

**ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ И ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА  
АКУСТОЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НАГРУЖЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ**

**PECULIAR FEATURES OF SPECTRA AND PARAMETERS OF FLOW OF ACOUSTIC  
EMISSION SIGNALS UNDER THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD OVER  
LOADED SPECIMENS**

*А.С. Закупин, Л.М. Богомолов, В.В. Бобровский, Г.С. Закупина, П.В. Ильичев,  
В.А. Мубассарова, Д.П. Мясников*

*Научная Станция РАН в г. Бишкеке*

Previous works on the effect of physical fields over terrestrial materials fracture allowed to derive on the base of data on responses of acoustic emission (AE) activity that vibrations and electromagnetic impacts are able to stimulate microcracking. It has been noted repeatedly that AE activity is the most informative parameter; and one can draw the analogy between variations of AE activity and that of weak seismicity. Principal results on induced responses of AE have been reviewed in the work. Meanwhile, the information on changes in AE signals spectra and in such parameters as mean amplitude, duration and energy of the AEs during triggering effect caused by external physical field is of importance to understand mechanisms of weak factor influence. This is another task of given work. Temporal dependencies of AE signals recorded by used measuring system are proportional to the pressure oscillation in elastic waves excited by microcrack, the source of AEs. It has been revealed at some cases of loaded specimen tests by additional actions that the changes in mean energy and duration of AE signals start before increment of AE activity. The comparison of spontaneous fluctuations (AE bursts on loads 0,5 – 0,9 from fracturing) with the responses of AE to external actions has been performed. It has been demonstrated that the spectral maximum of AE signals is shifted towards lower frequencies while stimulated activation

**Введение**

Влияние электроимпульсов на деформацию и акустическую эмиссию нагруженных образцов горных пород, имитирующих геологическую среду, исследовалось в ряде работ [1, 9, 10]. В этих и других подобных работах (обзор в [8]) выявлен эффект изменения активности АЭ под влиянием внешних электромагнитных полей и вибраций. Активность АЭ оказалась весьма информативным параметром, отражающим как сам процесс трещинообразования в нагруженной среде, так и вариации его скорости под влиянием внешних полей. В то же время очевидно удобство расчета и визуализации этого параметра при обработке большого объема акустоэмиссионных данных. Возможно, в связи с этим меньшее внимание было уделено другим параметрам, характеризующим структуру сигналов АЭ, сопровождающих инициированный отклик. Некоторые результаты исследований спектральных характеристик сигналов АЭ изложены в работе [10], посвященной моделированию триггерных эффектов при проскальзывании блоков на разломах земной коры (stick-slip). Показано, что в слоистых бетонных образцах для событий АЭ, произошедших после слабого вибровоздействия (с задержкой, превышающей время пробега акустической волны по образцу), большая доля спектральной мощности сконцентрирована в области высоких частот (до 100кГц). В отличие от этого для событий, вызванных непосредственно ударом или механической нагрузкой, спектральная плотность лежит ниже 10кГц. Также отмечено уменьшение значений коэффициента трения в момент подвижки, сопровождающейся инициированием АЭ. Аналогичные вопросы в случае электромагнитного воздействия на нагруженные образцы ранее не рассматривались. В докладе сделана попытка восполнить этот пробел, для чего представляются результаты последней серии экспериментов по испытанию на ползучесть образцов геоматериалов в

присутствии электромагнитных импульсов, а также результаты дополнительной обработки наших предыдущих данных [3].

Вопрос о спектральных проявлениях эффекта электрочувствительности АЭ связан с общим вопросом о пространственно-временных пределах, в которых выполняется принцип самоподобия геосреды [2]. Поясним это обстоятельство. В идеализированной модели полностью самоподобной среды времена всех развивающихся в ней процессов (и, как следствие, характерные частоты) являются функцией длины  $\sim l^\alpha$ , т.е. размера задачи. На заданном масштабе распределения числа дефектов по их размерам и частотам возникновения также являются устойчивыми функциями, не чувствительными к внешним факторам. Это дает основания для гипотезы об инвариантности к внешним возмущениям спектральных распределений сигналов АЭ, а также параметров потока событий: средней амплитуды, энергии и длительности. Другими словами, идеализированная модель геосреды с полным самоподобием подразумевает, что при наблюдаемых вариациях активности АЭ происходит синхронное, “самосогласованное” изменение скоростей накопления структурных дефектов различных размеров, источников сигналов АЭ с соответствующими параметрами. Простейшим проявлением этого может быть закономерность распределения числа событий АЭ по энергиям, аналогичная известному в сейсмологии графику повторяемости землетрясений.

