

*В.И. Денисова, В.А. Гудкова,
Г.А. Лашина, П.В. Николаев*

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ
КРАТКОСРОЧНЫХ, СРЕДНЕСРОЧНЫХ И ДОЛГОСРОЧНЫХ
ПРОГНОЗОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ
И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ВЕРИФИКАЦИИ**

Институт прикладной геофизики имени Е.К. Федорова, г. Москва

Введение

С технологическим прогрессом человечества и с развитием все более мощной технической наземной и космической инфраструктуры общества все острее дают о себе знать факторы космической погоды, нарушающие ее нормальное функционирование и создающие серьезные риски при осуществлении космической деятельности. Учет этих факторов и парирование их негативного воздействия становится необходимой составной частью обеспечения безопасности космической деятельности [2]. Космической погодой называют совокупность явлений, происходящих в верхних слоях земной атмосферы, в ионосфере и околоземном космическом пространстве. Впервые понятие «погоды в космосе» (космической погоды) ввел гениальный ученый, участник знаменитых Папанинских событий, Герой Советского Союза, академик Евгений Константинович Федоров (1910–1981).

Главным научно-исследовательским учреждением Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям на государственной наблюдательной сети является Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»), г. Москва [1, 3]. Прогнозы космической погоды разной заблаговременности (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные) выпускаются ФГБУ «ИПГ» с момента образования в институте Гелиогеофизической службы Росгидромета [1].

Область применения

Показатель расчета оправдываемости прогнозов космической погоды включен в Государственную программу «Охрана окружающей среды». Методика «Расчет показателя "Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %"» (далее – Методика) разработана для расчета показателя комплекса процессных мероприятий «Обеспечение деятельности Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и подведомственных учреждений» государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» в отношении гелиогеофизических прогнозов предупреждения об опасных и неблагоприятных гелиогеофизических явлениях. Гелиогеофизические прогнозы и предупреждения предоставляются органам государственной власти, МЧС, хозяйствующим субъектам и населению. Настоящая методика оценки оправдываемости гелиогеофизических прогнозов выпущена взамен временной инструкции по оценке оправдываемости ионосферных и магнитных прогнозов.

В методике установлены:

- периодичность составления гелиогеофизических прогнозов различной категории срочности и уточнений к ним, штормовых предупреждений об опасных и неблагоприятных гелиогеофизических явлениях;
- терминология, применяемая для описания ожидаемого гелиогеофизического явления и его развития, градации, а также качественные характеристики прогнозируемых гелиогеофизических явлений;
- алгоритм расчета показателя уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды.

Методика предназначена для оценки оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды, выпускаемых в службе, с целью контроля показателя не ниже 92 %.

Гелиогеофизические прогнозы. Объекты прогноза и контроля

Источниками формирования фактических данных в методике являются данные наблюдательных сетей Росгидромета. Гелиогеофизические прогнозы различной категории срочности по территории зоны ответственности составляют следующие оперативно-прогностические подразделения Гелиогеофизической службы Росгидромета:

- главный гелиогеофизический центр – ФГБУ «ИПГ»;
- региональный центр мониторинга геофизической обстановки ФГБУ «Мурманское УГМС» – Арктический регион;

- региональный центр мониторинга геофизической обстановки ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» – Западно-Сибирский регион;
- региональный центр мониторинга геофизической обстановки ФГБУ «Дальневосточное УГМС» – Дальневосточный регион.

Процесс составления гелиогеофизических прогнозов состоит из двух этапов:

1. Этап накопления данных.
2. Этап прогнозирования.

Каждый гелиогеофизический прогноз имеет срок действия, то есть время начала интервала, для которого составляется прогноз, и время окончания указанного интервала, определяющего заблаговременность прогноза. Одной из наиболее важных характеристик прогноза является его информативность. При практическом использовании методов прогнозирования особую роль играют такие характеристики, как состав и объем исходных данных и их доступность в оперативном режиме.

Ответственным федеральным органом исполнительной власти за формирование показателя «Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %» является Росгидромет.

На рисунке представлена блок-схема входных данных методики.

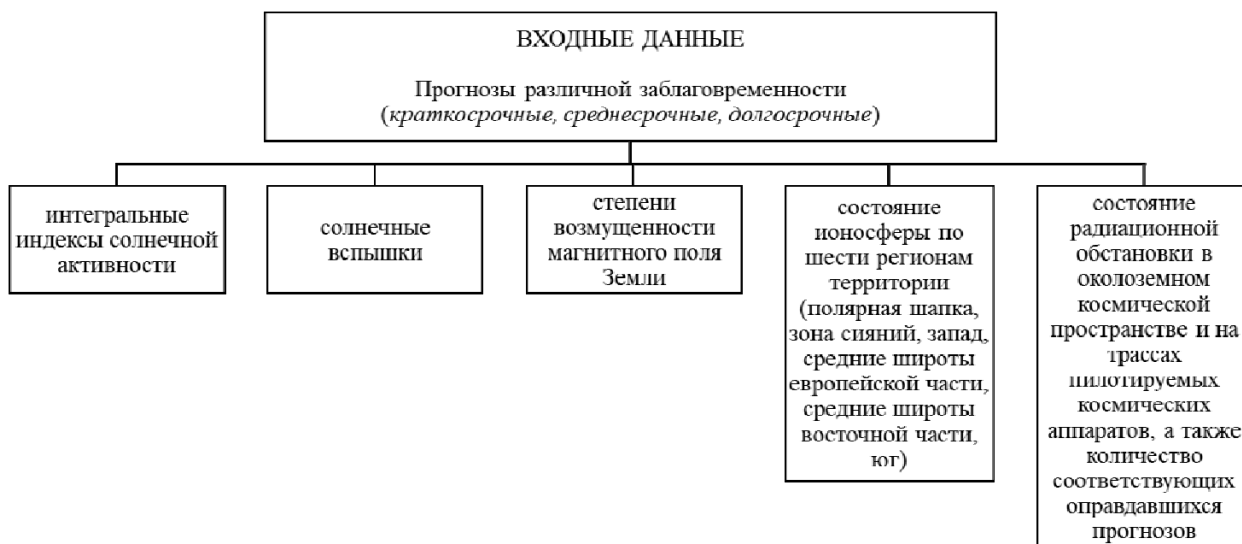


Рисунок. Блок-схема входных данных методики «Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %».

