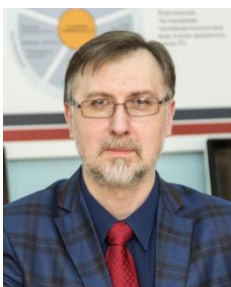


УДК 621.314.21:51:550.385.4

## АНАЛИЗ РИСКОВ АВАРИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ



**А.Г. Давыдовский**

*Доцент кафедры инженерной психологии  
и эргономики факультета компьютерного  
проектирования БГУИР,  
кандидат биологических наук, доцент*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика  
Беларусь*

*E-mail: agd2011@list.ru*

### **А.Г. Давыдовский**

*Доцент кафедры инженерной психологии и эргономики факультета компьютерного проектирования БГУИР, кандидат биологических наук, доцент. Специальность «Биология». Окончил докторантуру БГУИР по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации». Проводит научные исследования в области социальной информатики, математического моделирования биологических и биосоциальных систем, методологии превентивного управления рисками в социотехнических и инновационных производственных системах. Член ряда международных научных обществ. Автор учебных программ и пособий для студентов и магистрантов.*

**Аннотация.** Предложен подход многофакторного анализа рисков аварий в системах электроснабжения в условиях воздействия факторов космической погоды, таких как солнечная активность и геомагнитные бури. Разработаны и практически апробированы многофакторные математические модели для мониторинга, анализа и прогнозирования рисков возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации систем электроснабжения в условиях флуктуаций факторов космической погоды.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, системы электроснабжения, риски аварий, солнечная активность, геомагнитные бури

**Введение.** Анализ системных аварий в электроэнергетике на рубеже XX–XXI веков в различных регионах мира свидетельствует о важной роли технических, погодно-климатических, социально-экономических, геофизических и космофизических факторов, а также ошибок диспетчерского персонала в формировании рисков аварийных ситуаций в системах электроснабжения в условиях флуктуации факторов космической погоды, таких как солнечная активность и геомагнитные бури [1]. До сих пор острые дискуссии вызывает проблема влияния солнечной активности на возникновение несчастных случаев, травматизма на транспорте и в промышленности производстве, на которую впервые указал в 1928 году А.Л. Чижевский [2]. В настоящее время мало разработаны математические модели для мониторинга и прогнозирования рисков развития аварий в системах энергоснабжения [3] под влиянием факторов космической погоды.

*Цель работы* – обоснование математических моделей анализа рисков аварийности

объектов энергетических инфраструктур и электроснабжения под влиянием факторов космической погоды.

*Логистическая модель.* В протяженных и сложно организованных электроэнергетических системах происходят десятки тысяч возмущений в год, подавляющая часть которых ликвидируется средствами релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА) [1]. Процессы формирования и развития наиболее сложных из таких аварий могут быть аппроксимированы различными социотехническими моделями, одной из которых является многофакторная логистическая модель [3, 4]. Причем к важнейшим факторам относятся: интенсивность отказов на основных электростанциях ( $A_1$ ); степень износа оборудования электростанций ( $A_2$ ); интенсивность отказов из-за старения оборудования электростанций ( $A_3$ ); степень износа трансформаторов ( $A_4$ ); интенсивность отказов на подстанциях ( $A_5$ ); интенсивность неисправностей выключателей ( $A_6$ ); интенсивность отказов устройств РЗ и ПА ( $A_7$ ); степень удельной повреждаемости линий электропередачи (ЛЭП) ( $A_8$ ); интенсивность отказов из-за ошибочных действий технического и оперативно-диспетчерского персонала ( $A_9$ ); среднее время отыскания и устранения повреждений ( $A_{10}$ ); объем капитального ремонта ( $A_{11}$ ); количество персонала электрических сетей ( $A_{12}$ ); объем импорта электроэнергии ( $A_{13}$ ); интенсивность локальных аварий ( $A_{14}$ ); объем электропотребления ( $A_{15}$ ); максимальная нагрузка энергосистемы ( $A_{16}$ ); установленная мощность энергосистемы ( $A_{17}$ ).

