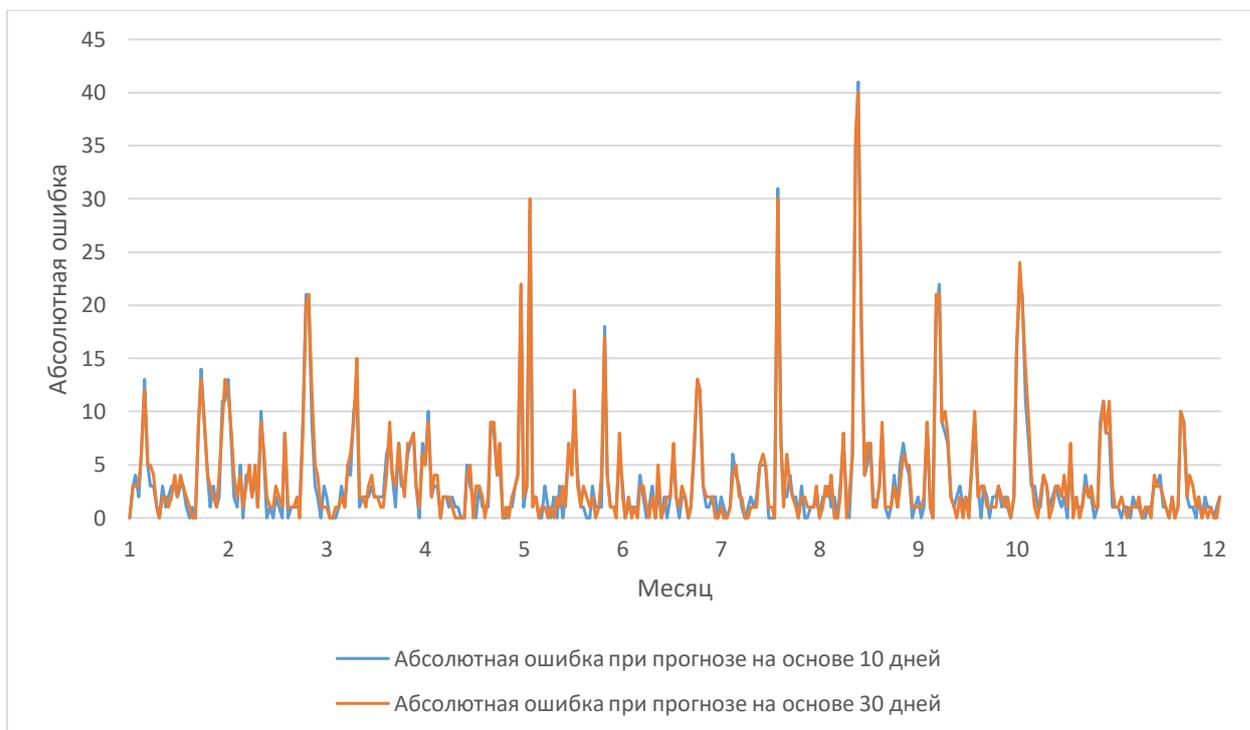


Рисунок 4.1.4 — Годовой график хода абсолютной ошибки прогностических значений

В результате анализа годового хода абсолютной ошибки прогностических значений можно сделать вывод о том, что оба прогноза (на основе 10 и 30 дней) демонстрируют очень похожую структуру ошибок. Ряды этих прогнозов практически совпадают, но высота пиков различается. В целом, прогноз по 10 значениям демонстрирует большую абсолютную ошибку в точках локальных максимумов индекса Ар. Однако это различие редко превышает значения в 1-2 единицы.

Также я рассчитал среднюю абсолютную ошибку (MAE, Mean Absolute Error) по формуле

$$MAE = \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} |y - y_{10,30}|. \quad (4.1.2)$$

В результате расчётов получились следующие значения:

- $MAE_{10} = 3,56$.
- $MAE_{30} = 3,74$.

Это говорит о среднем отклонении прогноза от реальных значений индекса Ар на 3,56 единицы и на 3,74 единицы для прогнозов на основе 10 и 30 дней соответственно. Можно сделать вывод о том, что в отсутствие геомагнитных бурь (которые приводят к значительным отклонениям) модель показывает довольно высокую точность.

Далее был рассчитан ряд абсолютной ошибки в процентах (APE, Absolute Percentage Error) для двух прогнозов по формуле

$$APE = \left| \frac{y - y_{10,30}}{y} \right|. \quad (4.1.3)$$

График представлен ниже.

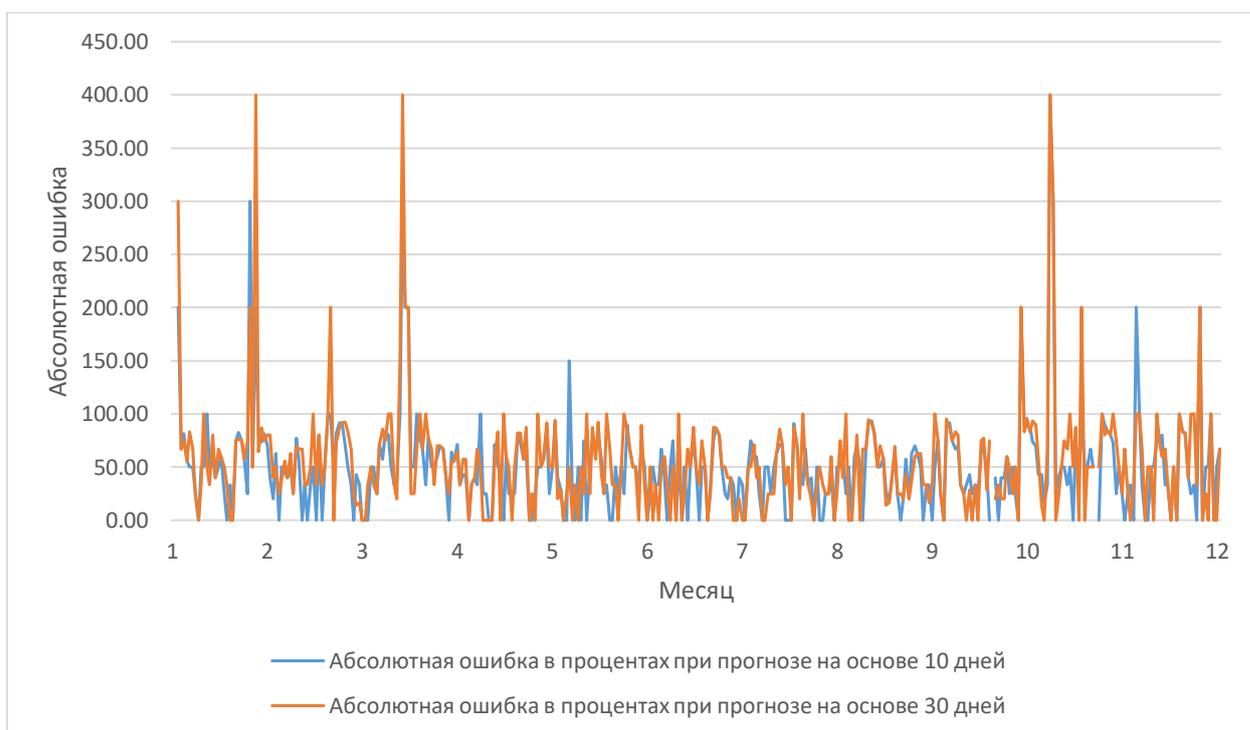


Рисунок 4.1.5 — Годовой график хода относительной ошибки

Можно сделать вывод о том, что прогноз на основе 30 дней демонстрирует большую абсолютную ошибку в точках локальных максимумов фактического индекса Ар.

Затем была рассчитана средняя абсолютная ошибка в процентах по формуле

$$MAPE = \frac{100\%}{365} \sum_{i=1}^{365} \left| \frac{y - y_{10,30}}{y} \right|. \quad (4.1.4)$$

- $MAPE_{10} = 50,4\%$.
- $MAPE_{30} = 55,65\%$.

Можно сделать вывод о том, что в среднем прогноз отклоняется от фактического значения Ар-индекса примерно на половину его величины, причём для прогностического ряда на основе 30 дней это значение больше такового на основе 10 дней.

Это может быть вызвано тем, что при небольшом значении отклонения от факта значение самого фактического индекса также невелико, что приводит к значительной абсолютной ошибке в процентах. Большая часть ряда состоит из небольших значений Ар, что и приводит к большой средней абсолютной ошибке в процентах.

Далее была рассчитана среднеквадратическая ошибка (MSE, Mean Squared Error) по формуле

$$MSE = \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} (y - y_{10,30})^2. \quad (4.1.5)$$

- $MSE_{10} = 39,13$.
- $MSE_{30} = 41,05$.

Учитывая, что средние абсолютные ошибки для обоих прогнозов равны соответственно 3,56 и 3,74, можно сделать вывод о наличии ощутимых выбросов при больших фактических значениях индекса Ар.

Также был рассчитан корень из среднеквадратической ошибки (RMSE, Root Mean Squared Error).

- $RMSE_{10} = 6,26$.
- $RMSE_{30} = 6,41$.

Это говорит о наличии крупных выбросов в ошибках прогноза, что согласуется с предыдущими выводами.

Затем был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона r для обоих прогнозов по формуле

$$r_{10,30} = \frac{\sum_{i=1}^{365} (y - \bar{y})(y_{10,30} - \bar{y}_{10,30})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{365} (y - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^{365} (y_{10,30} - \bar{y}_{10,30})^2}}. \quad (4.1.6)$$

- $r_{10} = 0,06$.
- $r_{30} = 0,00$.

