

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 550.343.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ
ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
ПОД ВЛИЯНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

А. О. Фаддеев, д.т.н., доцент, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

С. А. Павлова, к.т.н., доцент кафедры математики и информационных технологий управления Академии ФСИН России, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-8634-9163, e-mail: pavlovhome23@rambler.ru

Целью исследования является изучение динамики опасных процессов геодинамического происхождения под влиянием солнечной активности. Для этого рассматривается влияние описанных в научной литературе факторов, которые приводят к перенапряжениям в земной коре.

В процессе работы при выявлении значимости взаимодействия космически-земных связей были построены графики, отражающие временную динамику плотности солнечного ветра и магнитной индукции межпланетного магнитного поля. При подготовке данных, используемых при построении спектрально-временных диаграмм, применительно к каждому ряду значений полей величин строился Фурье-спектр; выделялись наиболее значимые частоты, по которым строились амплитудно-частотный спектр и пространственные СВАН-диаграммы. Построена математическая модель, позволяющая получить количественную оценку взаимосвязи землетрясений и солнечного ветра.

Рассматриваемый в статье метод исследования повышает эффективность существующих на сегодняшний день подходов к оценке геодинамической устойчивости и является полезным при прогнозах сейсмических событий.

Ключевые слова: геодинамическая устойчивость, сейсмическая активность, СВАН-диаграммы, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-112-119

Введение

Важным моментом в изучении проблемы прогноза опасных процессов геодинамического происхождения, в частности землетрясений, является вопрос оценки динамики этих процессов.

На сегодняшний день так и не построена теория достоверного и точного прогноза опасных геодинамических процессов, особенно катастрофических сейсмических событий.

В рамках данной статьи рассматривается вопрос о возможности применения математического метода с целью повышения эффективности существующих на сегодняшний день методов прогноза геодинамических процессов, происходящих в земной коре.

Теоретическая часть

Проведенная систематизация научных исследований [1, 2, 8 – 11] позволила сделать вывод о том, что на возникновение крупных подземных толчков техногенного характера, следствием которых и являются землетрясения, значительное влияние оказывают космические явления, которые в резонансе с земными событиями способствуют перенапряжениям в земной коре, ведущим к возникновению очага геодинамической неустойчивости, следствием чего может быть цепь катастрофических процессов на Земле.

Из литературы [1, 2, 8 – 11] известен ряд космогенных факторов, оказывающих влияние на геодинамическую устойчивость нашей планеты:

- 1) положение Земли в космическом пространстве;
- 2) неравномерность гравитационных полей в космосе, обусловленных перемещением небесных тел;
- 3) солнечно-лунные гравитационные воздействия;
- 4) определенные планетарные конфигурации, в том числе пространственная конфигурация системы Солнце-Земля-Луна;
- 5) влияние солнечной активности.

Большое количество внимания исследователей в настоящее время уделяется изучению влияния последнего из перечисленных факторов на Землю, причинам и цикличности солнечной активности посвящено множество научных трудов [8 – 11].

Это объясняется тем, что в результате проведенных исследований доказано влияние солнечной активности на Землю.

Солнечная активность проявляется вследствие постоянно изменяющейся силы излучения Солнца. Совокупность глубинных нестационарных процессов, протекающих в недрах Солнца, является причиной этой активности.

В результате солнечных вспышек, происходящих во внешних областях атмосферы Солнца, наблюдаются резкие нарушения состояния земной ионосферы, изменяется напряженность магнитного поля Земли, наблюдается изменение условий приема радиосигналов.

Проявление солнечной активности выражается в образовании солнечных пятен – участков поверхности, из которых выходят сильнейшие магнитные поля; солнечных вспышек – процесса выделения энергии в солнечной системе, имеющего взрывной характер и затрагивающего все слои атмосферы; корональных выбросов – выброса плазмы посредством энергии, накопленной в Солнце, а также **солнечного ветра**.

Солнечный ветер – это явление постоянного выброса потока гелиево-водородной плазмы, вырывающийся из солнечной короны со скоростью 300 – 1200 км/с в окружающее космическое пространство.

При покидании солнечным ветром поверхности Солнца во всех направлениях пространства несутся мощнейшие потоки заряженных частиц и магнитных полей. Если бы не защитное магнитное поле Земли, перенаправляющее траектории солнечных частиц вокруг планеты, потоки солнечного ветра при достижении поверхности Земли оказали бы разрушительное воздействие на все формы жизни на Земле. Солнечный ветер и заряженная масса частиц, которые он несет, имеет температуру около 200 000 °С.