Влияние предложенных сетевых параметров на надежность и безопасность системы энергоснабжения (СЭС) можно описать моделью логистической регрессии:

$$P_{\text{СЭС}}(\Delta t) = \frac{1}{1 + K \exp[-(a + \sum_{i=1}^n b_i \cdot A_i)]}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – это ранговые коэффициенты значимости, а  $A_i$  – независимые значения критериальных характеристик параметров состояния системы энергоснабжения, а  $K$  – характеристический нормировочный коэффициент.

С помощью критериев основных групп анализа рисков аварийности энергосистемы может быть охарактеризовано функциональное состояние объектов системы энергоснабжения в целом или ее отдельного сегмента в течение заданного периода времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ ; ( $t_2 > t_1$ ). При этом вероятность снижения надежности функционирования системы энергоснабжения в течение периода времени  $\Delta t$  ( $P_{\text{СЭС}}(\Delta t)$ ) может быть охарактеризована на основе векторной модели состояния энергосистемы в  $n$ -мерном пространстве характеристик:

$$P_{\text{СЭС}}(\Delta t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_{i(t_1)} - A_{i(\text{optim})}) \cdot (A_{i(t_2)} - A_{i(\text{optim})})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_{i(t_1)} - A_{i(\text{optim})})^2} \cdot \sqrt{(A_{i(t_2)} - A_{i(\text{optim})})}}, \quad (2)$$

где  $A_{i(t_1)}$ ,  $A_{i(t_2)}$  и  $A_{i(\text{optim})}$  – значения  $A_i$ -параметра в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , а также оптимальное значение.

*Модель функции желательности Харрингтона.* В многомерном пространстве состояний объектов системы энергоснабжения могут быть реализованы различные сценарии отказов, приводящие к разнообразным конечным аварийным состояниям. Для оценки вероятности реализации каждого риска были предложены вероятностные категории развития риска аварийных инцидентов на объектах систем энергоснабжения (в баллах): «А» – «возможно с высокой вероятностью» (5), «В» – «возможно» (4), «С» – «скорее возможно, чем маловероятно» (3), «D» – «маловероятно» (2), «Е» – «скорее маловероятно, чем неопределенно» (1), «F» – «неопределенно» (0), «G» – «скорее неопределенно, чем невозможно» (-1), «H» – «невозможно» (-2).

Чтобы рассчитать общий интегральный риск снижения надежности энергетических систем, необходимо вычислить индекс риска системы, зависящий от совокупного влияния внешних угроз и внутренних уязвимостей:

$$R_{\text{СЭС}} = \exp(-\exp(-H\{P[R_i]\} \cdot U\{U[R_1]\})), \quad (3)$$

где  $H\{P[R_1]; P[R_2]; \dots, P[R_m]\}$  – вектор угроз, компонентами которого являются относительные вероятности реализации рисков  $R_1, R_2, \dots, R_m$ , т.е. вероятности того, что угрозы реализуются с определенной степенью тяжести (в баллах), а вектор ущербов  $U$  содержит величины ущерба для каждого  $m$ -го риска (в баллах)  $U = \{U[R_1]; U[R_2]; \dots, P[R_m]\}$ .

Для оценки риска аварии в энергосистеме целесообразно использовать модифицированную шкалу Харрингтона по пяти градациям: «низкий» (диапазон от 0,00 до 0,2), «допустимый» (диапазон от 0,2 до 0,37), «повышенный» (диапазон от 0,37 до 0,5), «высокий» (диапазон от 0,5 до 0,75) и «критический» (диапазон от 0,75 до 1,00). Причем точки 0,37 и 0,63 на шкале Харрингтона являются точками перехода состояния объекта системы энергообеспечения, соответственно, из зоны допустимого в зону среднего риска развития аварии, а также из зоны среднего в зону высокого риска развития аварии в энергосистеме. Подобный подход позволяет количественно оценить тенденцию изменения риска возникновения аварии в энергосистеме и определить негативно влияющие на нее факторы [5, 6].

*Модель комплексных рисков.* Системный анализ и прогнозирование комплексных рисков развития аварийных ситуаций в энергосистемах требует оценки рейтинга проекта энергосистемы, состояния ее оборудования, уровня технической диагностики, устойчивости, управляемости в аварийных ситуациях (аварийной управляемости), основных свойств энергосистемы, состояния технического и оперативно-диспетчерского персонала.