В оригинальных работах [5-7], положивших начало направлению “разрядки избыточных напряжений в геосреде для снижения вероятности сильного землетрясения”, обращено внимание на наличие сейсмических вариаций другого рода, инициированных вибрациями. Для них характерно противофазное изменение активности сильных и слабых событий, в результате чего может существенно увеличиться доля энергии высвобождаемой в малоамплитудных событиях. При моделировании эффектов физических полей в экспериментах на образцах естественно ожидать, что изменение спектров АЭ обнаружится, прежде всего, в подобных изменениях режима АЭ (откликах активности на энерговоздействия, ЭВ). Заметим, что и при самосогласованной реакции геосреды на энерговоздействия сохраняется определенная возможность управления процессом деструкции среды и выделения сейсмической энергии, но сценарий усложняется и не может быть сведен к “энергетическому размену сильных событий на большее число слабых”, [5]. В этом случае желательный эффект может реализоваться за счет изменения соотношения между притоком энергии в выделенный объем геосреды вследствие тектонических сил и ее диссипацией, которая, предположительно, может быть ускорена импульсными физическими полями (как естественной природы, так и техногенными). Задачей данной работы является также развитие методики обработки данных АЭ для последующего моделирования в экспериментах на образцах альтернативных сценариев воздействий физических полей.

### **Результаты**

Для анализа использованы результаты проведенных в ИС РАН экспериментов по нагружению образцов геоматериалов с дополнительным воздействием физических полей. Образцы гранитов, гранодиоритов, габбро, и т.д. испытывались на ползучесть при постоянном сжатии при помощи пружинной реологической установки УДИ с максимальным усилием сжатия 100 тонн. Дополнительные воздействия физических полей осуществлялись во время измерительных сеансов при постоянном уровне сжимающей нагрузки. Для вибровоздействия использовался прикрепленный к боковой поверхности образца малогабаритный вибратор мембранного типа (буззер) и подключенный к генератору синусоидального напряжения ГЗ-33. Воздействие электрическими импульсами проводилось при помощи генератора прямоугольных импульсов Г5-54, нагруженного на

графитовые электроды, контактирующие с боковой поверхностью образца. Сигналы АЭ регистрировались пьезодатчиками в частотном диапазоне от 80 кГц до 3 МГц. Аппаратура работала в ждущем режиме, запуск осуществлялся по превышению сигнала на выходе измерительного канала АЭ заданного порогового значения. Сигналы оцифровывались быстродействующими АЦП, работающими в стандарте КАМАК, и записывались на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме. Более подробное описание постановки эксперимента и методики широкополосных измерений АЭ приведено в [3, 9].

Выше отмечалось, что воздействие внешнего электромагнитного поля на нагруженные гетерогенные среды (образцы геоматериалов) инициирует прирост числа сигналов АЭ, свидетельствующем о возбуждении дополнительных источников – микротрещин. В качестве исходных данных для анализа спектров сигналов АЭ и распределений АЭ по амплитуде и длительности огибающей (несущих детальную информацию об этих дефектах) принимались временные зависимости, “осциллограммы” АЭ, которые зарегистрированы в сеансах с подачей электромагнитных импульсов. Для исследования вопроса о пределах самоподобия в процессе деструкции в образцах нагруженных геоматериалов при дополнительном воздействии на них электромагнитных полей проводился расчет по данным об активации АЭ образцов различных горных пород (гранодиорит, габбро, гранит [3, 4]).