Можно сделать вывод о наличии очень слабой линейной связи между прогнозом и фактом в случае прогноза на основе 10 дней. В случае прогноза на основе 30 дней линейная связь отсутствует.

Далее я посчитал коэффициент детерминации R^2 по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{365} (y - y_{10,30})^2}{\sum_{i=1}^{365} (y - \bar{y}_{10,30})^2}. \quad (4.1.7)$$

- R^2 для прогноза на основе 10 дней равен -0,34.
- R^2 для прогноза на основе 30 дней равен -0,4.

Это говорит о том, что при нестабильной геомагнитной активности и наличии выбросов исследуемая модель не только не объясняет изменчивость Ар-

индекса, но и работает хуже модели, которая при каждом прогнозе будет выдавать среднее значение индекса.

4.2. Прогноз Ар-индекса в год высокой солнечной активности

Ниже расположены графики годового хода фактического и прогностического Ар-индекса.

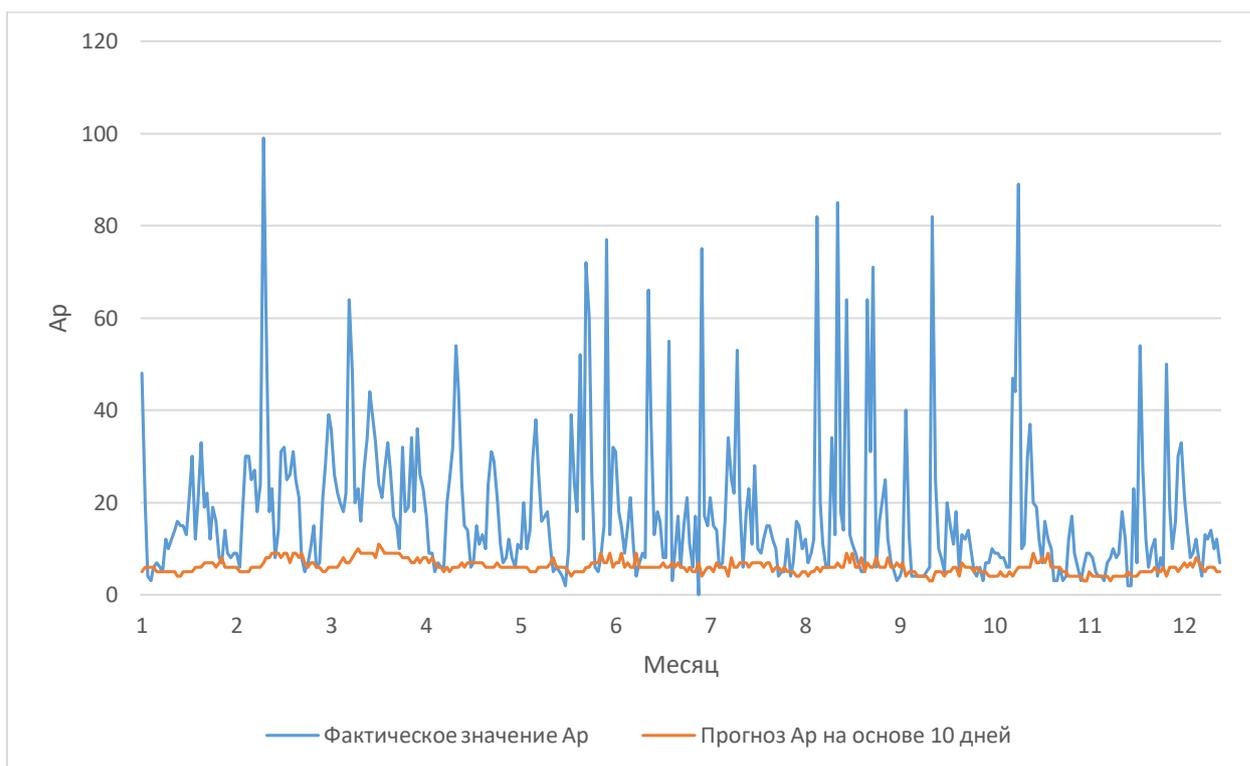


Рисунок 4.2.1 — Годовой график хода фактического и прогностического (10 дней) индекса Ар

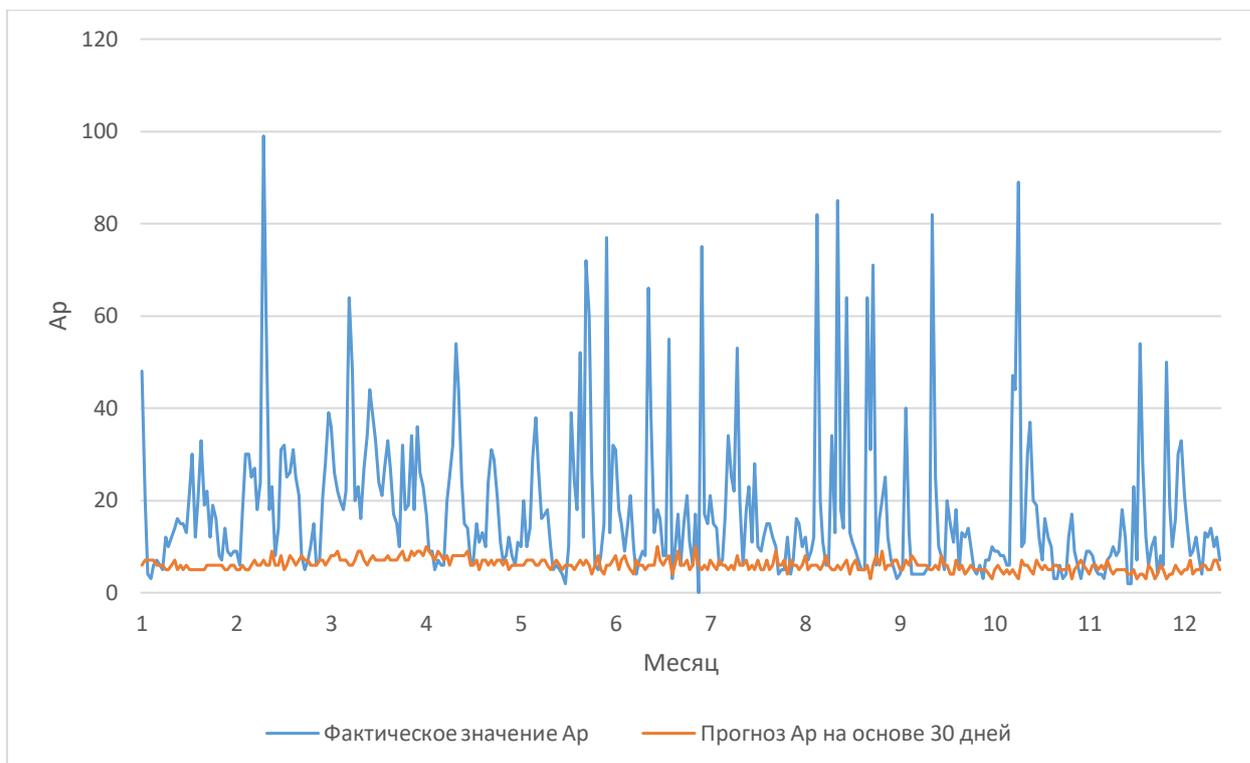


Рисунок 4.2.2 — Годовой график хода фактического и прогностического (30 дней) индекса Ар

На данных графиках наблюдается схожая с предыдущей ситуация. Распределение прогностических индексов имеет значительно сглаженный вид по сравнению с ходом фактических значений индекса. Я могу отметить большую амплитуду значений у функции 10-дневного прогноза по сравнению с 30-дневным.

Далее приведены графики абсолютной ошибки и абсолютной ошибки в процентах.