Солнечный ветер достигает всех планет в Солнечной системе и за ее пределами. Например, Луна не имеет защиты для своей поверхности и оказывается под мощным воздействием солнечного ветра.

По мере развития технологий стало проявляться влияние солнечной переменности на спутники Земли и Глобальные системы позиционирования (GPS), на климат, на человека и другие биологические объекты. В связи с этим в настоящее время является актуальным развитие методов исследования и прогноза влияния динамики солнечной активности и магнитных бурь.

В данной статье предлагается один из возможных математических методов изучения динамики сейсмической активности, позволяющий также в первом приближении проследить изменения активности солнечного ветра во времени и динамику изменений напряженности межпланетного магнитного поля и отметить наличие связей между этими глобальными процессами.

Экспериментальные исследования

Первый этап исследования был посвящен изучению воздействия космически-земных связей. По данным, измеренным автоматической межпланетной космической станцией, были построены графики, отражающие динамику изменений плотности солнечного ветра (СВ) и магнитной индукции межпланетного магнитного поля (ММП) в течение времени (с 1965 по 1984 гг.). Результаты исследований представлены на рисунках 1, 2.

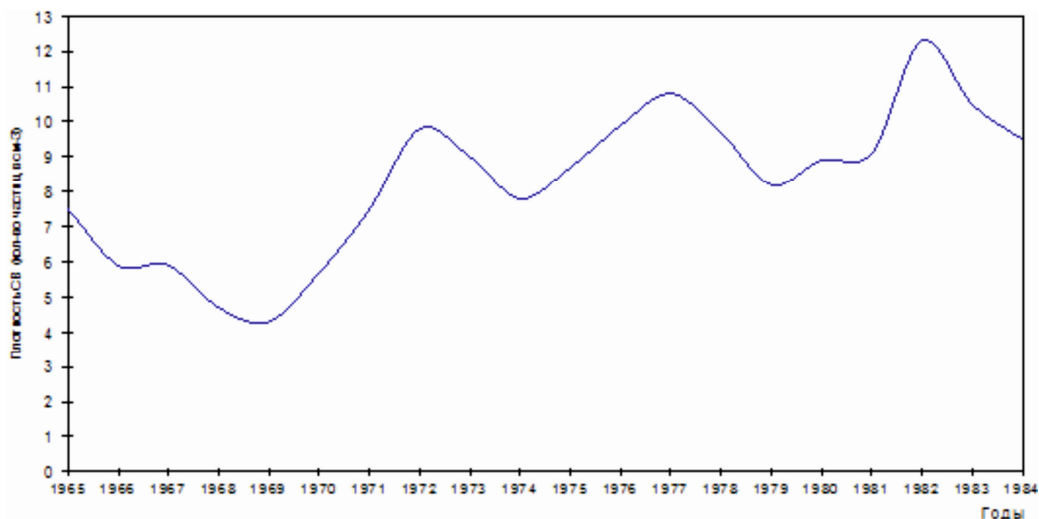


Рисунок 1 – Изменение плотности СВ с 1965 по 1984 гг.