Для потока акустоэмиссионных сигналов определялись амплитуды и длительности одиночных сигналов. После этого проводилась сортировка слабых и сильных событий с помощью программы амплитудной дискриминации, причем порог выбирался с учетом особенностей эксперимента (общего количества событий, реального значения порога дискриминатора в автоматике эксперимента и т.п.) В результате получались временные распределения сигналов АЭ в определенных полосах, по которым вновь строились графики активности относительно слабых и сильных событий. Полученные зависимости активностей АЭ с сепарацией по амплитудам выявили особенности откликов на внешние воздействия, неразличимые на ранее анализированных суммарных графиках активности. Эти новые черты в откликах АЭ оказались общими для всех исследованных материалов. В качестве примера на рис.1 приведен график активности АЭ образца гранодиорита в одном из сеансов с воздействием ЭМ поля. Основные результаты этого эксперимента изложены в [4]. Подача импульсов генератора Г5-54 происходила в течение часа, на графике этот период отмечен черной полосой. На верхнем графике на рис.1 показана кривая активности АЭ, которая построена по общему потоку сигналов АЭ. На втором же графике показаны две зависимости: синяя линия демонстрирует активность сильных сигналов, а красная – слабых сигналов. При минимальной амплитуде сигнала, приведенной ко входу измерительного канала, 0,02 мВ для слабых сигналов порог дискриминатора был установлен в пять раз больше этого значения (0,1 мВ). При расчете событие относилось **к сильным**, если его амплитуда превышала порог 0,1 мВ. При указанном выборе порога количество событий в полосе слабых и сильных соизмеримо, и усредненные активности не должны отличаться друг от друга активности слабых более чем на 50%.

Как видно на графиках в области (а) почти сразу же после включения Г5-54 увеличивается активность слабых событий и несколько снижается уровень активности сильных. Отметим, что отклик АЭ, проявившийся в общей активности, наступает позже. Рост активности слабых событий начинается через 50 секунд и дисбаланс по отношению к сильным событиям сохраняется практически всё время задержки активации (1400с). Затем происходит одновременный рост активности всех событий, однако область (б), в которой происходит максимальный прирост активности, также характеризуется приростом активности слабых событий и уменьшением сильных, причём это явление в этом

временном интервале не более выражено, чем в (а). Результаты анализа амплитудных распределений, в целом, показывают, что закон повторяемости соблюдается, при этом при воздействии электромагнитного поля имеются и отклонения. Отметим, что это первые результаты и, безусловно, они требуют статистического подтверждения. Результаты анализа параметров сигналов АЭ, сопровождающих отклик на внешнее воздействие показывают на тенденции в структурных изменениях, сопровождающих отклик АЭ. Структура сигналов меняется, что, безусловно, имеет непосредственное отношение к их генезису, и в этом аспекте спектральный анализ их состава может дать дополнительную информацию об их происхождении.