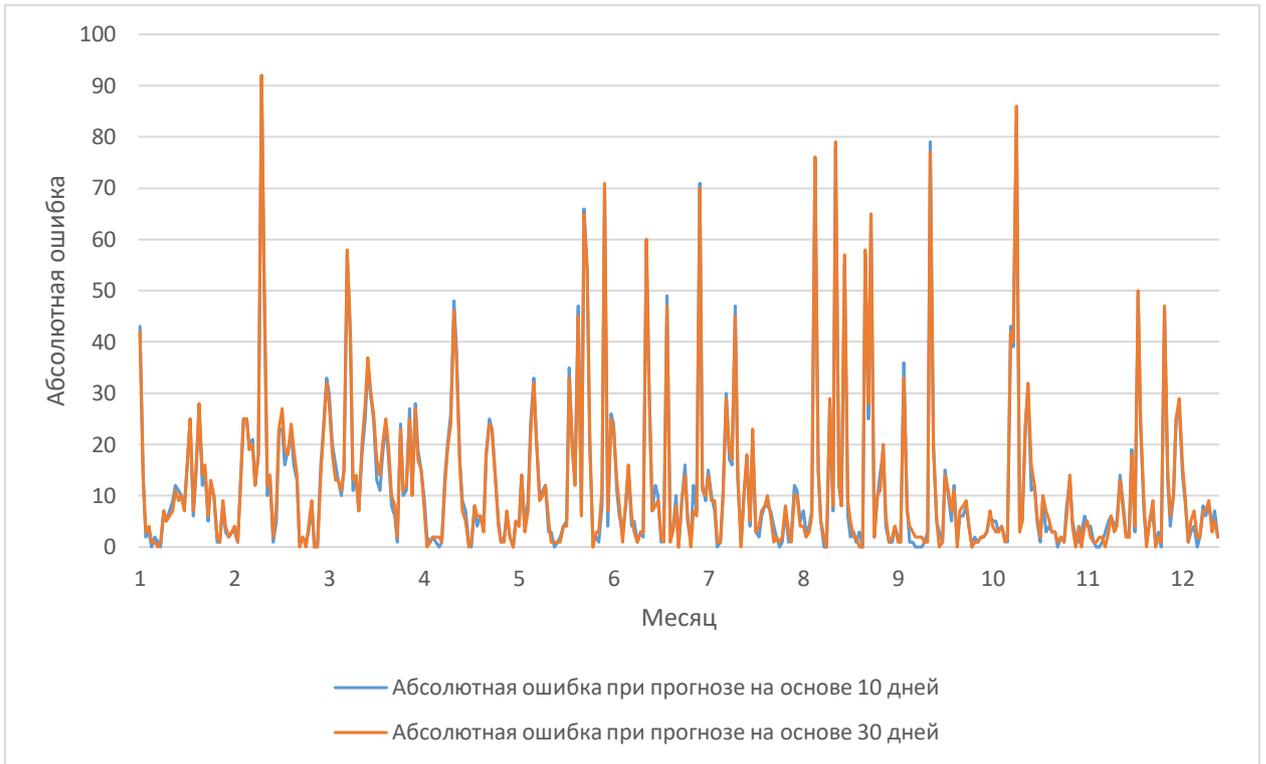


Рисунок 4.2.3 — Годовой график хода абсолютной ошибки прогностических значений

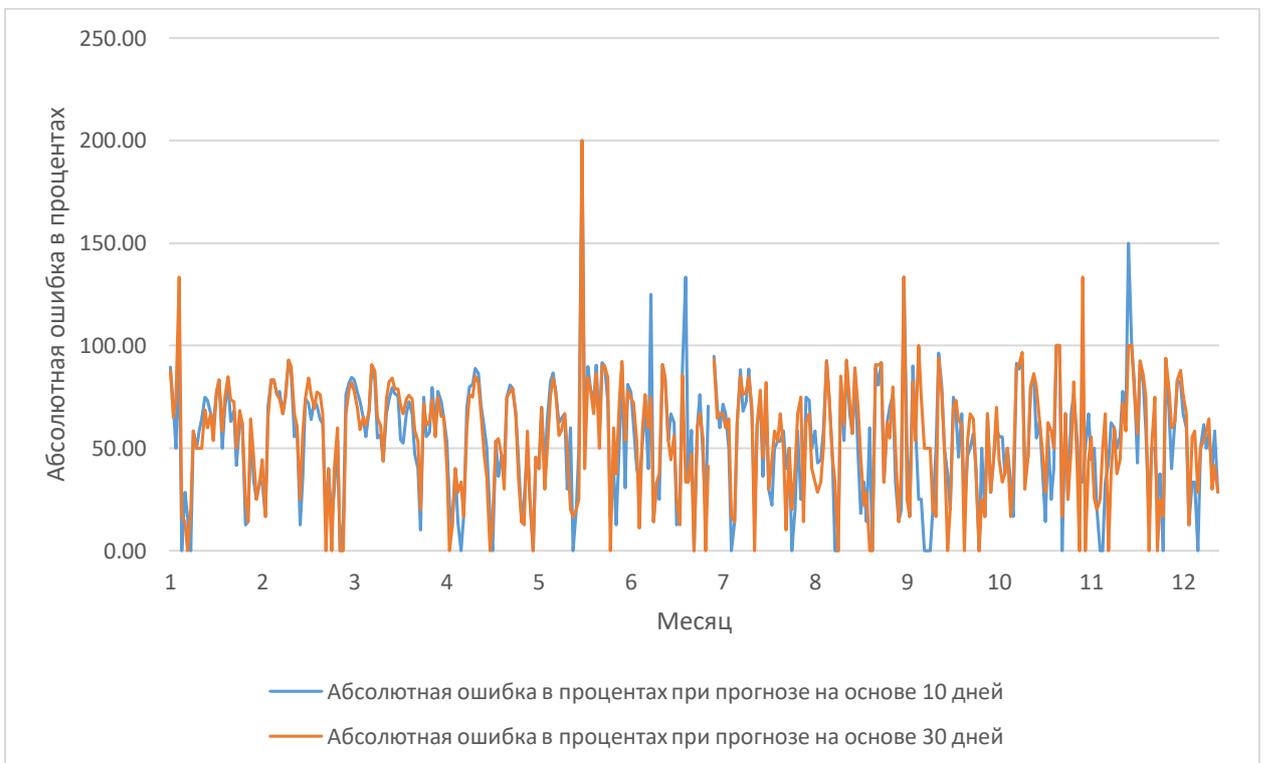


Рисунок 4.2.4 — Годовой график хода относительной ошибки

Распределения абсолютных ошибок для 10-дневных и 30-дневных прогнозов практически совпадают, значимые расхождения отсутствуют. Распределения абсолютных ошибок в процентах ведут себя похожим образом, однако мы можем наблюдать несколько экстремумов 10-дневного прогноза, которые заметно превышают таковые у 30-дневного прогноза.

Ниже приведены рассчитанные значения анализируемых статистических метрик.

- $MAE_{10} = 12,25$.
- $MAE_{30} = 12,36$.

Средние абсолютные ошибки превышают таковые для низкой солнечной активности.

- $MAPE_{10} = 53,84\%$.
- $MAPE_{30} = 54,82\%$.

В целом, средние абсолютные ошибки в процентах схожи с таковыми для низкой солнечной активности.

- $MSE_{10} = 388,47$.
- $MSE_{30} = 391,72$.

Среднеквадратические ошибки значительно превосходят таковые для низкой солнечной активности.

- $RMSE_{10} = 19,71$.
- $RMSE_{30} = 19,79$.

Также наблюдается превышение.

- $r_{10} = 0,13$.
- $r_{30} = 0,08$.

Коэффициенты корреляции Пирсона немного превосходят таковые для низкой солнечной активности.

- R^2 для 10-дневного прогноза равен -0,53.
- R^2 для 30-дневного прогноза равен -0,54.

Значения коэффициентов детерминации меньше таковых для низкой солнечной активности.

4.3. Сравнение эффективности 10-дневного и 30-дневного прогнозов для годов высокой и низкой солнечной активности

Для наглядного сравнения результатов прогнозирования на основе 10 дней и на основе 30 дней я свёл все рассчитанные метрики в таблицу, которая представлена ниже.

Таблица 4.3.1 — Статистические характеристики 10-дневного и 30-дневного прогнозов для годов высокой и низкой солнечной активности

Статистическая характеристика	10-дневный прогноз		30-дневный прогноз	
	Высокая солнечная активность	Низкая солнечная активность	Высокая солнечная активность	Низкая солнечная активность
Средняя абсолютная ошибка	12,25	3,56	12,36	3,74
Относительная ошибка	53,84	50,40	54,82	55,65
Среднеквадратическое отклонение	388,47	39,13	391,72	41,05
Корень из среднеквадратического отклонения	19,71	6,26	19,79	6,41
Коэффициент корреляции Пирсона	0,13	0,06	0,08	0,00
Коэффициент детерминации	-0,53	-0,34	-0,54	-0,40

В результате анализа данной таблицы можно сделать следующие выводы.

При высокой солнечной активности средняя абсолютная ошибка составляет 12,25 для 10-дневного прогноза и 12,36 для 30-дневного. Однако в

условиях низкой солнечной активности точность возрастает: средняя абсолютная ошибка снижается до 3,56 (10-дневный прогноз) и 3,74 (30-дневный прогноз), что говорит о более высокой точности прогнозирования при низкой солнечной активности.

Другая ситуация наблюдается при анализе средней абсолютной ошибки в процентах. Её значения схожи для низкой и высокой солнечной активности.

Анализ среднеквадратического отклонения показывает, что при высокой солнечной активности количество и масштаб ошибок в прогностических индексах резко увеличивается: значения MSE равны 388,47 и 391,72 соответственно, в то время как при низкой активности они равняются 39,13 и 41,05. Это говорит о более низкой эффективности прогнозирования Ар-индекса во время высокой солнечной активности.

Аналогичная ситуация наблюдается с корнем из среднеквадратического отклонения. При высокой активности Солнца RMSE равны 19,71 и 19,79, а во время низкой — 6,26 и 6,41.

Коэффициенты корреляции Пирсона показывают слабую зависимость между прогностическими и фактическими значениями. Особенно это заметно при низкой активности: значение коэффициента при 30-дневном прогнозе равно 0, указывая на отсутствие линейной связи. При высокой солнечной активности корреляция чуть выше, но также остаётся низкой с максимумом коэффициента в 0,13 при 10-дневном прогнозе.

Коэффициенты детерминации во всех случаях принимают отрицательные значения.

4.4. Анализ эффективности прогноза Ар-индекса для периодов спокойной геомагнитной активности в условиях высокой и низкой солнечной активности

Мною была проведена оценка эффективности рассматриваемого метода прогнозирования индекса Ар в периоды, характеризующиеся спокойной геомагнитной активностью без всплесков и выбросов. Такой подход позволяет более точно определить, насколько успешно модель справляется с задачей в условиях, когда геомагнитная обстановка не испытывает резких возмущений, и значения индекса Ар относительно стабильны.

Для проведения анализа я выбрал 2 периода продолжительностью в 11 дней со спокойной геомагнитной активностью из года с низкой солнечной активностью (с 16 по 26 мая 2019 года) и из года с высокой солнечной активностью (с 14 по 24 сентября 1958 года).

Ниже представлены таблицы с фактическими и прогностическими значениями индекса Ар за эти периоды.