- 1) Рейтинг проекта энергосистемы. На основе использования принципов системного подхода при проектировании предложен критерий рейтинга проекта ( $K_{\text{РП}}$ ) энергосистемы:

$$K_{\text{РП}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{i(\text{ВППЭ})} \cdot r_{i(\text{ПЭ})}}{\sum_{i=1}^n C_{i(\text{ВП})} \cdot r_{i(\text{Э})}}, \quad (4)$$

где  $C_{i(\text{ВППЭ})}$  –  $i$ -й проект энергосистемы предполагаемой стоимости  $C_i$ , получивший положительную экспертную оценку (ВППЭ),  $r_{i(\text{ПЭ})}$  – рейтинг положительной экспертной оценки  $i$ -го проекта объекта системы энергообеспечения среди всех экспертных оценок различных вариантов проекта энергосистемы стоимостью  $C_i$ , прошедших экспертизу с рейтингом  $r_{i(\text{Э})}$ .

- 2) Состояние оборудования включает оценку степени износа оборудования (СИО) и коэффициент готовности оборудования (КГО):

$$\text{СИО}_{\text{СЭС}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_{i(\text{Д})}}{t_{i(\text{Н})}}, \quad (5)$$

где:  $t_{i(\text{Д})}$  – действительный срок службы, а  $t_{i(\text{Н})}$  – нормативный срок службы  $i$ -го элемента системы энергообеспечения;

$$\text{КГО}_{\text{СЭС}} = \frac{\sum_{k=1}^g t_k \cdot \sum_{q=1}^m z_q}{\sum_{i=1}^n t_i \sum_{j=1}^p n_j + \sum_{k=1}^g t_k \cdot \sum_{j=1}^m z_q}, \quad (6)$$

где:  $\sum_{i=1}^n t_i \cdot \sum_{q=1}^p n_j$  – сумма произведений продолжительности  $t_i$  –го периода времени нормального и устойчивого функционирования  $j$ –го элемента системы энергоснабжения на общую сумму всех элементов ( $\sum_{j=1}^p n_j$ ), т.е. – общее время нормального функционирования энергосистемы;

$\sum_{k=1}^g t_k \cdot \sum_{q=1}^m z_q$  – сумма произведений продолжительности  $k$  –го периода простоя вследствие отказа (поломки) и/или восстановления (ремонта)  $q$  –го элемента системы энергоснабжения на общую сумму таких элементов ( $\sum_{q=1}^m z_q$ ), т.е. – общее время простоя системы энергоснабжения вследствие отказов и поломок.

3) Уровень технической диагностики (УТД) системы энергоснабжения:

$$\text{УТД}_{\text{СЭС}} = \frac{\text{СТД}_{\text{Н}}}{\text{СТД}_{\text{Т}}}, \quad (7)$$

где  $\text{СТД}_{\text{Н}}$  и  $\text{СТД}_{\text{Т}}$  – количество имеющихся в наличии и требуемых средств технической диагностики (СТД) различных параметров состояния энергосистемы.

4) Устойчивость системы энергоснабжения к флуктуациям космической погоды характеризуется относительным количеством линий, работающих вблизи нормативных значений по условиям устойчивости к нагреву, максимальным количеством отключаемых элементов при сохранении динамической устойчивости объектов энергосистемы, продолжительности ( $T$ ) пребывания перетока (тока) в зоне работы с нормируемыми значениями (РНЗ) по отношению ко времени всей суммарной работы линии (СРЛ):

$$T = \frac{t_{\text{РНЗ}}}{t_{\text{СРЛ}}}, \quad (8)$$

Кроме того, в социотехнической модели комплексных рисков аварийности объектов системы энергоснабжения важное значение имеет оценка относительного количества слабых связей между компонентами инфраструктуры энергосистемы:

$$K_{\text{СЭС}} = \frac{c}{m}, \quad (9)$$

где  $m$  – количество всех линий электропередач в системе энергоснабжения;  $c$  – число аварийных и наиболее подверженных внешним угрозам ЛЭП.

5) Аварийная управляемость системы характеризуется оснащенностью ее инфраструктурных компонентов аварийным управлением (АУ) турбин, генераторов, ЛЭП:

$$\text{АУ}_{\text{СЭС}} = \frac{N_{\text{ИАУ}}}{N_{\text{НАУ}}}, \quad (10)$$

где  $N_{\text{ИАУ}}$  и  $N_{\text{НАУ}}$  – количество всех используемых (ИАУ) и необходимых (НАУ) инфраструктурных компонентов системы энергоснабжения с элементами АУ.