Методика позволяет выпускать прогнозы различной заблаговременности (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные) по пяти показателям, характеризующим космическую погоду:

- интегральные индексы солнечной активности;
- солнечные вспышки;
- степени возмущенности магнитного поля Земли;
- состояние ионосферы по шести регионам территории (полярная шапка, зона сияний, запад, средние широты европейской части, средние широты восточной части, юг);
- состояние радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

Кроме того, в рамках методики осуществляется верификация прогнозов (указывается количество оправдавшихся прогнозов). Все элементы космической погоды представляются в балльных оценках.

Выше указывалось, что прогнозы имеют различную заблаговременность.

1) **Краткосрочные прогнозы.** К краткосрочным прогнозам относятся прогнозы с заблаговременностью до трех суток. Краткосрочные прогнозы Гелиогеофизической службой Росгидромета включают:

- прогноз интегральных индексов солнечной активности (прогноз числа солнечных пятен W (число Вольфа), прогноз потока радиоизлучения Солнца F на длине волны $\lambda = 10,7$ см);

- прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла;
- прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли;
- прогноз состояния ионосферы по шести регионам территории (полярная шапка, зона сияний, запад, средние широты европейской части, средние широты восточной части, юг);
- прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

2) **Среднесрочные прогнозы.** Среднесрочные прогнозы составляются в начале прогнозируемого периода на каждый день (пять или семь суток) с заблаговременностью не менее одних суток. В перечень среднесрочных прогнозов, выпускаемых Гелиогеофизической службой Росгидромета, входят:

- прогноз интегральных индексов солнечной активности на 7 суток;
- прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла на 7 суток;
- прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли на 5 и 7 суток;
- прогноз состояния ионосферы для каждого наблюдательного подразделения на 5 суток;
- прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

3) Долгосрочные прогнозы:

– еженедельный прогноз на 27 суток (солнечный оборот) с заблаговременностью одни сутки. Прогноз выдается один раз в неделю на каждый солнечный оборот из 27 последующих суток. По истечении недели прогноз обновляется;

– ежемесячный прогноз на 30–31 сутки (февраль 28–29 суток) с заблаговременностью одни сутки. Прогноз выдается один раз в месяц на каждый день месяца.

В состав еженедельного прогноза на солнечный оборот входят следующие прогнозы:

- прогноз интегрального индекса солнечной активности R ;
- прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла;
- прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли;
- прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

В состав ежемесячного прогноза входят следующие прогнозы:

- возмущенности геомагнитного поля по шестибальной шкале A_p индекса для каждых суток;
- состояния ионосферы Земли по семибальной шкале средних суточных отклонений критических частот слоя $F2$ от медианных значений для каждых суток.

Прогноз интегральных индексов солнечной активности

Интегральными характеристиками проявлений активности Солнца в течение цикла солнечной активности по методике являются:

W – относительные числа солнечных пятен - Число Вольфа;

F – поток радиоизлучения Солнца на длине волны $\lambda = 10.7$ см;

S – сумма площадей солнечных пятен;

If – ежедневный индекс вспышечной активности и другие индексы.

Число Вольфа – числовой показатель солнечной активности, связанный с количеством солнечных пятен, ежесуточно определяется на солнечных обсерваториях. Исходными данными для образования числа Вольфа (W) служит изображение групп пятен на Солнце в белом свете. Число Вольфа для данного дня вычисляется по формуле:

$$W = k (10g + f), \quad (1)$$

где g – число групп пятен на видимом солнечном диске; f (безразмерный параметр) – общее число пятен во всех группах; k (безразмерный параметр) – коэффициент выводится для каждого телескопа и наблюдателя, что дает возможность совместно использовать числа Вольфа, найденные разными наблюдателями.

В настоящее время свод всех наблюдений солнечных пятен и определение среднемесячных и среднегодовых значений чисел Вольфа производится в Центре анализа данных по влиянию Солнца (Бельгия).

Поток радиоизлучения Солнца на длине волны $\lambda = 10,7$ см ($f = 2800$ МГц) характеризует изменения температуры и плотности на всей площади видимого диска и со всех активных областей (и не только в пятнах). Поток радиоизлучения Солнца $F_{10,7}$ изменяется с фазой одиннадцатилетнего солнечного цикла от 60–70 до 200–300 и более единиц солнечного потока ($1 \text{ s.f.u} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$). Количество поступающей информации зависит от количества солнечных обсерваторий, которые проводят данные наблюдения.

В настоящее время в Гелиогеофизической службе для оперативной оценки уровня интегральной солнечной активности используются значения чисел Вольфа W и потока радиоизлучения F , поступающие ежедневно из Центра прогнозирования космической погоды национального управления океанических и атмосферных исследований (США).