Таблица 4.4.1 — Фактические и прогностические значения индекса Ар за период с 16 по 26 мая 2019 года

Год	Месяц	Число	Фактическое значение Ар	Прогноз Ар на основе 10 дней	Прогноз Ар на основе 30 дней
19	5	16	7	5	5
19	5	17	4	4	4
19	5	18	4	4	5
19	5	19	2	5	3
19	5	20	5	4	5
19	5	21	3	3	4
19	5	22	4	2	4
19	5	23	4	4	2
19	5	24	4	1	3
19	5	25	3	3	0
19	5	26	4	2	3

Таблица 4.4.2 — Фактические и прогностические значения индекса Ар за период с 14 по 24 сентября 1958 года

Год	Месяц	Число	Фактическое значение Ар	Прогноз Ар на основе 10 дней	Прогноз Ар на основе 30 дней
58	9	14	4	6	5
58	9	15	6	7	5
58	9	16	40	4	7
58	9	17	13	5	6
58	9	18	4	5	8
58	9	19	4	5	7
58	9	20	4	4	6
58	9	21	4	4	6
58	9	22	4	4	6
58	9	23	5	4	6
58	9	24	6	3	5

На основе фактических и прогностических значений индекса Ар за эти периоды были рассчитаны ключевые статистические показатели: средняя абсолютная ошибка, средняя относительная ошибка, среднеквадратическое отклонение, корень из среднеквадратического отклонения, а также коэффициенты корреляции и детерминации.

Таблица 4.4.3 — Статистические характеристики для периодов спокойной геомагнитной активности в условиях высокой и низкой солнечной активности

Статистическая характеристика	10-дневный прогноз		30-дневный прогноз	
	Высокая солнечная активность	Низкая солнечная активность	Высокая солнечная активность	Низкая солнечная активность
Средняя абсолютная ошибка	4,82	1,18	5,18	1,09
Относительная ошибка	30,75	33,96	49,06	30,63
Среднеквадратическое отклонение	125,18	2,82	107,18	2,00
Корень из среднеквадратического отклонения	11,19	1,68	10,35	1,41
Коэффициент корреляции Пирсона	-0,16	0,18	0,27	0,52
Коэффициент детерминации	-0,19	0,35	-0,02	0,54

Кроме того, были построены графики, демонстрирующие сравнение фактических и прогностических значений, а также распределение ошибок.

Ниже приведены графики для низкой солнечной активности.

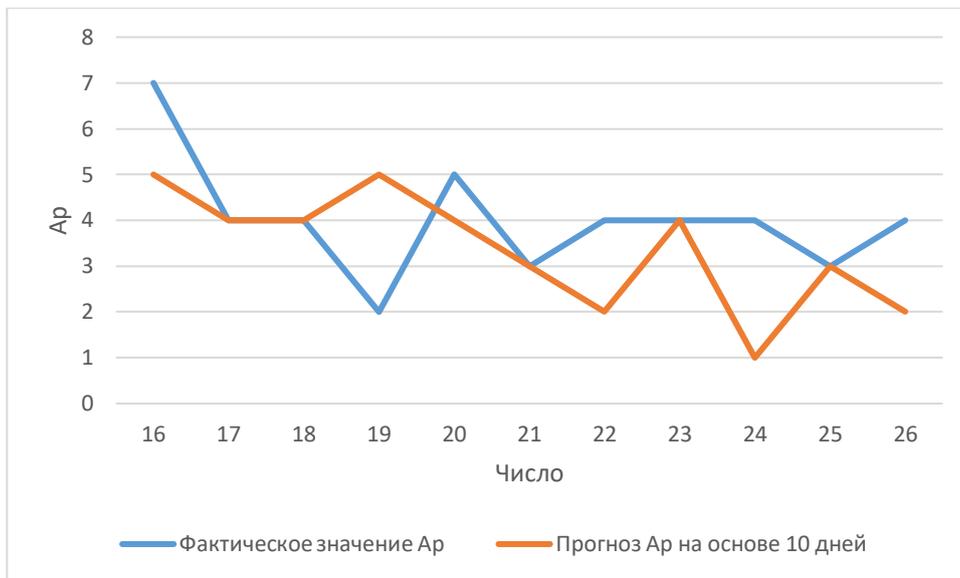


Рисунок 4.4.1 — Временной ход прогностических значений на основе 10 дней

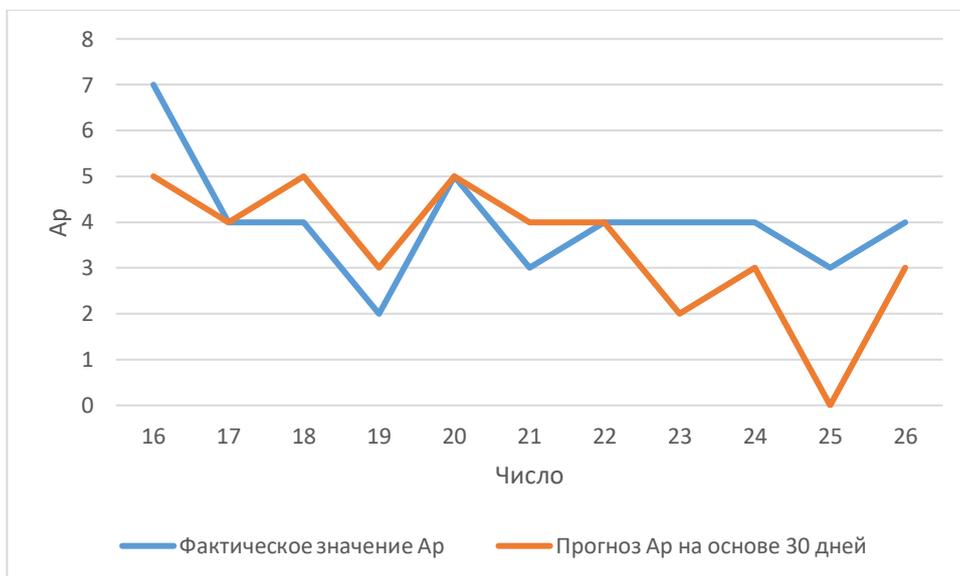


Рисунок 4.4.2 — Временной ход прогностических значений на основе 30 дней

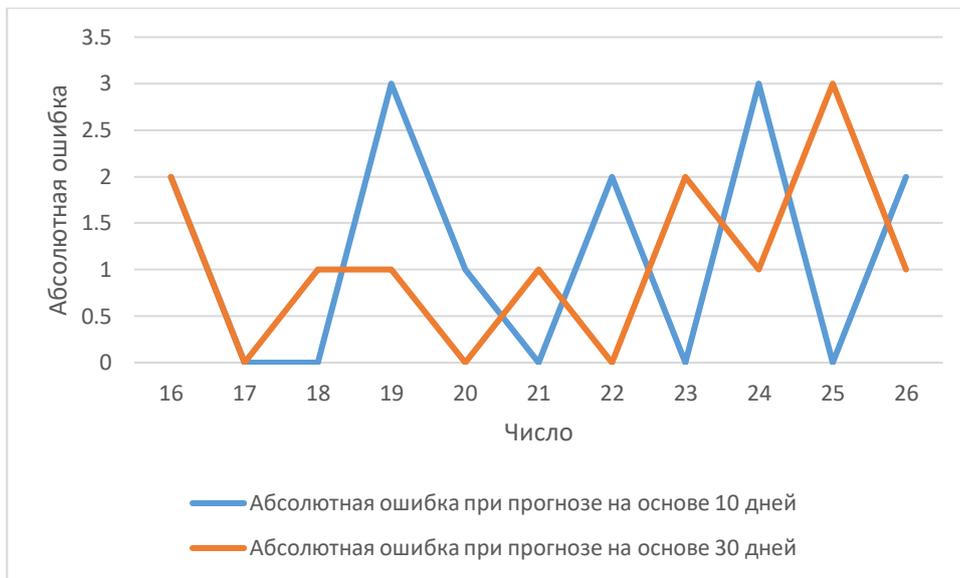


Рисунок 4.4.3 — Временной ход абсолютной ошибки

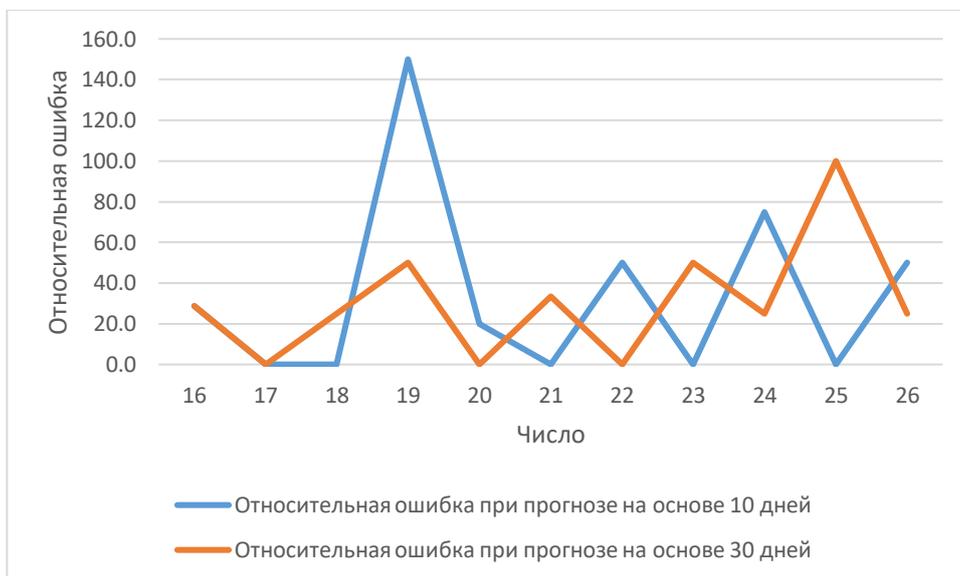


Рисунок 4.4.4 — Временной ход относительной ошибки

Далее приведены графики для высокой солнечной активности.