6) Характеристики эксплуатационной надежности энергосистемы включают:

– текущий ремонт (ТР):  $\text{ТР}_{\text{СЭС}} = \frac{\text{ТР}_{\text{В}}}{\text{ТР}_{\text{П}}}$ , где  $\text{ТР}_{\text{В}}$  и  $\text{ТР}_{\text{П}}$  – количество выполненных и планируемых текущих ремонтов, соответственно;

– капитальный ремонт (КР):  $\text{КР}_{\text{СЭС}} = \frac{\text{КР}_{\text{В}}}{\text{КР}_{\text{П}}}$ , где  $\text{КР}_{\text{В}}$  и  $\text{КР}_{\text{П}}$  – количество выполненных и планируемых капитальных ремонтов, соответственно;

– уровень финансово-экономического обеспечения (ФЭО):

$\text{ФЭО}_{\text{СЭС}} = \frac{\text{ФЭО}_{\text{объект СЭС}}}{\text{ФЭО}_{\text{ЭО}}}$ , где  $\text{ФЭО}_{\text{объект СЭС}}$  и  $\text{ФЭО}_{\text{ЭО}}$  – показатели ФЭО объекта системы энергоснабжения и в энергетической отрасли в целом, соответственно.

7) Основные свойства энергосистемы:

- число локальных (местных) сбоев, отказов и аварий в системе энергоснабжения;
- сбалансированность режимов экспорта и импорта электроэнергии;
- объем инвестиций на обеспечение надежности и безопасности функционирования энергосистемы;
- кратность резервирования инфраструктурных компонентов энергосистемы;
- коэффициент неравномерности нагрузки (НН) системы энергоснабжения:

$$K_{\text{НН(СЭС)}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot W_{\text{max}}}{\sum_{j=1}^m t_j \cdot W_{\text{min}}}, \quad (11)$$

где  $\sum_{i=1}^n t_i \cdot W_{\text{max}}$  – сумма произведений  $i$ -х периодов времени, когда уровень активной мощности в системе достигал максимальной величины;

$\sum_{j=1}^m t_j \cdot W_{\text{min}}$  – сумма произведений  $j$ -х периодов времени с минимальным уровнем активной мощности в энергосистеме.

8) Состояние технического и оперативно-диспетчерского персонала энергосистемы можно оценить с помощью комплекса интегральных критериев профессиональной компетентности и профессиональной готовности. Исследование этих критериев требует использования батареи специальных методик, метода анализа иерархий [6]. Важнейшим показателем надежности персонала энергосистемы является количество отказов и аварий в энергосистеме, случившихся из-за ошибочных действий персонала (ОДП):

$$K_{\text{ОДП(СЭС)}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot n_i \cdot C_i}{\sum_{j=1}^m t_j \cdot m_j \cdot C_j}, \quad (12)$$

где  $\sum_{i=1}^n t_i \cdot n_i \cdot C_i$  – суммарный показатель потерь времени ( $t_i$ ) и материального ущерба ( $C_i$ ) на  $n$  количестве компонентов (агрегатов, сетей, блоков) вследствие  $i$ -й ошибки оперативного персонала в управлении энергосистемой;  $\sum_{j=1}^m t_j \cdot m_j \cdot C_j$  – суммарный показатель потерь времени ( $t_j$ ) и материального ущерба ( $C_j$ ) на  $m$  количестве компонентов (агрегатов, сетей, блоков) вследствие  $i$ -го отказа (аварии, сбоя) оборудования или ОДП системы энергоснабжения. Параметры математических моделей энергосистемы, предложенные в уравнениях (1) – (11), могут быть нормированы по методике [7].