Figure 1 – Change in solar wind density over the time period from 1965 to 1984

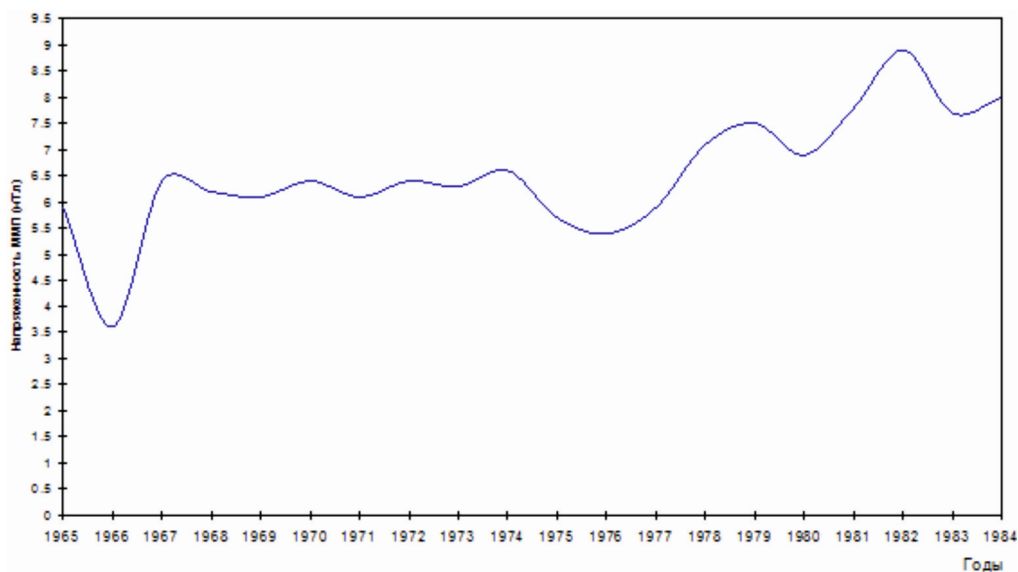


Рисунок 2 – Изменение напряженности межпланетного магнитного поля с 1965 по 1984 гг.

Figure 2 – Change in MMP intensity over the period from 1965 to 1984

Данные о статистике землетрясений заимствовались из электронной версии глобальной базы данных сейсмических событий WBDC.

Для анализа статистики сейсмического режима Земли отбирались данные о землетрясениях с наиболее сильной магнитудой (от 5,0 до 9,0). Для более детального и точного исследования колебаний амплитуды во времени указанный диапазон был разделен на четыре равных интервала, выстроенных по возрастанию интенсивности сейсмических событий.

Исследование временных рядов на предмет синхронизации проводилось с помощью спектрально-временных диаграмм (СВАН-диаграмм) сейсмических событий, на которых можно четко проследить гармонические ритмы.

Благодаря СВАН-диаграммам имеется возможность графического представления амплитудного спектра последовательности импульсов. По горизонтальной оси СВАН-диаграмм откладываются частоты гармоник, по вертикальной оси – амплитуды.

Перед построением СВАН-диаграмм по полученным временным рядам проводился ряд предварительных работ по подготовке исходных полей.

Для каждого ряда величин строился Фурье-спектр: по оси абсцисс откладывались частоты, а по оси ординат – амплитуды, соответствующие каждой частоте.

Затем на разных диапазонах частот проводился анализ амплитуд и выделялись наиболее значимые частоты. В данном исследовании при построении Фурье-спектра применялось 5 %-ное осреднение для 240 точек ряда.

Амплитудно-частотный спектр вычислялся для каждого окна осреднения в тех же частотных пределах и с таким же шагом, как и для Фурье-спектра для всего ряда в целом.

На основе подготовленных данных и проведенного анализа в программном комплексе Surfer были построены три пространственные спектрально-временные диаграммы:

- диаграмма изменения плотности солнечного ветра во времени (рисунок 3);
- диаграмма изменения магнитной индукции межпланетного магнитного поля (рисунок 4);
- диаграмма распределения энергии землетрясений энергетического класса $6,5 \div 8$ (рисунок 5). Все данные, как отмечалось выше, учитываются за период времени с 1965 по 1984 гг.