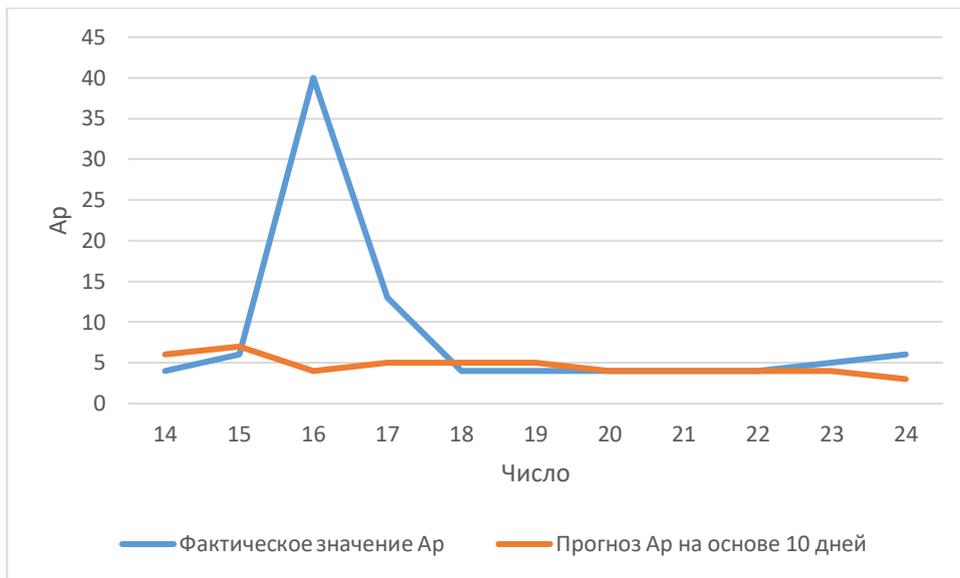


Рисунок 4.4.5 — Временной ход прогностических значений на основе 10 дней

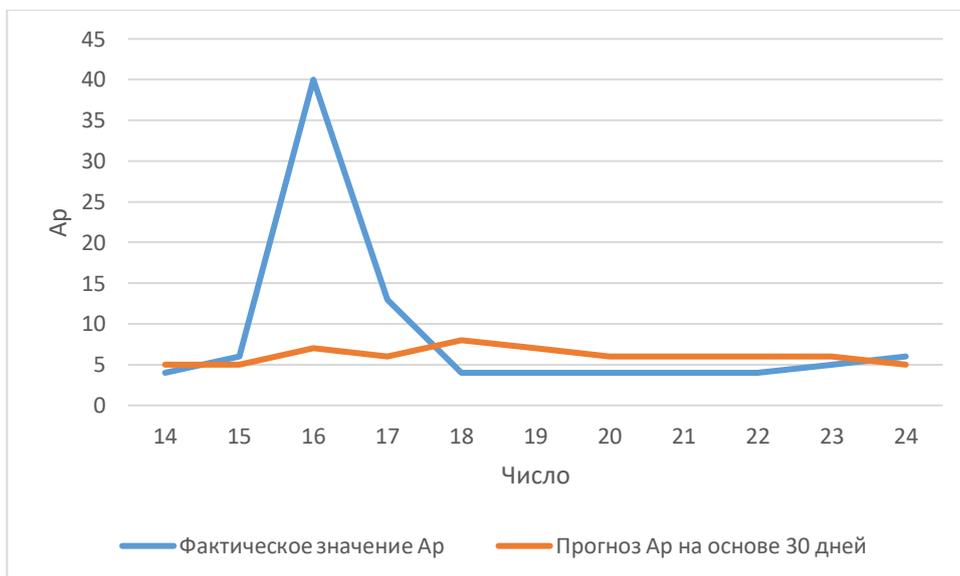


Рисунок 4.4.6 — Временной ход прогностических значений на основе 30 дней

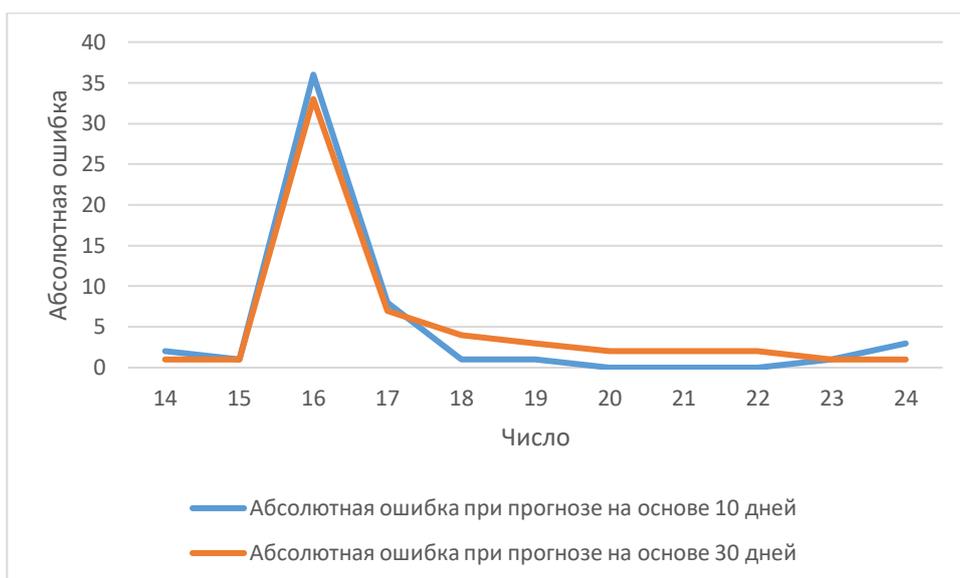


Рисунок 4.4.7 — Временной ход абсолютной ошибки

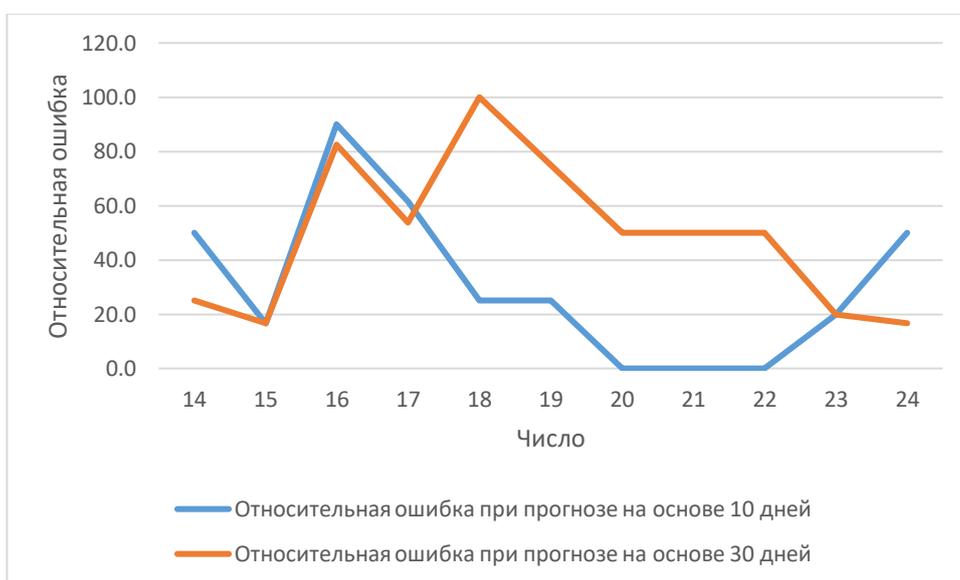


Рисунок 4.4.8 — Временной ход относительной ошибки

Анализ полученных результатов показал следующее:

Прогноз Ар-индекса геомагнитной активности в условиях низкой солнечной активности характеризуется сравнительно низкой абсолютной и относительной ошибкой. Средняя абсолютная ошибка не превышала 1,2 для прогнозов на основе 10 и 30 дней, а средняя относительная ошибка оставалась в пределах 30–34 %.

Среднеквадратическое отклонение и его корень также оказались значительно ниже, чем в условиях высокой солнечной активности, что указывает на более высокую эффективность прогноза.

Коэффициенты корреляции и детерминации имели положительные значения для низкой солнечной активности. Особенно это заметно при прогнозе на основе 30-дней, где коэффициент корреляции Пирсона составил 0,52, а коэффициент детерминации — 0,54. Это свидетельствует о наличии умеренной связи между прогнозируемыми и фактическими значениями.

Графики подтверждают статистические характеристики: при низкой геомагнитной активности прогностические значения A_p следуют за фактическими достаточно близко, без значительных отклонений. Ошибки при этом остаются на допустимом уровне и не демонстрируют резких всплесков. Визуальный анализ также указывает на небольшое преимущество прогноза на основе 30 дней.

Таким образом, можно сделать вывод, что при спокойной геомагнитной обстановке в условиях низкой солнечной активности исследуемый метод прогнозирования демонстрирует удовлетворительную эффективность. Он способен достаточно точно воспроизводить поведение индекса A_p и обеспечивает приемлемые уровни ошибки. Это подтверждает потенциал исследуемого метода для использования в периоды стабильной солнечной и геомагнитной активности.

4.5. Анализ эффективности прогноза A_p -индекса для периода высокой солнечной активности

Был проведён анализ эффективности прогнозирования A_p -индекса исследуемым методом в период высокой солнечной активности. Для исследования я выбрал период в 43 дня из 1958 года (с 9 января по 20 февраля), который характеризуется высокой солнечной активностью.