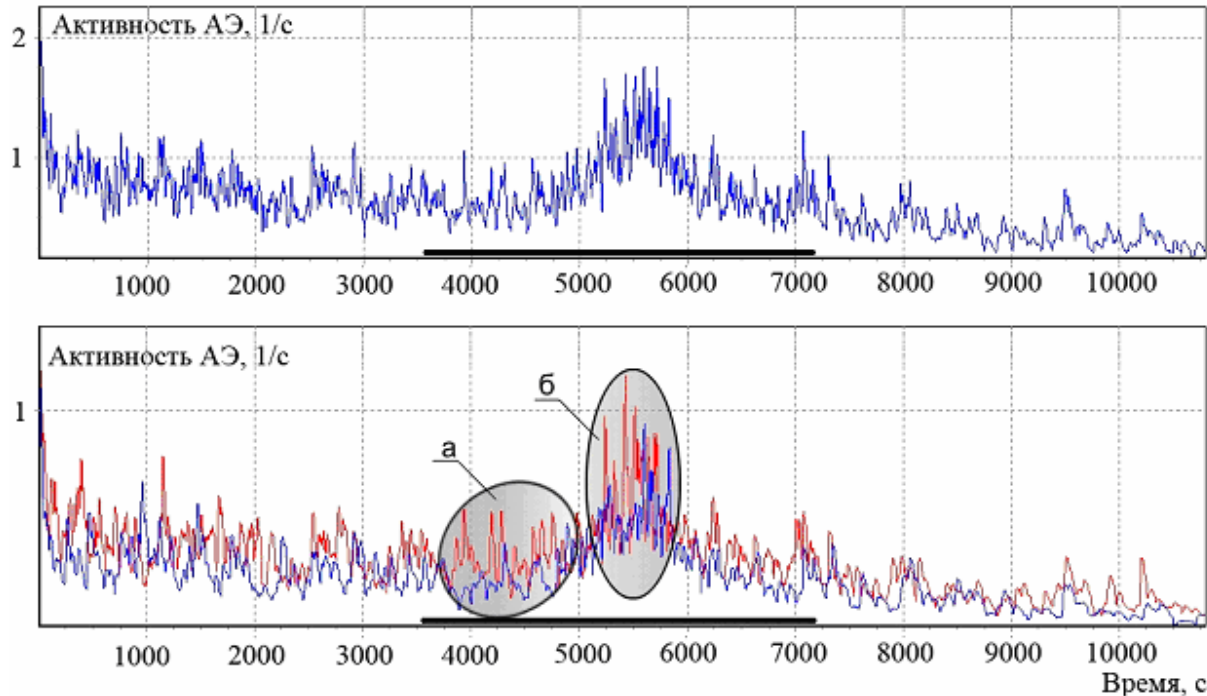


Рис.1. Активность АЭ образца гранодиорита (первый график), активность АЭ того же образца для слабых – красная линия, и сильных событий – синяя линия (второй график). Сжимающее усилие - 91% от разрушающей нагрузки.

Для расчетов были использованы материалы эксперимента (рис.2), удовлетворяющие следующим условиям: записи волновых форм (“осциллограмм”) подходят для проведения спектрального анализа; в одной из измерительных сессий ( $k > 0,7$ ) перед откликом АЭ отмечена спонтанная активация АЭ (за полчаса или более). Анализ проводился по данным эксперимента с образцом габбро. В этом эксперименте в качестве источника ЭВ применялся конденсаторный разрядник. В сессии выделяются следующие промежутки: а) спонтанный всплеск АЭ; б) фоновый уровень АЭ перед началом ЭВ; в) период задержки инициированного всплеска АЭ; г) период максимального прироста АЭ после ЭВ.

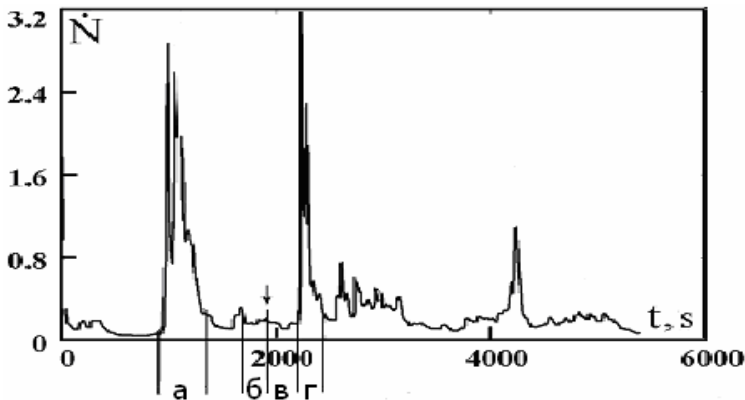


Рис.2. График активности АЭ образца габбро.

В каждом промежутке из потока АЭ производилась выборка событий амплитудой от 90 до 120 мкВ (события средней и большой амплитуды). Затем для каждого сигнала проводилось построение амплитудного спектра методом быстрого преобразования Фурье. После обработки результатов фильтром Хемминга строились графики спектральной плотности.

Получены следующие результаты. Спектры большинства событий АЭ (99%), зарегистрированных в ходе спонтанной активизации АЭ, имеют схожие распределения, соответствующие формам, показанным на графике 3 а. По рисунку видно, что тональной частотой, на которой отмечен спектральный максимум, является частота 300кГц (проверено, что полудлина волны не соответствует размерам образца). На частотах в диапазоне 150–450 кГц, также отмечены несколько максимумов, однако они много меньше основного. Интересно, что ситуация совершенно аналогична для спектров сигналов АЭ в течение периода б), где, как показано на рис 2 видна фоновая активность перед ЭВ, но уже после затухания спонтанного всплеска. Пример спектра АЭ в этот период приведен на рис.3 б. В период задержки (уже при наличии ЭВ) те же 5-10% имеют несколько максимумов на низших частотах (пример на рис.3 в). Спектральные максимумы для этого типа сигналов отмечены на 400, 300, 200, 170 кГц.