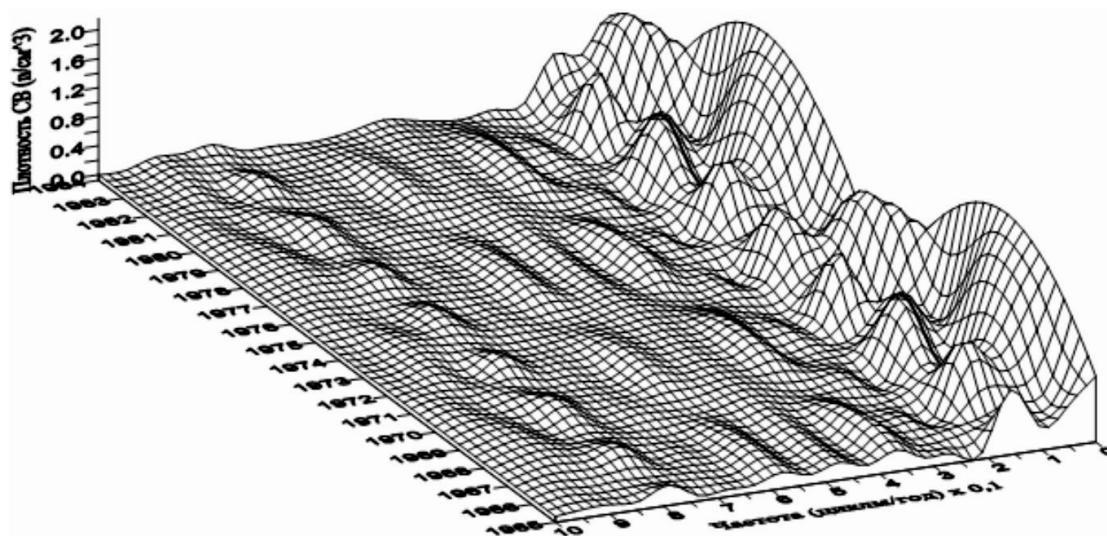


Рисунок 3 – СВАН-диаграмма изменения плотности СВ с 1965 по 1984 гг.
Figure 3 – SWANN diagram of changes in solar wind density
over the time period from 1965 to 1984

Анализ построенных временных диаграмм отражает наличие существенной связи между исследуемыми явлениями, несмотря на то, что при их построении использовались данные полей совершенно разного происхождения.

На трех построенных спектрально-временных диаграммах прослеживается одинаковый период времени равный 2,1 года, соответствующий частоте, на всем протяжении которой амплитуда колебаний остается постоянной. Другие же частоты имеют квазипериодические изменения по годам.

Также можно отметить, что на трех построенных СВАН-диаграммах прослеживаются периоды времени, равные 1,2 – 1,3; 1,7; 2,7 года. Данная временные отрезки одинаково видны и на диаграмме, построенной для солнечного ветра, и на диаграмме, построенной для магнитного поля, и на диаграмме, построенной для распределения энергии землетрясений. Такая закономерность позволяет предположить, что участвующие в исследовании поля коррелируют между собой, подчиняясь воздействию какого-то одного или группы одинаковых, общих для них факторов.

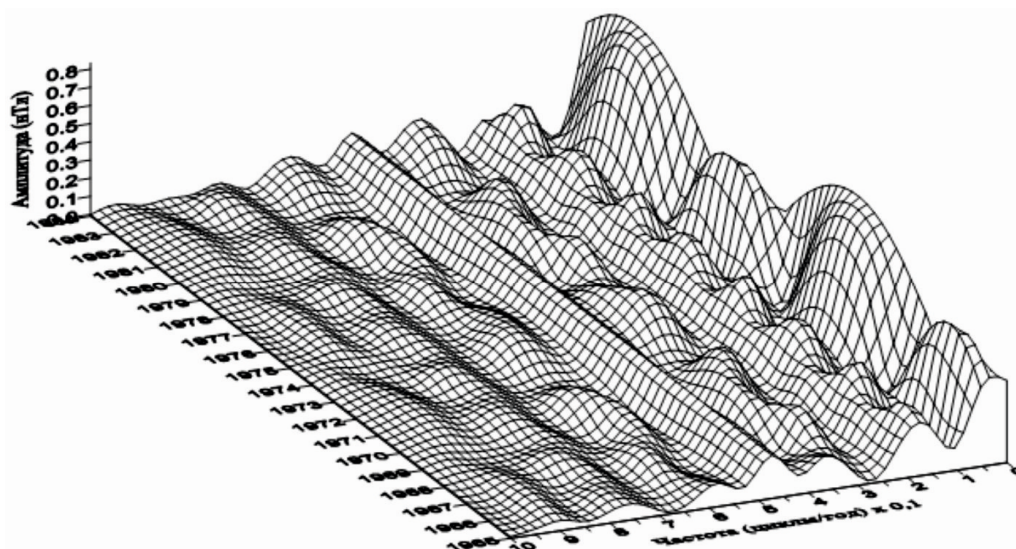


Рисунок 4 – СВАН-диаграмма изменения напряжённости ММП с 1965 по 1984 гг.
Figure 4 – Spatial SWANN diagram of changes in MMP intensity for the period from 1965 to 1984

На всех построенных СВАН- диаграммах можно отметить и другие временные периоды, прослеживающиеся не так ясно, например 1 – 1,1 года.

Рассмотренные временные интервалы позволяют сделать вывод о том, что и на сейсмический режим Земли, и на межпланетное магнитное поле оказывает влияние мощное поле солнечного ветра, т.е. режим землетрясений зависит от энергии солнечной активности.