Таблица 4.5.1 — Фактические и прогностические значения индекса Ар за период с 9 января по 20 февраля 1958 года

Год	Месяц	Число	Фактическое значение Ар	Прогноз Ар на основе 10 дней	Прогноз Ар на основе 30 дней
58	1	9	12	5	5
58	1	10	10	5	5
58	1	11	12	5	6
58	1	12	14	5	7
58	1	13	16	4	5
58	1	14	15	4	6
58	1	15	15	5	5
58	1	16	13	5	6
58	1	17	22	5	5
58	1	18	30	5	5
58	1	19	12	6	5
58	1	20	20	6	5
58	1	21	33	6	5
58	1	22	19	7	5
58	1	23	22	7	6
58	1	24	12	7	6
58	1	25	19	7	6
58	1	26	16	6	6
58	1	27	8	7	6
58	1	28	7	8	6
58	1	29	14	6	5
58	1	30	9	6	5
58	1	31	8	6	6
58	2	1	9	6	6
58	2	2	9	6	5
58	2	3	6	5	5
58	2	4	17	5	6
58	2	5	30	5	5
58	2	6	30	5	5
58	2	7	25	6	6
58	2	8	27	6	7
58	2	9	18	6	6
58	2	10	24	6	6
58	2	11	99	7	7
58	2	12	59	8	6
58	2	13	18	8	6

58	2	14	23	9	9
58	2	15	8	9	6
58	2	16	14	9	6
58	2	17	31	8	8
58	2	18	32	9	5
58	2	19	25	9	6
58	2	20	26	7	8

Для анализа я рассчитал следующие статистические характеристики: среднюю абсолютную ошибку, среднюю относительную ошибку, среднеквадратическое отклонение, корень из среднеквадратического отклонения, а также коэффициенты корреляции и детерминации.

Таблица 4.5.2 — Статистические характеристики для периода высокой геомагнитной активности

Статистическая характеристика	10-дневный прогноз	30-дневный прогноз
Средняя абсолютная ошибка	14,42	14,81
Относительная ошибка	59,40	61,64
Среднеквадратическое отклонение	441,16	455,70
Корень из среднеквадратического отклонения	21,00	21,35
Коэффициент корреляции Пирсона	0,19	0,24
Коэффициент детерминации	-0,82	-0,88

Также я построил график хода фактических значений индекса A_p , прогностических значений на основе 10 дней и на основе 30 дней за исследуемый период.

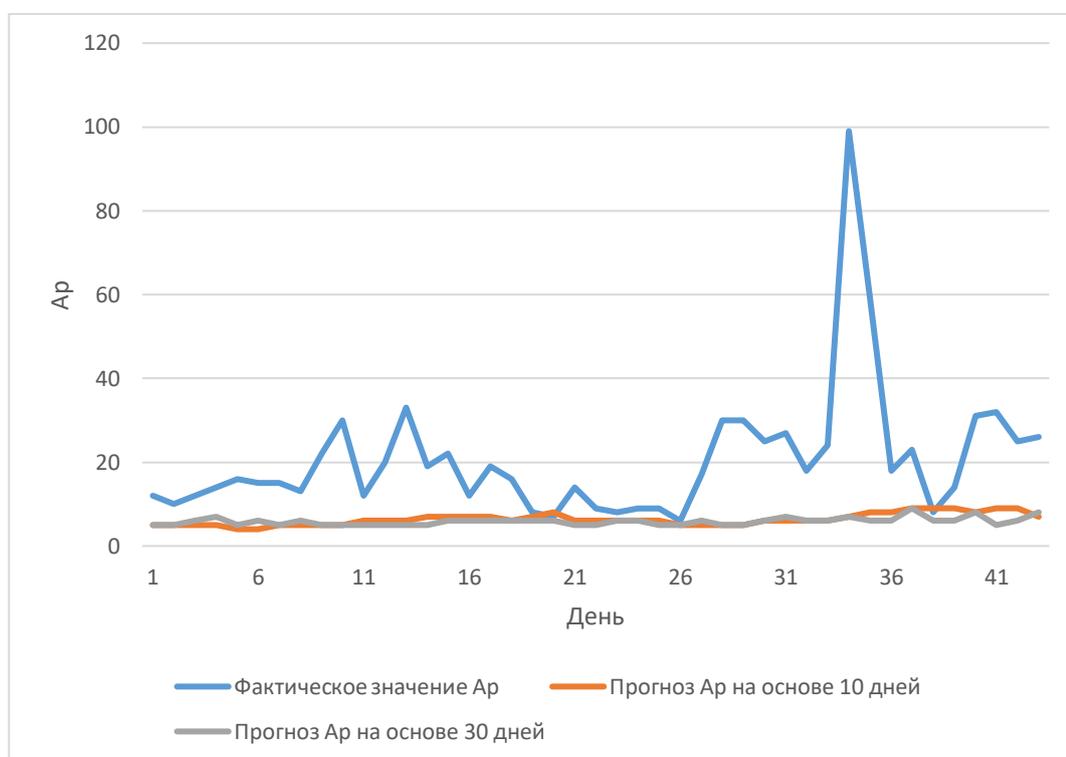


Рисунок 4.5.1 — Временной ход фактических и прогностических значений индекса A_p

Прогноз в условиях высокой солнечной и геомагнитной активности характеризуется большими значениями абсолютной и относительной ошибок, которые превышали 14 и 59 % соответственно. Среднеквадратическое отклонение и его корень также оказались высокими. Коэффициент корреляции Пирсона положителен, однако сильной связь между фактическими и прогностическими значениями назвать нельзя. Коэффициент детерминации близок к -0,9, что говорит о низкой предсказательной способности модели в условиях высокой солнечной и геомагнитной активности.

4.6. Сравнение эффективности прогнозирования Ар-индекса в разные месяцы для высокой и низкой солнечной активности

Я осуществил оценку эффективности прогноза Ар-индекса рассматриваемым методом в разные месяцы года высокой солнечной активности и года низкой солнечной активности. Для исследования я выбрал 4 месяца в 1958 году и 2019 году: январь, апрель, июль и октябрь.

На основе фактических и прогностических значений Ар-индекса я рассчитал ключевые статистические показатели: средняя абсолютная ошибка, средняя относительная ошибка, среднеквадратическое отклонение, корень из среднеквадратического отклонения, а также коэффициенты корреляции и детерминации.

Таблица 4.6.1 — Статистические характеристики для января, апреля, июля и октября в 1958 и 2019 годах

Статистическая характеристика	Январь		Апрель		Июль		Октябрь	
	BCA	HCA	BCA	HCA	BCA	HCA	BCA	HCA
Средняя абсолютная ошибка	9,55	3,84	12,50	2,93	12,52	2,77	11,48	4,52
Относительная ошибка	56,40	78,39	50,86	42,90	54,17	40,63	51,61	48,38
СКО	171,16	25,65	285,77	15,00	351,35	18,26	434,00	56,65
Корень из СКО	13,08	5,06	16,90	3,87	18,74	4,27	20,83	7,53
Коэффициент корреляции Пирсона	-0,30	0,20	0,19	0,35	-0,03	-0,10	-0,25	-0,19
Коэффициент детерминации	-0,98	-0,36	-0,69	-0,75	-0,63	-0,88	-0,45	-0,54

Также мною были построены графики хода фактических и прогностических значений индекса Ар за исследуемые месяцы в годы высокой и низкой солнечной активности.

Ниже расположены графики для высокой солнечной активности.



Рисунок 4.6.1 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ар-индекса в январе 1958 года

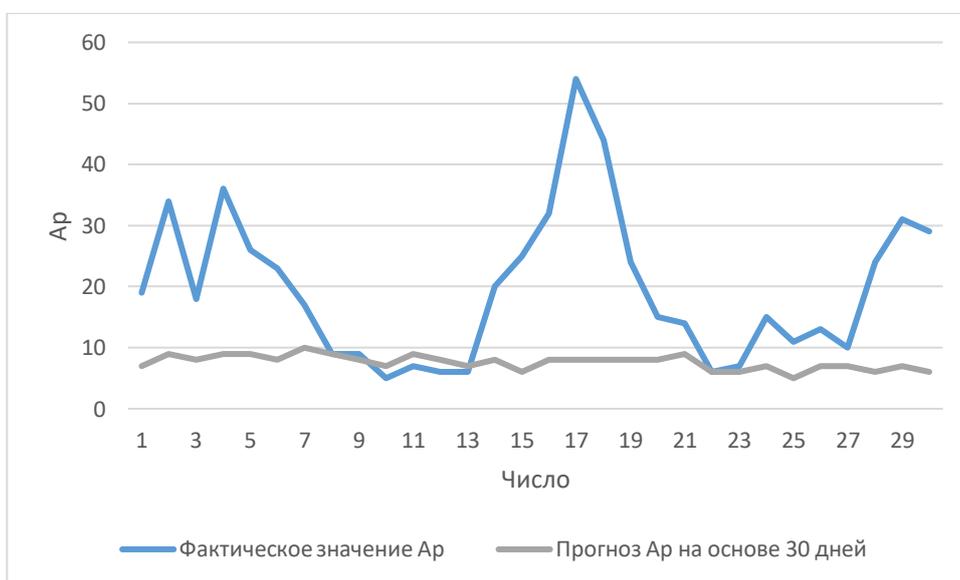


Рисунок 4.6.2 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ар-индекса в апреле 1958 года



Рисунок 4.6.3 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ap-индекса в июле 1958 года



Рисунок 4.6.4 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ap-индекса в октябре 1958 года

Далее представлены графики для низкой солнечной активности.