В Гелиогеофизической службе для оперативной оценки принят условный интегральный показатель солнечной активности (R), определяемый как половина суммы индексов числа пятен W и численного значения потока радиоизлучения Солнца F

$$R = (W+F)/2, \tag{2}$$

где $F = \frac{F_{10,7}}{s}$ (безразмерный параметр) – численное значение потока радиоизлучения Солнца; $s = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$.

Интегральная солнечная активность оценивается по балльной шкале. Оценка балла интегральной солнечной активности в годы низкой и средней солнечной активности производится согласно данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика интегральной солнечной активности в годы низкой и средней солнечной активности

Балл	Диапазон R	Характеристика интегральной солнечной активности
0	Не более 100	Низкая
1	От 101 до 200 включительно	Умеренная
2	От 201 до 300 включительно	Высокая
3	Более 301	Очень высокая

В годы высокой и максимума солнечной активности оценка интегральной солнечной активности производится согласно данным, приведенным в табл. 2. Оправдываемость

прогнозов интегральной солнечной активности по индексу R в годы низкой и средней солнечной активности оценивается балл в балл. Оправдываемость прогнозов интегральной солнечной активности в годы высокой активности и максимума солнечной активности оценивается балл $\pm 0,5$, т. е. при прогнозе 1 балл оправдавшимся считается прогноз 0,5 и 1,5 балла.

Таблица 2

Характеристика интегральной солнечной активности в годы высокой и максимума солнечной активности

Балл	Диапазон R	Характеристика интегральной солнечной активности
0	Не более 100	Низкая
0,5	От 100 до 150 включительно	Низко-умеренная
1	От 151 до 200 включительно	Умеренная
1,5	От 201 до 250 включительно	Умеренно-высокая
2	От 251 до 300 включительно	Высокая
3	Более 301	Очень высокая

Прогноз вероятности солнечных вспышек

Солнечная вспышка – взрывной процесс выделения энергии (кинетической, световой и тепловой) в атмосфере Солнца. Вспышки так или иначе охватывают все слои солнечной атмосферы: фотосферу, хромосферу и корону Солнца. Частота появления солнечных вспышек зависит от уровня солнечной активности. Наименьшее число вспышек происходит во время солнечного минимума. Активность и интенсивность вспышек достигает своего пика в годы солнечного максимума или сразу после него. Большинство вспышек на Солнце происходит в растущих или подвергнутых внешнему разряжению активных областях. Наибольшие вспышки происходят в группах, имеющих магнитную конфигурацию бета-гамма и, особенно, дельта и бета-гамма-дельта.

Солнечные вспышки можно подразделить на два класса: сильные и компактные. Компактные вспышки – самые меньшие и наиболее частые, могут сопровождаться, в основном, слабыми выбросами вещества. Субвспышки – наименьшие из всех компактных вспышек, очень короткие по продолжительности и выглядят немного ярче, чем флоккулы. Сильные вспышки, намного более сильные и продолжительные, часто сопровождаются выбросами и веерообразными протуберанцами из яркого газа. Такие вспышки испускают сильные лучи в рентгеновском диапазоне и массы энергетических частиц (выбросы корональной массы), что может привести к геомагнитным возмущениям на Земле. С солнечными вспышками связаны три типа электромагнитных излучений: оптическое,

рентгеновское и радиоизлучение. Солнечные вспышки оцениваются исходя из интенсивности их оптических, рентгеновских или радиопотоков. Прогноз солнечных вспышек состоит из комплексной оценки появления вспышки оптического диапазона, рентгеновского диапазона и прогноза протонных событий.

Балл оптической вспышки оценивается по размерам занимаемой активной областью площади и яркости. Для оценки балла максимальной оптической вспышки используется пятибалльная шкала: 0, 1, 2, 3, 4. Оценка максимального оптического балла вспышки в оптической области спектра в момент максимальной яркости производится согласно данным, приведенным в табл. 3. В качестве исходных данных, как для прогноза, так и для его оценки, используются данные мировой сети (наземные и космические).

Таблица 3

Оценка максимального оптического балла вспышки

Балл	Площадь (МДП – миллионная доля полусферы Солнца)	Характеристика вспышки
0	< 100 МДП	Субвспышка S
1	100–250 МДП	Вспышка балла 1
2	250–600 МДП	Вспышка балла 2
3	600–1200 МДП	Вспышка балла 3
4	>1200 МДП	Вспышка балла 4

Прогноз солнечных рентгеновских вспышек формируется следующим образом. Интенсивность мягкого рентгеновского излучения измеряется гидрометеорологическими геостационарными спутниками «Электро» и GOES в диапазоне 1–8 Ангстрем. По классификации солнечной вспышки присваивается балл – обозначение из латинской буквы и индекса за ней. Буквой может быть *A*, *B*, *C*, *M* или *X* в зависимости от величины достигнутого вспышкой пика интенсивности рентгеновского излучения. Буква рентгеновского излучения и его интенсивность в максимуме (пике) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Интенсивность рентгеновского излучения в максимуме

Буква	Интенсивность в пике (Вт/м ²)
<i>A</i>	Меньше 10 ⁻⁷
<i>B</i>	От 1,0×10 ⁻⁷ до 10 ⁻⁶
<i>C</i>	От 1,0×10 ⁻⁶ до 10 ⁻⁵
<i>M</i>	От 1,0×10 ⁻⁵ до 10 ⁻⁴
<i>X</i>	Больше 10 ⁻⁴

Индекс за буквой уточняет значение интенсивности вспышки и может быть от 1,0 до 9,9 для всех букв. В Гелиогеофизической службе для оценки балла максимального рентгеновского излучения используется четырехбалльная шкала: 0, 1, 2, 3. Оценка максимального рентгеновского балла вспышки производится согласно данным, приведенным в табл. 5. В качестве исходных данных, как для прогнозирования, так и для оценки, используются данные глобальной сети (наземной и космической).