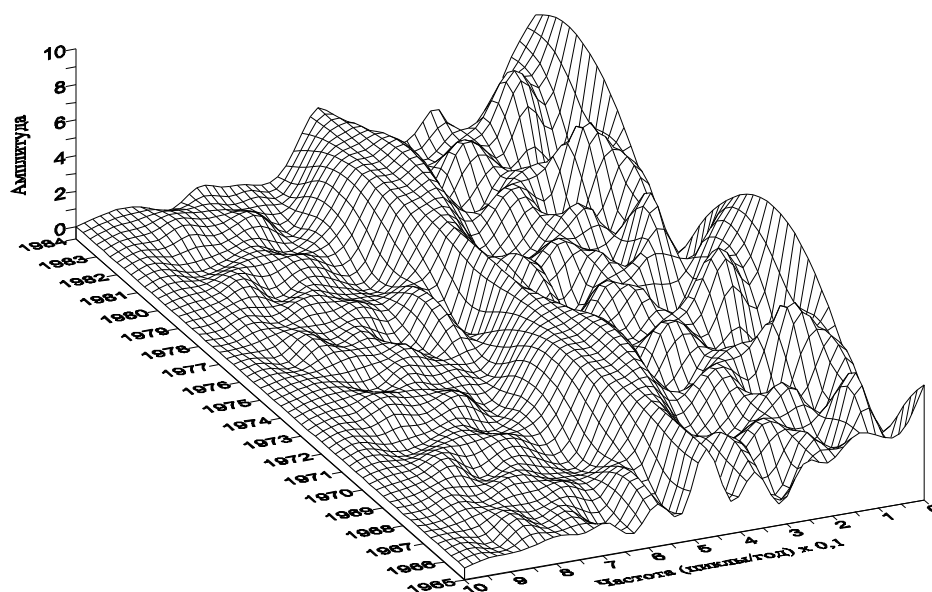


Рисунок 5 – СВАН-диаграмма распределения энергии землетрясении с 1965 по 1984 гг.
На оси амплитуд «0» соответствует $K = 15,6$; «10» соответствует $K = 16,6$
Figure5 – Spatial SWANN diagram of energy distribution of energy-class earthquakes
for the time period from 1965 to 1984

Для анализа взаимосвязей между такими парами данных, как: изменение плотности солнечного ветра – изменение энергии землетрясений; изменение плотности солнечного ветра – изменения напряжённости ММП, проведены расчеты парных коэффициентов корреляции Пирсона. Коэффициент корреляции Пирсона рассчитывался для каждой пары данных в скользящем временном интервале, равном 2,4 месяца. При построении графиков принимались во внимание значения парных коэффициентов корреляции Пирсона, значения которых по модулю превышали значение 0,7.