Для количественной оценки риска развития аварий в системе энергоснабжения целесообразно ввести представление о критерии дискриминанта риска  $D_i$ , который характеризует вклад некоторого  $i$ -го параметра в формирование риска аварийной ситуации в системе энергоснабжения на основе анализа математических моделей. Тогда риск снижения надежности и аварийности системы энергоснабжения можно оценить с помощью дискретной модели, учитывающей надежность функционирования системы энергоснабжения как средневзвешенное квазигеометрическое:

$$R = 1 - \left[ 1 - \prod_k^m \left( 1 - \frac{D_i}{\prod_{i=1}^n D_i^{\lambda_i}} \right)^{\mu_k} \right], \quad \text{причем } 0 \leq R \leq 1, \quad (13)$$

где  $D_i$  – абсолютное числовое значение  $i$ -го параметра состояния объектов энергосистемы;

$\lambda_i$  – средневзвешенный показатель  $i$ -го параметра  $D_i$  в состоянии энергосистемы;

$\mu_k$  – удельно-весовой показатель ранговой значимости  $i$ -го параметра  $D_i$ , получаемой на основе статистической обработки экспертных оценок.

*Влияние солнечной активности на аварийность в системах электроснабжения.* Как свидетельствует опыт эксплуатации энергосистем различного масштаба, в формировании

рисков аварийных ситуаций в системе энергоснабжения существенный вклад вносят геофизические факторы, в частности, геомагнитные бури, обусловленные солнечной активностью и другими факторами космической погоды. В связи с этим предложена модель прогнозирования рисков каскадных аварий в системе энергоснабжения на основе регрессионного анализа комплекса погодно-климатических и природно-геофизических факторов. На величину геоиндуцированных токов в заземленных нейтралях силовых трансформаторов значительное влияние оказывает интенсивность геомагнитного поля Земли, а также конфигурация и протяженность электрической сети с напряжением 110 кВ и выше [7, 8].

Геомагнитные бури являются проявлением усиления кольцевых токов, постоянно существующих в области радиационных поясов Земли и, наряду с факторами солнечной активности, являются одним из важнейших элементов «космической погоды», феномены и закономерности которой рассматриваются и исследуются солнечно-земной физикой и физикой атмосферы и ее верхних слоев, в частности, ионосферы. Геомагнитные бури сопровождаются флуктуациями магнитного поля на поверхности Земли около 1% от величины стационарного геомагнитного поля, составляя примерно  $(30-80) \cdot 10^3$  нТл. Частота появления умеренных и сильных геомагнитных бурь на Земле имеет выраженную корреляцию с 11-летним циклом солнечной активности, составляя 1-2 бури в год вблизи солнечного минимума и достигая 50 бурь в год вблизи солнечного максимума. В годы солнечного максимума человечество около 50% времени года проводит в условиях умеренных и сильных геомагнитных бурь, а среднестатистический человек на протяжении своей 75-летней жизни переживает 2250 геомагнитных бурь и около 15 лет проводит в условиях умеренных и сильных бурь [9, 10].

Геомагнитные бури имеют несимметричный по времени характер развития и средняя фаза нарастания флуктуации геомагнитного поля Земли (главная фаза бури) составляет около 7 часов, а фаза возвращения к исходному состоянию (фаза восстановления) – около 3 суток. Интенсивность геомагнитных бурь обычно характеризуется индексами Dst (англ. Disturbance Storm Time Index) и Kp. С ростом интенсивности бури индекс Dst уменьшается. Так, умеренные бури характеризуются Dst от  $-50$  до  $-100$  нТл, сильные – от  $-100$  до  $-200$  нТл и экстремальные – выше  $-200$  нТл [10].

Существует классификация прогнозов геомагнитной активности в зависимости от времени упреждения: 27-45-суточный, 7-суточный, 2-суточный и 1-часовой прогнозы [11]. 27-45-суточный прогноз опирается на текущие наблюдения Солнца и предсказывает возмущения геомагнитной активности, связанные с рекуррентными – то есть происходящими с периодичностью 27 суток, приблизительно равными периоду обращения Солнца вокруг своей оси – активными процессами на Солнце. 7-суточный прогноз опирается на текущие наблюдения активных областей вблизи восточного лимба Солнца и предсказывает возмущения геомагнитной активности, связанные с перемещением этих активных областей к линии Солнце – Земля (то есть к центральному меридиану) через время, примерно равное четверти периода обращения Солнца. 2-суточный прогноз опирается на текущие наблюдения активных процессов вблизи центрального меридиана Солнца и предсказывает связанные с этими процессами возмущения геомагнитной активности через время, близкое к характерным временам распространения возмущений от Солнца к Земле солнечного ветра (от 1,5 до 5 суток) и солнечных космических лучей (несколько часов). Надежность 2-суточного и 1-часового прогноза составляет, соответственно, около 30-50% и 95%. Остальные прогнозы носят лишь общий информационный характер и имеют ограниченное практическое применение. Сила электромагнитных бурь оценивается по шкале G-индекса, введенной Национальной Океанической и Атмосферной Администрацией США (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) в 1999 г. Данная шкала базируется на значениях Kp-индекса и характеризуется относительной доступностью описания возможных последствий флуктуаций магнитного поля Земли. Наиболее часто используемый Kp-индекс строится на