Таблица 5

Оценка максимального рентгеновского балла вспышки

Балл	Рентгеновский класс
0	Максимальный рентгеновский класс – C5
1	Максимальный рентгеновский класс – C9
2	Максимальный рентгеновский класс – M
3	Максимальный рентгеновский класс – X

При формировании прогноза протонных событий руководствуются следующей информацией. Корпускулярное излучение солнечных вспышек состоит в основном из протонов со значительной долей α -частиц и некоторого количества тяжелых частиц. Предвестниками вероятности протонных вспышек могут быть следующие условия:

- вспышки класса $> M5$;
- зарегистрированы радиовсплески II и IV типа;
- площадь группы пятен более 500 МДП;
- если «время спада» много меньше времени продолжительности вспышек;
- если «время нарастания»/«время спада» $< 0,5$;
- если количество пятен в группе резко возрастает до 30–40;
- резко растет количество вспышек в группе и т. д.

Если выполняются хотя бы три условия из вышеперечисленных, то велика вероятность протонных вспышек.

Прогнозы вероятности солнечных вспышек носят вероятностный характер и сопровождаются терминами: «возможны» или «ожидаются».

Прогнозы могут быть:

- правильными: совпадение с диагнозом балл в балл;
- неправильными: отличие от диагноза более чем на балл;

– частично правильными с мерой 1/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «возможны» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «ожидаются»;

– частично правильными с мерой 2/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «ожидаются» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «возможны».

Прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли

Прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли составляется на основе рекуррентного прогноза по «коврикам» Бартельса и оценки геоэффективности солнечных вспышек. Различают магнитные бури с внезапным началом (*SSC u VMSSC – sudden storm commencement u very marked sudden storm commencement*) и рекуррентные бури с постепенным началом (*gradual storm beginning – GSB*). В периоды высокой солнечной активности, как правило, это годы 11-летних максимумов, подавляющее большинство возмущений геомагнитного поля связано со вспышками, в то время как в периоды минимума солнечной активности основная доля возмущений определяется квазистационарными высокоскоростными потоками солнечного ветра. Они образуются в короне над активными центрами, время жизни последних в зависимости от цикла к циклу, и особенно от фазы цикла, варьирует от одного до нескольких оборотов Солнца. Именно поэтому повторяющиеся (рекуррентные) геомагнитные возмущения, идентифицируемые в большинстве случаев как бури с постепенным началом, становится возможным прогнозировать на один или несколько оборотов Солнца. Рекуррентные бури имеют тенденцию повторяться с периодом 27,3 суток (полный оборот Солнца вокруг своей оси). Рекуррентные бури вызываются высокоскоростными потоками (несущими обычно южную компоненту межпланетного магнитного поля) в солнечном ветре от долгоживущих (в течение нескольких оборотов) областей на Солнце, таких как корональные дыры, секторные границы общего магнитного поля Солнца, униполярные области.

При взаимодействии ускоренного, усиленного потока солнечного ветра с магнитосферой, в ней, а также в геомагнитном поле возникает ряд резких изменений – геомагнитная буря. В Гелиогеофизической службе для прогноза геомагнитных бурь рекуррентного характера строятся «коврики» Бартельса, в которых по горизонтальной оси нанесены Керрингтоновские обороты Солнца, по вертикальной оси – ежесуточная оценка состояния геомагнитного поля. *ApMos* – региональный суточный квазипланетарный индекс оценки состояния геомагнитного поля, вычисляемый по данным среднеширотных станций Евразийского региона. Прослеживая состояние возмущенного геомагнитного поля по

«коврикам» Бартельса, можно наблюдать тенденцию к усилению или ослаблению ожидаемых рекуррентных возмущений на последующих оборотах Солнца. Это позволяет прогнозировать время начала, интенсивность и длительность бури. Кроме того, для прогноза геомагнитных бурь рекуррентного характера необходимо использовать параметры солнечного ветра: увеличение плотности солнечного ветра, изменение величины и знака B_z – компоненты межпланетного магнитного поля, увеличение скорости солнечного ветра, наличие и местоположение корональных дыр и др. Ускоренный поток солнечного ветра от корональной дыры геоэффективен, то есть вызывает возмущение в магнитном поле, когда корональная дыра находится на геоэффективных долготах $20\text{--}50^\circ$ западной долготы.

В период высокой солнечной активности большая часть геомагнитных возмущений связана со вспышками, и большинство регистрируемых магнитных бурь – это бури с внезапным началом (*SSC* и *VMSSC*). Причиной *SSC*-бурь являются нестационарные процессы на Солнце: хромосферные вспышки, радиовсплески в различных диапазонах, структура и направление крупномасштабных магнитных полей, эруптивные протуберанцы, внезапно распадающиеся (исчезающие) волокна (*DSF* – *disappearing system of filaments*), выбросы корональной массы (*CME* – *coronal mass ejection*). Во время вспышки над вспышечной областью образуется магнитогидродинамическая ударная волна и плазменное облако с плотностями и скоростями больше, чем в спокойном солнечном ветре (потоки частиц с энергиями в несколько десятков кэВ), которые приходят к геомагнитосфере через 20–50 часов после вспышки. Геоэффективность вспышки оценивается по интенсивности рентгеновского и радиоизлучения, ее длительности, наличию или отсутствию радиовсплесков II и/или IV спектрального типа. В Гелиогеофизической службе прогнозируются магнитные бури с *SSC*:

- От вспышки ожидается умеренная или сильная *SSC*-буря, если
 - длительность вспышки более (30–40) мин;
 - интенсивность излучения в рентгеновском диапазоне более класса M5;
 - интенсивность в радиодиапазоне на длине волны 10,7 см – $F_{10,7}$ более 500 s.f.u. = 500×10^{-22} Вт/(м² Гц);
 - имеются радиовсплески II и/или IV спектрального типа.