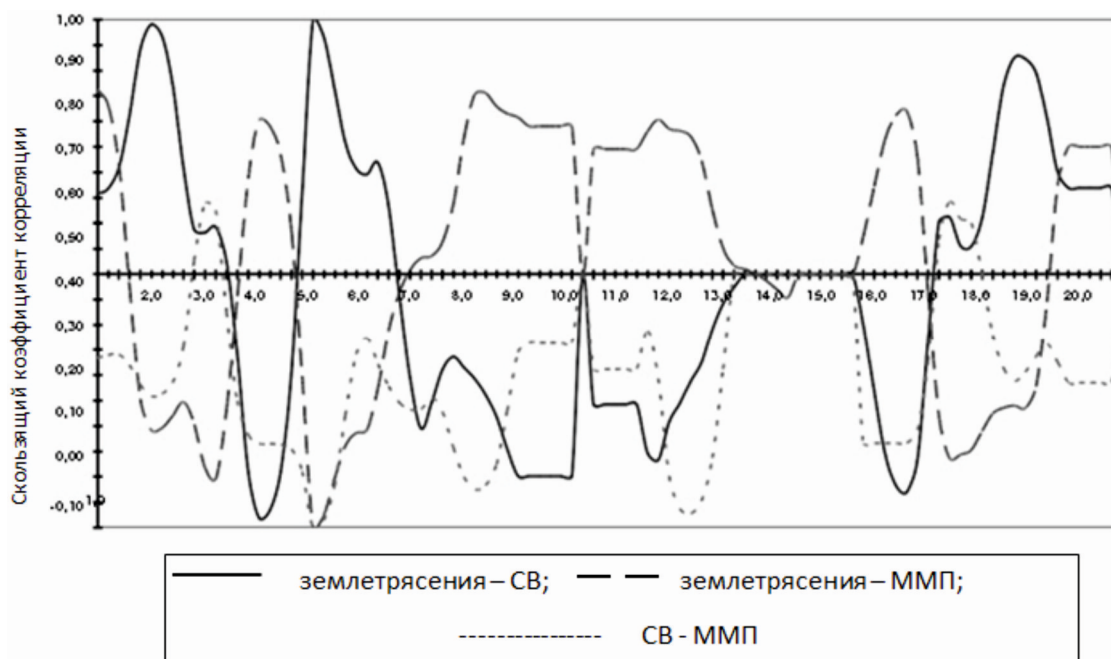


Рисунок 6 – График изменения коэффициентов корреляции Пирсона
Figure 6 – Graph of changes in Pearson correlation coefficients

Из графика видно, что динамика плотности солнечного ветра и напряжённости ММП практически зеркально симметричны относительно горизонтальной оси, то есть при увеличении параметров плотности солнечного ветра напряженность ММП уменьшается и наоборот, при уменьшении значений плотности солнечного ветра напряженность ММП увеличивается [4].

Построена математическая модель, позволяющая получить количественную оценку взаимосвязи землетрясений (ЗТР) и солнечного ветра (СВ).

$$\text{ЗТР} = \frac{1}{0,02 + 3,75 \cdot e^{-\text{СВ}}} \quad (1)$$

Рассчитанный коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$, что является достаточно высокой оценкой качества представленной математической модели [4, 5].

Заключение

Полученные в ходе проведенного исследования результаты позволяют убедиться в том, что источниками геодинамической активности, в частности землетрясений, могут являться не только тектонические силы, оказывающие воздействие из глубин земной коры, но и космические факторы. Космически-земные процессы оказывают непосредственное влияние на движущие силы тектонического происхождения и сейсмический режим Земли нарушается. Возможно, космически-земные процессы имеют меньшую энергетическую силу, но, если взаимосвязь прослеживается, то их влияние нужно учитывать при построении моделей прогноза.

Библиографический список

1. Ананьин И. В., Фаддеев А. О. Причина кажущейся корреляции между изменениями величин сейсмической активности и средними годовыми температурами на поверхности Земли. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: ЯНУС-К, 2002. Т. 3. С. 222-224.
2. Ананьин И. В., Фаддеев А. О., Аптикаева О. В. Общепланетарные флуктуации сейсмического режима в орогенах и на платформах. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: ЯНУС-К, 2002. Т. 3. С. 218-221.

3. **Минаев В. А., Фаддеев А. О., Сычев М. П., Бондарь К. М., Павлова С. А., Кузьменко Н. А.** Геодинамические риски и космические факторы // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 6 (64). С. 195-200.

4. **Минаев В. А., Фаддеев А. О.** Методика оценки геоэкологического риска и геоэкологической безопасности ландшафтно-территориальных комплексов // Материалы VII научно-технической конференции «Системы безопасности» – СБ-2008 Международного форума информатизации 30 октября 2008 г., М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2008. С.113-118.

5. **Павлова С. А.** Математические модели и комплексы программ оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем // Диссертация кандидата технических наук, Рязань, 2014. 192 с.

6. Атлас временных вариаций природных процессов / под ред. А.Г. Гамбурцева и др. Т. 1. Порядок и хаос в литосфере и других сферах. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 1994. 176 с.

7. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов / под ред. А.Г. Гамбурцева и др. Т.2. Циклическая динамика в природе и обществе. М.: Научный мир, 1998. 432 с.

8. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов / под ред. А. Г. Гамбурцева и др. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 672 с.

9. **Херик С.** Астродинамика. М.: Мир, 1976. 318 с.

10. **Хундхаузен А.** Солнечный ветер. М.: Иностранная литература, 1968. 327 с.

11. **Чижевский А. Л.** Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 367 с.

12. **Чижевский А. Л.** Космический пульс жизни: Земля в объятиях Солнца. М.: Мысль, 1995. 765 с.

UDC 550.343.6

ABOUT A POSSIBLE MATHEMATICAL METHOD STUDYING THE DYNAMICS OF DANGEROUS PROCESSES GEODYNAMIC ORIGIN

A. O. Faddeev, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

S. A. Pavlova, Ph.D. (Tech.), associate professor, Chair of Mathematics and Information Technologies of Management, Academy of law management of the Federal penal service of Russia, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-8634-9163, e-mail: pavlovhome23@rambler.ru

The aim of the study is to analyze the mathematical method of studying the dynamics of dangerous processes of geodynamic origin; the influence of factors that can lead to overvoltages in earth crust is considered.