основании измерений магнитных станций, расположенных на разных географических широтах, что позволяет оценивать влияние геомагнитных бурь и суббурь на энергетические и энерготранспортные системы, расположенные в различных географических поясах и широтах. При этом величина G-индекса характеризует интенсивность геомагнитного шторма по воздействию вариаций магнитного поля Земли на людей, животных, электротехнику, связь, навигацию и т.д. По этой шкале магнитные бури подразделяются на уровни от G1 (слабые бури) до G5 (экстремально сильные бури). G-индекс соответствует Kp минус 4; то есть G1 соответствует Kp=5, G2 – Kp=6, G5– Kp=9 [12].

Геомагнитные бури являются одним из важнейших элементов космической погоды и влияют на многие области деятельности человека, из которых можно выделить нарушения связи, систем навигации космических кораблей, возникновение вихревых индукционных токов в трансформаторах и трубопроводах и даже разрушение энергетических систем.

В этой связи были разработаны и апробированы математические модели, описывающие влияние гелиофизической (солнечной) активности и погодно-климатических факторов на масштаб развития аварийных ситуаций на объектах энергетической и энерготранспортной инфраструктуры.

При построении регрессионных моделей были использованы следующие обозначения:

- масштаб аварийного события – the scale of the event (SE);
- число Вольфа (W) за три предыдущих месяца (W for the previous three months – W3m);
- количество солнечных пятен на момент аварийного инцидента (the number of sunspots – Ns);
- количество солнечных пятен за три или шесть предыдущих месяцев до аварийного инцидента (N over the previous three months – Ns3m; N over the previous six months – Ns6m);
- максимальная температура в регионе расположения объекта системы энергоснабжения в момент (период) инцидента (the maximum temperature – Tmax);
- минимальная температура в регионе расположения объекта энергосистемы в момент (период) инцидента (the minimum temperature – Tmin);
- средняя температура в регионе расположения объекта системы энергоснабжения в момент (период) инцидента (average temperature – Tav);
- скорость ветра в регионе расположения объекта системы энергоснабжения в момент (период) инцидента (the wind speed – WS);
- атмосферные осадки в день (период) инцидента (atmospheric precipitation – AP) в регионе расположения аварийного компонента энергосистемы.

Были отобраны четыре регрессионные модели (14)–(17), описывающие зависимость масштаба аварии от погодно-метеорологических и космофизических факторов:

$$SE=3,584-0,02W6m+0,01674N3m+7,23972(E-05)T+0,098WS-0,0004AP; \quad (14)$$

$$SE=1,629-0,01195W6m+0,0003Ns-0,00048Ns3m+0,0116Ns6m+0,00424T-8,74435(E-05)WS-0,0195AP; \quad (15)$$

$$SE=5,044-0,173W6m-0,043Ns+0,137Ns3m-0,559Tmax+0,851Tmin-1,548Tav+1,562WS+0,0023AP; \quad (16)$$

$$SE=6,156-0,0265W3m-0,0696Ns+0,068Ns6m-0,987Tmax-1,041Tmin+2,0292Tav-0,2921WS+0,0198AP. \quad (17)$$

Необходимо отметить, что вышеназванные множественные регрессионные модели были исследованы на наличие мультиколлинеарности, автокорреляции остатков и гетероскедастичности.

В таблице 1 представлена классификация геомагнитных бурь по G-шкале и индексу геомагнитной активности (Kp), а также характеристика их влияния на природные и техно-сферные объекты.