Если вспышка с IV спектральным типом, то ожидается, что магнитная буря начнется через сутки-двое, если со II спектральным типом, то через двое-трое суток.

- При более низких параметрах вспышки прогнозируется буря слабой интенсивности и с меньшей вероятностью.

Предвестниками вероятности возмущенности геомагнитного поля могут быть следующие условия:

1. **Диагноз:** на диске Солнца в ДД сутки в *WS* (юго-западном) квадранте на геоэффективных долготах наблюдается корональная дыра. На предыдущем обороте Солнца от нее было возмущение геомагнитного поля с индексом *ApMos*, равным 25.

Прогноз: ожидается, что в ДД и ДД+1 сутки геомагнитное поле будет слабо возмущенное.

2. **Диагноз:** на диске Солнца в 12 UTC ДД–1 сутки произошла вспышка 2 В/М6 с всплеском в рентгеновском диапазоне интенсивностью *F*, равной

$$600 \text{ s.f.u.} = 600 \times 10^{-22} \text{ Вт/(м}^2 \text{ Гц)}$$

и радиовсплеском II спектрального типа.

Прогноз: ожидается *SSC*-возмущение в геомагнитном поле умеренной интенсивности в ДД+1 сутки и слабой интенсивности в ДД+2 сутки.

Прогноз состояния геомагнитного поля содержит два параметра: интенсивность возмущенности геомагнитного поля (дается по шестибалльной шкале: баллы от 0 до 5) и вероятность возмущения. Оценка состояния (интенсивности) геомагнитного поля производится согласно данным, приведенным в табл. 6.

Таблица 6

Оценка состояния (интенсивности) геомагнитного поля

Балл	<i>ApMos</i> (в 2 нТ)	Состояние геомагнитного поля
0	0–7	Очень спокойное
1	8–14	Спокойное
2	15–19	Неустойчивое
3	20–29	Слабо возмущенное
4	30–49	Умеренно возмущенное
5	Более 49	Сильно возмущенное

Оценка вероятности возмущения:

- возможно состояние геомагнитного поля указанного балла (степень вероятности до 30 %);
- ожидается состояние геомагнитного поля указанного балла (степень вероятности более 30 %).

В Гелиогеофизической службе прогнозируют вероятностные степени возмущенности геомагнитного поля следующего типа (табл. 7).

Прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли носит вероятностный характер и сопровождается терминами: «возможны» или «ожидаются».

Прогноз может быть:

- правильным: совпадение с диагнозом балл в балл;

- неправильным: отличие от диагноза более чем на балл;
- частично правильным с мерой 1/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «возможны» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «ожидаются»;
- частично правильным с мерой 2/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «ожидаются» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «возможны».

Таблица 7

Степени возмущенности геомагнитного поля

Обозначение прогноза	Степень возмущенности магнитного поля
010	Возможно спокойное
011	Возможно спокойное с отдельными периодами неустойчивости
110	Ожидается спокойное
111	Ожидается спокойное с отдельными периодами неустойчивости
020	Возможно неустойчивое
021	Возможно неустойчивое с отдельными (слабо) возмущенными периодами
120	Ожидается неустойчивое
121	Ожидается неустойчивое с отдельными (слабо) возмущенными периодами
030	Возможно слабо возмущенное
031	Возможно слабо возмущенное (с отдельными умеренно возмущенными периодами)
130	Ожидается слабо возмущенное
131	Ожидается слабо возмущенное (с отдельными умеренно возмущенными периодами)
040	Возможно умеренно возмущенное
041	Возможно умеренно возмущенное (с отдельными сильно возмущенными периодами)
140	Ожидается умеренно возмущенное
141	Ожидается умеренно возмущенное (с отдельными сильно возмущенными периодами)
050	Возможно сильно возмущенное
051	Возможно сильно возмущенное (с отдельными очень сильно возмущенными периодами)
150	Ожидается сильно возмущенное
151	Ожидается сильно возмущенное (с отдельными очень сильно возмущенными периодами)

Прогноз состояния ионосферы Земли

Прогноз состояния ионосферы Земли осуществляется для каждого региона по двум показателям: прогноз относительных отклонений критической частоты слоя $F2$ и прогноз спорадического слоя. Ионосфера подвержена регулярным циклическим, сезонным и суточным вариациям. Кроме того, она испытывает нерегулярные колебания от часа к часу и ото дня ко дню как в спокойных, так и в возмущенных условиях. Вариации ионосферы во время возмущений в большинстве случаев связаны с электромагнитными и корпускулярными излучениями из активных областей на Солнце. Изменчивость области $F2$ при спокойных и слабо возмущенных условиях в значительной мере определяется изменением межпланетного магнитного поля (ММП).