When analyzing the method under consideration, two-dimensional graphs of changes in solar wind density and magnetic induction of MMP were constructed to determine significant impact of space-earth connections; when preparing the initial fields of quantities used in the construction of SWAN diagrams, the Fourier spectrum was constructed in a two-dimensional Cartesian coordinate system for each series of values; the most significant frequencies, which were used to calculate amplitude-frequency spectrum were identified; spatial SWANN diagrams were constructed.

Key words: Geodynamic stability; seismic activity, SWANN diagrams, solar wind, interplanetary magnetic field.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-112-119

References

1. **Anan'in I. V., Faddeev A. O.** Prichina kazhushcheysya korrelyacii mezhdru izmeneniyami velichin seismicheskoi aktivnosti i srednimi godovymi temperaturami na poverhnosti Zemli. Prirodnye i social'nye sfery kak chasti okruzhayushchei sredy i kak ob"ekty vozddeistvii. *Atlas vremennykh variacii prirodnykh, antropogennykh i social'nykh processov.* Moscow: YANUS-K2002, vol. 3, pp. 222-224 (in Russian).

2. **Anan'in I. V., Faddeev A. O., Aptikaeva O. V.** Obshcheplanetarnye fluktuacii seismicheskogo rezhima v orogenah i na platformah. Prirodnye i social'nye sfery kak chasti okruzhayushchei sredy i kak ob"ekty vozděistvii. *Atlas vremennykh variatsii prirodnkh, antro-pogennykh i social'nykh processov*. Moscow: YANUS-K. 2002, vol. 3, pp. 218-221 (in Russian).

3. **Minaev V. A., Faddeev A. O., Sychev M. P., Bondar K. M., Pavlova S. A., Kuzmenko N. A.** Geodinamicheskie riski i kosmicheskie factory. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti*. 2015, no. 6 (64), pp. 195-200. (in Russian).

4. **Minaev V. A., Faddeev A. O.** Metodika ocenki geoekologicheskogo riska i geoekologicheskoi bezopasnosti landshaftno-territorial'nykh kompleksov. *Materialy VII nauchno-tekhnicheskoi konferencii «Sistemy bezopasnosti» – SB-2008 Mezhdunarodnogo foruma informatizatsii 30 oktyabrya 2008 g.*, Moscow: Akademiya GPS MCHS RF. 2008, pp.113-118. (in Russian).

5. **Pavlova S. A.** Matematicheskie modeli i komplekсы programm ocenki geodinamicheskoi ustojchivosti sredy raspredelennykh prirodno-tekhnicheskikh system. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk, Ryazan'. 2014, 192 p. (in Russian).

6. *Atlas vremennykh variatsii prirodnkh processov / pod red. A.G. Gamburceva i dr. Ch. 1. Poryadok i kaos v litosfere i drugih sferah.* Moscow: OIFZ RAN. 1994, 176 p. (in Russian).

7. *Atlas vremennykh variatsii prirodnkh, antropogennykh i social'nykh processov / pod red. A.G. Gamburceva i dr. Ch.2. Ciklicheskaya dinamika v prirode i obshchestve.* Moscow: Nauchnyi mir. 1998, 432 p. (in Russian).

8. *Atlas vremennykh variatsii prirodnkh, antropogennykh i social'nykh processov / pod red. A. G. Gamburceva i dr. Ch. 3. Prirodnye i social'nye sfery kak chasti okruzhayushchei sredy i kak ob"ekty vozděistvii.* M.: Yanus-K, 2002. 672 p. (in Russian).

9. **Herik S.** *Astrodinamika*. Moscow: Mir. 1976, 318 s. (in Russian).

10. **Hundhausen A.** *Solnechnyi veter*. Moscow: Inostrannaya literature. 1968, 327 p. (in Russian).

11. **Chizhevskii A. L.** *Zemnoe ekho solnechnykh bur'*. Moscow: Mysl'. 1976, 367 p. (in Russian).

12. **Chizhevskii A. L.** *Kosmicheskii pul's zhizni: Zemlya v obyat'yah Solnca*. Moscow: Mysl', 1995, 765 p. (in Russian).