*Заключение.* Таким образом, предложен подход, обеспечивающий многофакторный анализ рисков аварий в системах электроснабжения. Разработаны математические модели на основе множественной линейной регрессии, характеризующие влияние параметров гелиофизической активности и погодно-климатических факторов на масштаб аварийных ситуаций в системах электроснабжения. Показана значительная степень корреляции ( $R^2 > 0,54$ ) между масштабами аварийных инцидентов в энергосистемах, с одной стороны, а также минимальными, максимальными и среднемесячными показателями температуры воздуха, скорости ветра и уровнем осадков в регионе расположения аварийного объекта энергетической инфраструктуры.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствует единый подход к анализу и оценке влияния геомагнитных бурь, обусловленных флуктуациями солнечной активности, на здоровье и функциональную надежность оперативного производственного персонала, а также надежность и безопасность критически важных производственных инфраструктур.

### *Литература*

- [1]. Воропай, Ж. Ж. Анализ механизмов развития системных аварий в электроэнергетических системах / Ж.Ж. Воропай // Электричество. – 2008. – № 10. – С. 12–24.
- [2]. Чижевский, А. Л. Космический пульс жизни. Земля в объятиях Солнца. Гелиотараксия / А.Л. Чижевский. – М. : Мысль, 1995. – 768 с.
- [3]. Савельев, В.А. Оценка риска снижения энергетической безопасности / В.А. Савельев, В.В. Батаева // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 1–6.
- [4]. Pirjola, R. Geomagnetically induced currents as ground effects of space weather / R. Pirjola // Space Science. – 2013. – P. 27–44.
- [5]. Руденко, Ю. Н. Надежность и безопасность энергетических систем / Ю.Н. Руденко // Энергетика и транспорт. – 1991. – № 6. – С. 44–45.
- [6]. Федин, В. Т. Принятие решений при проектировании развития электроэнергетических систем / В.Т. Федин. – Минск : УП «Технопринт», 2000. – 105 с.
- [7]. Вахнина, В. В. Снижение рисков развития аварий в системах электроснабжения при геомагнитных бурях / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Кузнецов // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 5. – С. 115 – 123.
- [8]. Lakhina, G. S. Research on Historical Records of Geomagnetic Storm / G.S. Lakhina, S. Alex, B.T. Tsurutami, W.D.Gonzalez // Coronal and stellar mass ejections: proceedings of the 226<sup>th</sup> symposium of the International Astronomical Union held in Beijing, China, September 13-17, 2004. – Cambridge University Press, 2005. – С. 3-13.
- [9]. Ермолаев, Ю. И. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды / Ю.И. Ермолаев, М.Ю. Ермолаев // Геофизические процессы и биосфера. – 2009. – Т.8, N1. – С. 5-35.
- [10]. Магнитные бури. — Шкала геомагнитных бурь — Geomagnetic storms scale. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.contenton.ru/geo-timeline/shkala-geomagnitny-buri.html>. – Дата доступа: 19.01.2019.
- [11]. Schwenn, R. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth / R. Schwenn, A. Dal Lago, E. Huttunen, W.D. Gonzalez // Ann. Geophys. – 2005. – Vol. 23. – P. 1033–1059.
- [12]. Song, H. The automatic predictability of super geomagnetic storms from halo CMEs associated with large solar flares / H. Song, V. Yurchyshyn, G. Yang, C. Tam, W. Chen, H. Wang // Solar Physics. – 2006. – Vol. 238. – P.141–165.



Таблица 1

Классификация и характеристика геомагнитных бурь по G-шкале и Kp-индексу [10–12]