Прогноз состояния ионосферы Земли на основе отклонений суточного хода критических частот слоя $F2 - foF2$ на ионосферных наблюдательных пунктах измеряется в МГц. Прогноз состояния ионосферы Земли осуществляется для каждого региона на основе отклонений суточного хода критических частот слоя $F2$ от медианных значений по семибалльной шкале. Одной из основных характеристик ионосферной возмущенности является величина отклонения критической частоты $foF2$ от медианных или спокойных значений. Для каждого часа используются медианные значения за месяц или декаду. Для исключения сезонных изменений $foF2$ принято использовать скользящую медиану. Отрицательные ионосферные возмущения (понижение $foF2$ относительно медианы) связаны со значительными магнитными возмущениями. Положительные ионосферные возмущения могут наблюдаться и в период очень спокойного магнитного поля или в течение нескольких часов перед большими отрицательными отклонениями (двухфазовое возмущение). Для краткосрочного прогнозирования в Гелиогеофизической службе используется декадная медиана. Она рассчитывается каждые пять дней, т. е. является скользящей. Медиана рассчитывается для каждой станции, данные с которой поступают в Гелиогеофизическую службу. С использованием медианы в течение последующих пяти дней, ежечасно для каждой ионосферной станции рассчитывается величина:

$$\Delta foF2 = (foF2 - (foF2)_{мед}) / (foF2)_{мед} \times 100\%, \quad (3)$$

где $\Delta foF2$ (%) – относительное отклонение измеренных значений критической частоты от медианы, выражаемое в процентах; $foF2$ (МГц) – критическая частота слоя $F2$ ионосферы; $(foF2)_{мед}$ (МГц) – декадная медиана критической частоты слоя $F2$ ионосферы.

Случайные флуктуации $foF2$, наблюдаемые в спокойные дни, ограничены величинами $\pm 20\%$ (они имеют распределение, близкое к Гауссову распределению случайных величин). Состояние ионосферы, при котором $\Delta foF2$ не более по величине 20% , считается спокойным.

В зависимости от величины $\pm \Delta foF2$ состояние ионосферы за каждый час оценивается определенным баллом (I индекс – часовой индекс ионосферной возмущенности). I индексы и соответствующие им интервалы $\Delta foF2$ приведены в табл. 8.

Таблица 8

Часовые индексы ионосферной возмущенности и соответствующие им интервалы $\Delta foF2$

$\pm \Delta foF2$	0-10	11-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	>60
I индекс	0	0,5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4,5	5
Отрицательное/ положительное	Спокойное		Слабое	Умеренное		Сильное					

Суточные и полусуточные характеристики состояния ионосферы определяются по часовым характеристикам. Для этого отдельно находятся суммы положительных и отрицательных I индексов за сутки (или половину суток). Выбирается наибольший из них, делится на 24 часа (или 12 часов) и получается суточный (или полусуточный) индекс, который характеризует одно из состояний ионосферы: спокойное, слабое, умеренное или сильное возмущение. Соответствие суточных (полусуточных) характеристик состояния ионосферы и рассчитанных баллов приведено в последней строке табл. 8. Прогноз состояния ионосферы Земли осуществляется для каждого региона на основе отклонений суточного хода критических частот слоя $F2$ от медианных значений по семибалльной шкале (табл. 9). Для характеристики спорадического слоя E_s используется семибалльная шкала, приведенная в табл. 10. Для характеристики поглощения используется четырехбалльная шкала, приведенная в табл. 11.

Таблица 9

Характеристика ионосферного возмущения

Среднее значение $\Delta foF2$ за рассматриваемый период	Балл	Характеристика ионосферного возмущения
$\leq \pm 20$	0	Спокойно
От -21 до -25	1	Отрицательное слабое
От -26 до -35	2	Отрицательное умеренное
Более -35	3	Отрицательное сильное
От +21 до +25	4	Положительное слабое
От +26 до +35	5	Положительное умеренное
Более +35	6	Положительное сильное

Характеристика спорадического слоя Es

Балл	Характеристика спорадического слоя Es
0	$foFs$ меньше нижнего предела ионосферной станции в течение суток
1	$foFs < 3$ МГц менее 6 часов в сутки
2	$foFs < 3$ МГц наблюдается в течение 6–12 часов непрерывно или с небольшими перерывами
3	$foFs < 3$ МГц наблюдается больше 12 часов непрерывно или с небольшими перерывами
4	$foFs \geq 3$ МГц менее 6 часов в сутки
5	$foFs \geq 3$ МГц наблюдается в течение 6–12 часов непрерывно или с небольшими перерывами
6	$foFs > 3$ МГц наблюдается больше 12 часов непрерывно или с небольшими перерывами

Таблица 11

Характеристика поглощения

Балл	Характеристика поглощения
0	Нет аномального поглощения в течение суток
1	Полное поглощение наблюдается менее 6 часов в сутки или повышенное поглощение наблюдается более 3 часов в сутки
2	Полное поглощение наблюдается в течение 6–12 часов в сутки
3	Полное поглощение наблюдается более 12 часов в сутки

Состояние ионосферы в высоких широтах не может быть охарактеризовано только величиной $\Delta foF2$, так как во время возмущений, в ее нижних слоях, происходят значительные изменения: увеличивается ионизация нижней ионосферы, что приводит к повышенному поглощению, достигающему иногда до полного, появляются спорадические образования и т. п. В полярной шапке часто и во время спокойных периодов появляется диффузность.

Для характеристики диффузности используется четырехбалльная шкала, приведенная в табл. 12.

Область F считают возмущенной, когда $\Delta foF2$ превышают 15–20 % более 5 часов.

Прогнозы состояния ионосферы выпускаются ежедневно два раза в сутки с заблаговременностью 12 и 24 часа по регионам: авроральная зона, средние широты европейской части России, запад, средние широты восточной части России, юг. Прогнозы диффузности и поглощения выпускаются только по авроральной зоне. Прогнозы могут быть

правильными либо неправильными. Прогноз считается правильным, если прогнозируемый с соответствующей заблаговременностью балл совпал в балл или в «балл ± балл» с реально наблюдавшимся и неправильным, если отличие более, чем на балл.