Рисунок 4.6.5 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ар-индекса в январе 2019 года



Рисунок 4.6.6 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ар-индекса в апреле 2019 года

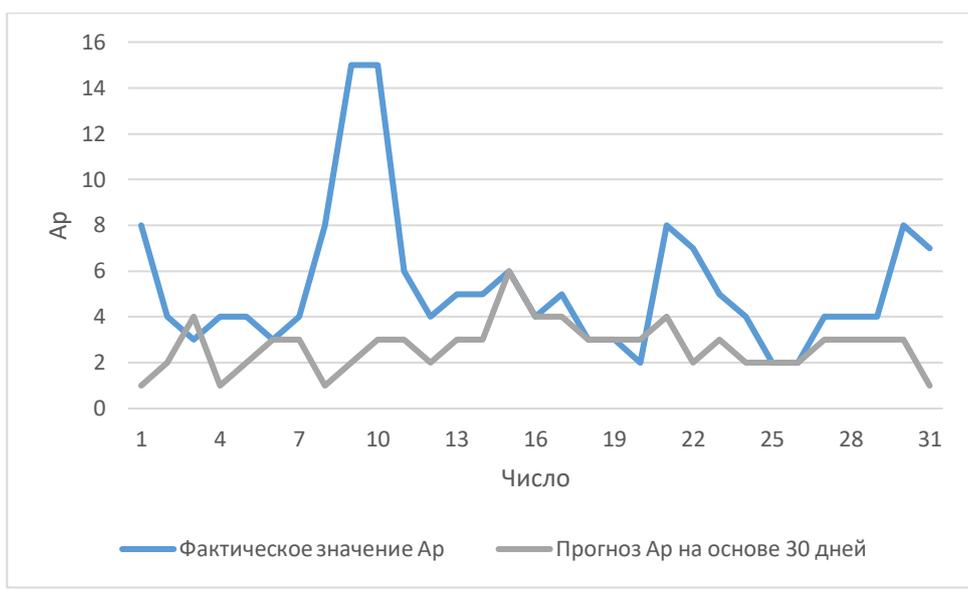


Рисунок 4.6.7 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ар-индекса в июле 2019 года

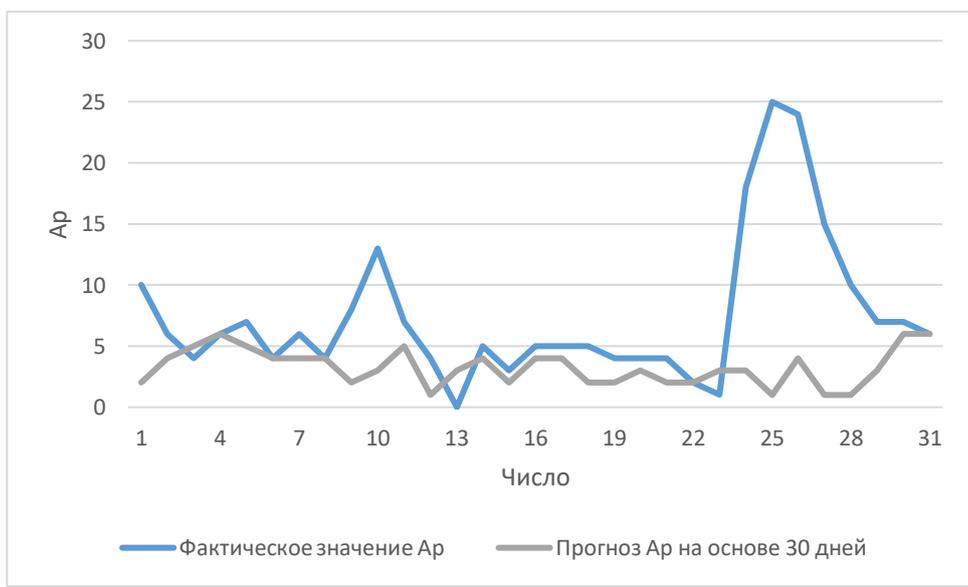


Рисунок 4.6.8 — Временной ход фактических и прогностических значений (на основе 30 дней) Ар-индекса в октябре 2019 года

В целом, на основе рассчитанных статистических характеристик и графиков я не могу сделать однозначный вывод о том, в какой из периодов наблюдалась наибольшая эффективность прогнозирования Ар-индекса. Апрель 2019 года характеризуется сравнительно низкими значениями абсолютной и относительной ошибок, а также СКО и его корня; коэффициент корреляции оказался максимальным среди всех исследуемых промежутков. Однако

коэффициент детерминации был равен $-0,75$, что является не лучшим результатом.

Однако из проведённых расчётов следует, что эффективность прогнозирования Ар-индекса значительно выше в периоды низкой солнечной активности, что согласуется с предыдущими выводами.

4.7. Оценка эффективности прогнозирования Ар-индекса на основе матричной системы оценки успешности прогнозов

В целях повышения достоверности своего исследования я провёл оценку эффективности прогнозирования индекса Ар при помощи альтернативных матриц сопряжённости для 1958 года и 2019 года (высокая и низкая солнечная активность). Я использовал две градации: $Ar < 6$ и $Ar \geq 6$, что соответствует спокойной и беспокойной геомагнитной обстановке соответственно.

Матрицы сопряжённости прогнозов на основе 10 и 30 дней для низкой и высокой солнечной активности приведены ниже.

Низкая солнечная активность:

Таблица 4.7.1 — Матрица сопряжённости прогнозов на основе 10 дней для низкой солнечной активности

Прогноз на основе 10 дней			
Ф	П		
	$Ar < 6$	$Ar \geq 6$	Σn_j
$Ar < 6$	223	0	223
$Ar \geq 6$	142	0	142
Σn_i	365	0	365

Таблица 4.7.2 — Матрица сопряжённости прогнозов на основе 30 дней для низкой солнечной активности

Прогноз на основе 30 дней			
Ф	П		
	$A_p < 6$	$A_p \geq 6$	Σn_j
$A_p < 6$	222	1	223
$A_p \geq 6$	135	7	142
Σn_i	357	8	365

Высокая солнечная активность:

Таблица 4.7.3 — Матрица сопряжённости прогнозов на основе 10 дней для высокой солнечной активности

Прогноз на основе 10 дней			
Ф	П		
	$A_p < 6$	$A_p \geq 6$	Σn_j
$A_p < 6$	24	22	46
$A_p \geq 6$	97	222	319
Σn_i	121	244	365

Таблица 4.7.4 — Матрица сопряжённости прогнозов на основе 30 дней для высокой солнечной активности

Прогноз на основе 30 дней			
Ф	П		
	$A_p < 6$	$A_p \geq 6$	Σn_j
$A_p < 6$	16	30	46
$A_p \geq 6$	107	212	319
Σn_i	123	242	365

На основе полученных частот были рассчитаны следующие критерии успешности:

- Общая оправдываемость прогнозов. Под оправдываемостью прогнозов понимается их общая оправдываемость как отношение числа оправдавшихся прогнозов к общему числу случаев. Данный критерий изменяется от 0 до 1 (Хандожко Л.А, 2005).
- Показатель ρ . Этот критерий, в отличие от общей оправдываемости прогнозов, учитывает ошибки n_{12} и n_{21} и изменяется в пределах от -1 до 1.
- Критерий точности прогнозов по М.А. Обухову. Данный показатель выражает долю успешных прогнозов при известной повторяемости фаз погоды, меняется в пределах от -1 до 1 (все прогнозы ошибочны и все прогнозы идеальны).
- Оправдываемость исследуемой градации A_p -индекса ($A_p < 6$). Этот критерий позволяет установить, в какой степени формулировка прогноза ($A_p < 6$) отвечает данной фазе ($A_p < 6$). Данный показатель меняется в пределах от 0 до 1.

Общая оправдываемость прогнозов была рассчитана по следующей формуле:

$$p = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} * 100 \quad (4.7.1)$$

В результате получилось:

Таблица 4.7.5 — Результаты расчётов общей оправдываемости прогнозов

Низкая солнечная активность		Высокая солнечная активность	
Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней	Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней
61%	63%	67%	62%

Показатель ρ был рассчитан по следующей формуле:

$$\rho = \frac{(n_{11} + n_{22}) - (n_{12} + n_{21})}{N} \quad (4.7.2)$$

В результате получилось:

Таблица 4.7.6 — Результаты расчётов показателя ρ

Низкая солнечная активность		Высокая солнечная активность	
Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней	Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней
0,22	0,25	0,35	0,25

Критерий точности прогнозов по М.А. Обухову был рассчитан следующим образом:

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12}}{n_{10}} + \frac{n_{21}}{n_{20}} \right) \quad (4.7.3)$$

В результате получилось:

Таблица 4.7.7 — Результаты расчётов критерия точности прогнозов по М.А. Обухову

Низкая солнечная активность		Высокая солнечная активность	
Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней	Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней
0,00	0,04	0,22	0,01

Оправдываемость исследуемой градации Ар-индекса ($Ar < 6$) была рассчитана следующим образом:

$$P(\Pi|\Phi) \equiv \tilde{q}_{11} = \frac{n_{11}}{n_{10}} \quad (4.7.4)$$

В результате получилось:

Таблица 4.7.8 — Результаты расчётов оправдываемости исследуемой градации
 Ар-индекса ($A_p < 6$)

Низкая солнечная активность		Высокая солнечная активность	
Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней	Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней
1,00	1,00	0,52	0,35

Ниже приведён анализ полученных результатов.