Значения шкалы G	Индекс геомагнитной активности (Kp)	Магнитная буря	Наличие геомагнитного шторма	Характеристика влияния на природные и техносферные объекты	Широта визуального наблюдения авроральных эффектов (северного сияния) в атмосфере	Средняя частота (1 цикл = 11 лет)
G0	Kp<5	Без бури	Без шторма	Геомагнитная обстановка от спокойной до возмущенной. Ярко выраженного влияния не замечено.	В высоких широтах (> 65°)	
G1	Kp=5	Слабая	Слабый	Полярные сияния видны на высоких широтах (до 60°). Влияние на начало миграций животных. Воздействие на энергетические системы приводит к слабым флуктуациям их параметров. Отмечаются эпизодические нарушения в системах управления космическими аппаратами.	На географической широте Санкт-Петербурга [Corr. Magnetic Latitude=56.1°]	1700 за цикл, в среднем 1 буря за 2-3 дня; около 600 штормовых дней за цикл
G2	Kp=6	Умеренная	Средний	Авроральные эффекты (полярные сияния) визуально фиксируются до широты 50°. Ухудшение распространения высокочастотных радиоволн в высоких широтах. В энергосистемах, расположенных в высоких широтах, могут происходить сбои напряжения. Длительный геомагнитный шторм может вызвать неполадки на трансформаторных подстанциях. Отмечаются нарушения в работе энергетических систем, расположенных в высоких широтах. Отклонения в орбитальных траекториях космических летательных аппаратов (КЛА), значительные отличия от прогнозируемых параметров орбитальный сноса КЛА, необходимы корректирующие управляющие воздействия.	На географической широте г. Пскова [Corr. Magnetic Latitude=54°]	600 за цикл, в среднем 1 буря в неделю; приблизительно 360 штормовых дней за 11 лет
G3	Kp=7	Сильная	Умеренный	Авроральные эффекты наблюдаются до средних широт. Возникновение перенапряжений в промышленной электросети. Ложные срабатывания аварийных защитных систем (АЗС). Кратковременные сбои GPS-навигации и низкочастотной радионавигации. Перебои коротковолно-	На широте Риги [Corrected Magnetic Latitude=51°], Москвы [Corr. Magnetic Latitude=51.8°].	200 за цикл, в среднем 1 буря каждые 2-3 недели; приблизительно 130

				<p>вой связи. Необходима коррекция напряжения в энергетических системах, происходят ложные срабатывания АЗС, высокий «газ в масле» в масляных трансформаторах.</p> <p>Нарушения ориентации и увеличение орбитального сноса КЛА и увеличение поверхностного заряда на их элементах. Перебои в системах спутниковой связи и навигации, низко- и высокочастотной радиосвязи.</p>		штормовых дней за цикл
G4	$K_p=8$	Очень сильная	Сильный	<p>Авроральные эффекты наблюдаются до тропиков. Широкомасштабное возникновение перенапряжений в промышленной электросети. Повсеместное ложное срабатывание АЗС. Многочасовые перебои коротковолновой связи и GPS-навигации. Перепады напряжения, частичные разрушения энергетических систем и отключение АЗС. Наведенные токи в трубопроводах.</p> <p>Нарушения ориентации и коррекции КЛА. Многочасовые нарушения спутниковой навигации.</p>	На широте Минска [Corr. Magnetic Latitude=50°].	Около 100 бурь, в среднем 1 буря за 1.5-2 месяца; приблизительно 60 штормовых дней за 11 лет
G5	$K_p>8$	Экстремально сильная	Очень сильный	<p>Авроральные эффекты виды вплоть до экватора. Повсеместные проблемы с регулировкой напряжения в промышленных электросетях, массовые срабатывания АЗС в энергетических и энерготранспортных инфраструктурах. Отключения трансформаторных подстанций. Наведенные токи могут достигать сотен ампер. Повреждения трансформаторных систем. Многочасовые сбои систем коротковолновой связи, коротко- и средневолновой и GPS-навигации. Перепады напряжения, частичное или полное разрушение энергосетей. Токи через трубопроводы достигают сотен ампер. Потеря ориентации, слежения и управления КЛА.</p>	На широтах Варшавы [Corr. Magnetic Latitude=46.7°], Бреста [Corr. Magnetic Latitude=47°], Гомеля [Corr. Magnetic Latitude=48°].	От 4 до 6 бурь, в среднем 1 буря за 2-3 года

## **MODELING THE RISKS OF ACCIDENTS IN POWER SUPPLY SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF FACTORS OF SPACE WEATHER**

**A.G. DAVIDOVSKY**

*PhD (Candidate of biological Sciences), Associate Professor  
Associate Professor of Engineering Psychology  
and Ergonomics Department of The Faculty of Computer-Aided Design  
of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics*

*Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus  
E-mail: agd2011@list.ru*

**Abstract.** Has been proposed the approach of multivariate analysis of accident risks in power supply systems under the influence of space weather factors such as solar activity and geomagnetic storms. Multi-factor mathematical models for monitoring, analysis and prediction of the risks of emergency situations in the operation of power supply systems in the conditions of fluctuations of space weather factors are developed and practically tested.

**Keywords:** mathematical modeling, power supply systems, accident risks, solar activity, geomagnetic storms