Таблица 12

Характеристика диффузности

Балл	Характеристика диффузности
0	Нет диффузности в течение суток
1	Диффузность наблюдается менее 6 часов в сутки
2	Диффузность наблюдается в течение 6–12 часов в сутки
3	Диффузность наблюдается более 12 часов в сутки

Прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов

Наиболее опасные в радиационном отношении ситуации в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов, в отсутствие искусственных источников проникающих излучений, связаны с солнечным космическим излучением. Особо опасные ситуации наблюдаются в случаях, когда события солнечных космических излучений проходят на фоне интенсивных геомагнитных бурь с внезапным началом *SSC*, причиной которых являются геоэффективные межпланетные ударные волны, инициируемые магнитодинамическими движениями вспышечной плазмы. Прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов осуществляется в главном гелиогеофизическом центре ФГБУ «ИПГ» по аналого-вероятностному методу. В качестве исходных данных для прогноза используются не только данные наблюдений с российских космических аппаратов серии «Метеор», «Электро» и «Арктика» и американских космических аппаратов «GOES», «ACE», «SOHO», но и результаты краткосрочных прогнозов вспышечной активности и возмущенности геомагнитного поля, а также результаты прогноза развития событий солнечных космических лучей (СКЛ) и оценки радиационных характеристик геоэффективных солнечных вспышек.

Прогноз степени возмущенности радиационной обстановки содержит два параметра: интенсивность возмущения радиационной обстановки (РО) и вероятность возмущения. Оценка состояния радиационной обстановки дается по четырехбалльной шкале: баллы от 0 до 3 (табл. 13).

Оценка состояния радиационной обстановки

Балл	Состояние радиационной обстановки
0	Невозмущенная (спокойная)
1	Слабо возмущенная РО
2	Умеренно возмущенная РО
3	Сильно возмущенная РО

Вероятность возмущения характеризуется:

- возможно состояние радиационной обстановки указанного балла (степень вероятности до 30 %);
- ожидается состояние радиационной обстановки указанного балла (степень вероятности более 30 %).

Предвестниками вероятности возмущенности радиационной обстановки могут быть следующие условия:

• Радиационная обстановка ожидается **невозмущенная**:

- на диске Солнца наблюдаются группы пятен небольшой площади;
- группы пятен имеют простую магнитную конфигурацию альфа, бета;
- группы пятен имеют Цюрихский класс – *A, B, C, D*;
- вспышечная активность от низкой до умеренной (рентгеновский класс < M5);
- потоки протонов на уровне фона или невысокой интенсивности СКЛ J менее 2 частиц/(см²сек·ср) при $ApMos$, равном 20 и более, или J менее 6 частиц/(см²сек·ср) при $ApMos$ менее 20 в стадии убывания. Здесь и далее ср – стерадиан.

• Радиационная обстановка ожидается **слабо возмущенная**:

- наблюдаются небольшие медленно возрастающие потоки протонов СКЛ от вспышки в группе пятен в восточной части диска Солнца и в начале прогнозируемого периода интенсивность потоков протонов с энергией E более 30 МэВ находится вблизи 2–4 частиц/(см²сек·ср) при возмущенном магнитном поле ($ApMos$ не менее 20);
- либо наблюдаются медленно убывающие потоки СКЛ в начале прогнозируемого периода с энергией E более 30 МэВ, интенсивностью J более 16 частиц/(см²сек·ср);
- при геомагнитном поле $ApMos$ менее 20 наблюдаются медленно возрастающие потоки с энергией E более 30 МэВ с начальной интенсивностью J более 6–8 частиц/(см²сек·ср) или медленно убывающие потоки СКЛ с начальной интенсивностью J не более 50 частиц/(см²сек·ср).

• Радиационная обстановка ожидается *умеренно возмущенная*:

- на диске Солнца наблюдается группа пятен с площадью S более 300–500 МДП;
- группа пятен имеет сложную магнитную конфигурацию: гамма, дельта, гамма-дельта;
- группа пятен имеет Цюрихский класс – E, F . В такой группе возможны протонные вспышки (группа является протонно-опасной).

Если протонно-опасная группа пятен находится в восточной части диска Солнца, то радиационная обстановка, возмущенная, возможно, в ДД+1 сутки, если же в западной части диска, то в ДД сутки.

• Радиационная обстановка ожидается *сильно возмущенная*:

- на диске Солнца в группе пятен с площадью S более 500–1000 МДП, Цюрихского класса E, F произошла вспышка с параметрами:
 - интенсивность в рентгене более $M5$,
 - длительность более 40 минут;
- вспышка сопровождалась значительными событиями в радиодиапазонах на частотах 2800 МГц и 245 МГц интенсивностью более 1000 част/(см²сек).
- зарегистрированы радиовсплески II и/или IV спектрального типа.

В этих случаях ожидается вторжение протонов СКЛ умеренной или высокой интенсивности.

Если вспышка произошла в группе пятен, находящейся в W-части диска, то возмущение радиационной обстановки ожидается в ДД сутки, возможно возмущение радиационной обстановки через 1 час.

Если вспышка произошла в группе пятен, находящейся в E-части диска, то возмущение радиационной обстановки ожидается в ДД+1 сутки.

При вторжении СКЛ в околоземное космическое пространство в ионосфере наблюдается повышение минимальной частоты f_{min} с 1 до 5 МГц, поглощение по арктическим станциям Кренкель, Амдерма, Диксон, Тикси и др.

По результатам окончательного прогноза и для оценки состояния радиационной обстановки составляется матрица сопряженности, в которой весь диапазон доз облучения (Д) разбит на 4 уровня (табл. 14).

Прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов носит вероятностный характер и сопровождается терминами: «возможны» или «ожидаются».

Оценка состояния радиационной обстановки и доз облучения

Параметр	Состояние радиационной обстановки			
	Невозмущенная	Слабо возмущенная	Умеренно возмущенная	Сильно возмущенная
Суточная поглощенная доза ионизирующего излучения (Д), мкГр	$D \leq 125$	$125 < D \leq 1000$	$1000 < D \leq 10000$;	$D > 10000$
Балл	0	1	2	3
Магнитное поле: невозмущенное, $ArMos$ менее 20	Менее 11,94 частиц/ (см ² сек·ср)	11,94–95,54 частиц/ (см ² сек·ср)	95,54–955,41 частиц/ (см ² сек·ср)	Более 955,41 частиц/ (см ² сек·ср)
Магнитное поле: возмущенное, $ArMos$ не менее 20	Менее 3,68 частиц/ (см ² сек·ср)	3,68–31,84 частиц/ (см ² сек·ср)	31,84–318,4 частиц/ (см ² сек·ср)	более 318,4 частиц/ (см ² сек·ср)

Прогноз может быть:

- правильным: совпадение с диагнозом балл в балл;
- неправильным: отличие от диагноза более чем на балл;
- частично правильным с мерой 1/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «возможны» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «ожидаются»;
- частично правильным с мерой 2/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «ожидаются» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «возможны».

186

Алгоритм расчета показателя оправдываемости прогнозов

Для каждого из показателей космической погоды (i) в зависимости от типа заблаговременности прогноза рассчитывается свой уровень оправдываемости (j):

$$A_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{N_{i,j}}, \quad (4)$$

где $M_{i,j}$ – количество оправдавшихся прогнозов; $N_{i,j}$ – количество выпущенных прогнозов.

На следующем этапе рассчитывается уровень оправдываемости прогнозов каждого вида наблюдений \bar{A}_i усреднением уровней оправдываемости прогнозов одного вида наблюдений по различным заблаговременностям:

$$\bar{A}_i = \sum_{j=1}^3 a_{i,j} A_{i,j}, \quad (5)$$

где $a_{i,j} = 1/n$ – весовой коэффициент; $n = 3$ – количество временных типов выпущенных прогнозов (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные); $j = 1, 2, 3$ тип прогноза; $i = 1, 2, 3, 4, 5$ – вид наблюдений за гелиогеофизическими характеристиками.

Показатель «Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды» рассчитывается как среднее арифметическое между оправдываемостями всех видов прогнозов:

$$A = \sum_i a_i \bar{A}_i, \quad (6)$$

где $a_i = 1/m$ – (безразмерный параметр) весовой коэффициент (m рассчитывается по количеству прогнозируемых гелиогеофизических характеристик, в общем случае $m = 5$); \bar{A}_i – уровень оправдываемости прогнозов каждого вида наблюдений, $i = 1, 2, 3, 4, 5$.

Апробация методики и верификация прогнозов

Верификация результатов проводилась по всем видам прогнозов 5 характеристик космической погоды разной заблаговременности за 2021 год (табл. 15, 16).

Таблица 15

Уровни оправдываемости прогнозов разной заблаговременности и разных видов наблюдений за 2021 год

A_{ij}	$j = 1$ (краткосрочный прогноз)	$j = 2$ (среднесрочный прогноз)	$j = 3$ (долгосрочный прогноз)
$i = 1$, прогноз интегрального индекса солнечной активности R	98,26	98,63	98,36
$i = 2$, прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла	92,24	92,19	93,97
$i = 3$, прогноз степени возмущения магнитного поля Земли	98,26	93,01	93,29
$i = 4$, прогноз состояния ионосферы	87,47	91,34	97,53
$i = 5$, прогноз радиационной обстановки	99,36	99,45	99,45

Таблица 16

Уровни оправдываемости прогнозов каждого вида наблюдений за 2021 год

Прогноз	$A_i, \%$
$i = 1$, прогноз интегрального индекса солнечной активности R	98,26
$i = 2$, прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла	98,42
$i = 3$, прогноз степени возмущения магнитного поля Земли	94,86
$i = 4$, прогноз состояния ионосферы	92,12
$i = 5$, прогноз радиационной обстановки	99,42

Итоговое значение показателя успешности гелиогеофизических прогнозов за 2021 год:
 $A = 95,52 \%$.

Выводы

Полученный в период верификации результат согласуется с показателем оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды, определяемым по методике, с целью достижения показателя не ниже 92 %.

Данная методика «Расчет показателя "Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %"» была рассмотрена 27.09.2022 ЦМКП Росгидромета, рекомендована к использованию для контроля уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды в деятельности ФГБУ «ИПГ» и региональных центров мониторинга геофизической обстановки взамен используемой ранее «Временная инструкция по оценке оправдываемости ионосферных и магнитных прогнозов» от 1976 года, утверждена приказом Росгидромета №674 от 03.11.2022 года и используется на практике.

Список литературы

1. РД 52.04.567-2003. Положение о Государственной наблюдательной сети. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2003.
2. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. – 2014. – №3 (6). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kosmicheskaya-pogoda-i-riski-kosmicheskoy-deyatelnosti>.
3. Минлигареев В.Т., Алексеева А.В., Качановский Ю.М., Репин А.Ю., Хотенко Е.Н. Картографическое обеспечение магнитометрических навигационных систем робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – №1 (203). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kartograficheskoe-obespechenie-magnitometricheskih-navigatsionnyh-sistem-robototekhnicheskikh-kompleksov>.