Таблица 4.7.9 — Сравнительный анализ полученных результатов

Критерий успешности	Низкая солнечная активность		Высокая солнечная активность	
	Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней	Прогноз на основе 10 дней	Прогноз на основе 30 дней
p	61%	63%	67%	62%
\tilde{q}_{11}	0,22	0,25	0,35	0,25
Q	0,00	0,04	0,22	0,01
$P(П Ф)$	1,00	1,00	0,52	0,25

Общая оправдываемость прогнозов для прогнозов на основе 10 и 30 дней в периоды низкой и высокой солнечной активности находится в пределах от 61%

до 67%. Эти прогнозы нельзя назвать успешными. Однако данный критерий не учитывает ошибки прогнозирования n_{12} и n_{21} .

Показатель ρ является более жёсткой оценкой оправдываемости прогнозов. Для низкой солнечной активности для прогнозов на основе 10 и 30 дней эти показатели равны 0,22 и 0,25 соответственно, для высокой — 0,35 и 0,25. По данным показателям прогнозы также можно назвать неуспешными.

Критерий точности прогнозов по М.А. Обухову также дал низкие результаты. Для низкой солнечной активности для прогнозов на основе 10 и 30 дней эти показатели равны 0,00 и 0,04 соответственно, для высокой — 0,22 и 0,01.

Однако оправдываемость исследуемой градации Ар-индекса показала более обнадеживающие результаты. Согласно этому критерию, при низкой солнечной активности оправдываемость прогноза низкой геомагнитной активности равна 1, следовательно, является идеальной. При высокой солнечной активности результаты хуже — 0,52 и 0,25 для прогнозов на основе 10 и 30 дней соответственно. Это согласуется с предыдущими результатами — исследуемый метод прогнозирования Ар-индекса показывает хорошие результаты при низкой геомагнитной активности, при высокой активности его эффективность падает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении оценки эффективности прогнозирования Ар-индекса геомагнитной активности на основании методики расчёта индексов геомагнитной активности по ГОСТ 25645.120—85 для низкого и высокого уровней солнечной активности были получены следующие результаты:

1. Были определены годы высокой и низкой солнечной активности. В качестве года с высокой солнечной активностью я выбрал 1958 год, так как на протяжении почти всего года значения индекса F10.7 превышали 200. В качестве года с низкой солнечной активностью я выбрал 2019 год, так как каждый день на протяжении всего года значения индекса F10.7 были меньше 100.
2. За 1958 и 2019 годы был сформирован архив Ар-индексов геомагнитной активности и индексов F10.7 солнечной активности.
3. Был произведён прогноз Ар-индекса для 1958 и 2019 годов на основе фактических значений Ар-индекса в 10 и 30 дней при помощи методики расчета индексов геомагнитной активности (РД 50-25645.120-85).
4. На основе фактических и прогностических значений Ар-индекса были рассчитаны статистические показатели для оценки успешности прогнозов индекса геомагнитной активности. В первую очередь было произведено сравнение эффективности 10-дневного и 30-дневного прогнозов для годов высокой и низкой солнечной активности. На основании фактических и прогностических значений индекса Ар за 1958 и 2019 года были рассчитаны ключевые статистические показатели. На основании данного сравнения можно сделать вывод о том, что исследуемая методика даёт неудовлетворительные результаты при высокой солнечной активности, а также при наличии выбросов.

Затем был произведён анализ эффективности прогноза Ар-индекса для периодов спокойной геомагнитной активности (с 14 по 24 сентября 1958 года и с 16 по 26 мая 2019 года) в условиях высокой и низкой солнечной

активности. На основании фактических и прогностических значений индекса A_p за соответствующие периоды были рассчитаны ключевые статистические показатели. В результате получилось, что прогноз A_p -индекса геомагнитной активности в условиях низкой солнечной активности характеризуется сравнительно низкими значениями ошибок, а коэффициенты корреляции и детерминации имеют положительные значения. Это свидетельствует о том, что при спокойной геомагнитной обстановке в условиях низкой солнечной активности исследуемый метод прогнозирования демонстрирует удовлетворительную эффективность.

Далее был произведён анализ эффективности прогноза A_p -индекса для периода (с 9 января по 20 февраля 1958 года) высокой солнечной и геомагнитной активности. На основании фактических и прогностических значений индекса A_p за соответствующий интервал были рассчитаны ключевые статистические показатели. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что в условиях высокой солнечной и геомагнитной активности характеризуется большими значениями ошибок, что говорит о низкой предсказательной способности исследуемой методики в условиях высокой солнечной и геомагнитной активности.

Затем было проведено сравнение эффективности прогнозирования A_p -индекса в разные месяцы для высокой и низкой солнечной активности (январь, апрель, июль и октябрь 1958 и 2019 годов). На основании фактических и прогностических значений индекса A_p за соответствующие периоды были рассчитаны ключевые статистические показатели. Из проведённых расчётов следует, что эффективность прогнозирования A_p -индекса значительно выше в периоды низкой солнечной активности, что согласуется с предыдущими выводами.

5. В целях повышения достоверности своего исследования я провёл оценку эффективности прогнозирования индекса A_p при помощи альтернативных матриц сопряжённости для 1958 года и 2019 года (высокая и низкая солнечная активность). Я использовал две градации: $A_p < 6$ и $A_p \geq 6$, что

соответствует спокойной и беспокойной геомагнитной обстановке соответственно. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что исследуемый метод прогнозирования Ар-индекса показывает хорошие результаты при низкой геомагнитной активности, при высокой активности его эффективность падает.

- б. Был произведён анализ эффективности прогнозирования Ар-индекса исследуемой методикой.

Результаты анализа показали, что исследуемый метод прогнозирования индекса Ар демонстрирует удовлетворительную эффективность при спокойной геомагнитной обстановке. В такие периоды значения ошибок находятся на приемлемом уровне, а направление изменений прогноза в целом соответствует наблюдаемым данным. Это позволяет говорить о том, что исследуемый метод способен воспроизводить общее поведение индекса Ар при низкой солнечной активности.

В то же время выявлено, что при повышенной солнечной активности, сопровождающейся резкими всплесками Ар-индекса, точность прогнозов заметно снижается. Это проявляется в увеличении абсолютных и процентных ошибок, а также в ослаблении связи между прогнозируемыми и фактическими значениями. Таким образом, модель испытывает затруднения при предсказании интенсивных геомагнитных возмущений.

Значимость данной работы заключается в том, что она позволила выявить сильные и слабые стороны применяемого метода прогнозирования. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем совершенствовании моделей прогноза геомагнитной активности, в частности — для повышения их чувствительности к потенциальным всплескам Ар-индекса.

Список использованных источников

1. Шклярук и др. // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 45, 69 – 76, 2024.
2. Филиппов М.Ю., Ходатаев Н.А. Оценка индекса солнечной активности F10.7 по данным мощности радиоизлучения Солнца в диапазоне РЛС // Секция В. Физика околоземного космического пространства. БШФФ-2019. С. 226–227.
3. Методические указания. Атмосфера Земли верхняя. Методика расчёта индексов солнечной и геомагнитной активности для определения плотности (РД 50-25645.120-85). — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. — 38 с.
4. Кулешов Ю.В., Краснов В.М., Готюр И.А. Основы физики околоземного космического пространства. — СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. — 352 с.
5. Хандожко Л.А. Экономическая метеорология. — СПб.: Гидрометеиздат, 2005. — 490 с.
6. Мировой Центр Данных по Солнечно-Земной Физике [Электронный ресурс]. - <http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>

Приложение

Текст программы для прогнозирования индекса Ap

!Prognoz Ap index

```
    program prog
    implicit none
    !prognoz index Ap only on 1 day
    REAL Kp(100),Ap(100),Kp0(100),p,Ap0(100),s,AD(100)
    REAL KPD,KPC,KPN,App
    INTEGER i,kk,k2,j,i0,L,k
    OPEN(11,FILE='Kp_Ap.dat')
    DO 105 i=1,100
105  READ(11,*,end=106)Kp(i),Ap(i)
106  kk=i-1
        OPEN(12,FILE='Ap.dat')
        DO 205 i=1,100
205  READ(12,*,end=206)Ap0(i)
206  k2=i-1
            OPEN(13,FILE='AD.dat')
            DO 305 i=1,100
305  READ(13,*,end=306) AD(i)
306  k=i-1
!pereschet Ap v KP
        DO j=1,k2
            p=Ap0(j)
            DO i=1,kk-1
                IF ((p.GE.Ap(i)).AND.(p.LE.Ap(i+1))) THEN
                    i0=i
                    GOTO 300
                END IF
```

```

END DO
300  s=(p-Ap(i0))*(Kp(i0+1)-Kp(i0))/(Ap(i0+1)-Ap(i0))
      Kp0(j)=Kp(i0)+s
END DO
KPC = 0
KPD = 0
DO i= 1,k2
KPC=KPC+Kp0(i)
END DO
KPC = KPC/REAL(k2)
WRITE(*,*)'KPC=',KPC
KPN=0
DO j=1,k
KPN = KPN+(AD(j)*(Kp0(k+1-j)-KPC))
END DO
KPD = KPN+KPC
WRITE(*,*) 'KPD=',KPD
!pereschet Kp v AP
p=KPD
DO i=1,kk-1
IF ((p.GE.Kp(i)).AND.(p.LE.Kp(i+1))) THEN
i0=i
GOTO 410
END IF
END DO
410  s=(p-Kp(i0))*(Ap(i0+1)-Ap(i0))/(Kp(i0+1)-Kp(i0))
      App=Ap(i0)+s
      WRITE(*,*) 'prognoz Ap=',App
      PAUSE
end program prog

```