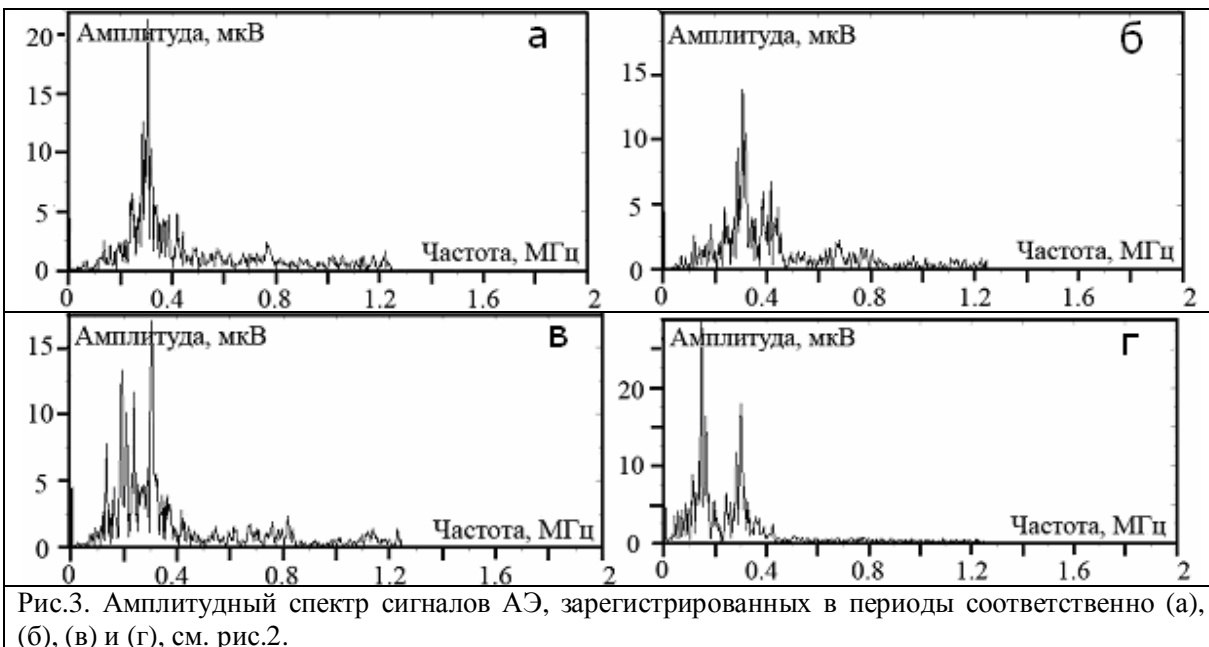


Рис.3. Амплитудный спектр сигналов АЭ, зарегистрированных в периоды соответственно (а), (б), (в) и (г), см. рис.2.

Анализ спектров АЭ в период активации г) дал следующий результат: только у 65% сигналов волновая форма соответствует графикам спектральной плотности типа рис. 3 а,б.

Для остальных 35% пример спектра показан на рис.3 г. Необходимо отметить, что в меньшей подвыборке также содержатся сигналы с полосовым спектром (рис 4), аналогичные примеру спектров АЭ в период (в). АЭ с таким спектром зарегистрированы в той фазе сеанса, когда имеет место отклонение от самосогласованного прироста активности, показанное на рис.1 врезкой (б).

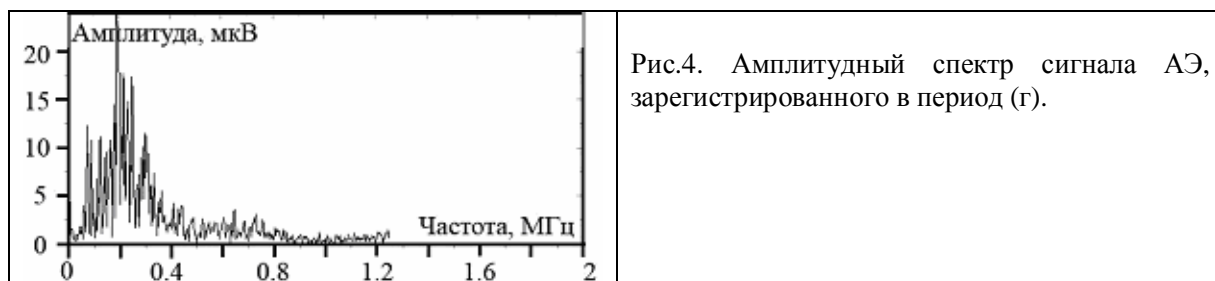


Рис.4. Амплитудный спектр сигнала АЭ, зарегистрированного в период (г).

При сопоставлении графиков на рис.3 а-г, 4 можно заметить, что в периоды (в) и (г) появляются спектральные максимумы на более низких частотах. К примеру, на рис. 3 г ранее упомянутый максимум на частоте 300 кГц присутствует (как и во всех случаях), но его значение уже меньше, чем у максимумов на частотах 100-200 кГц. Поскольку такие спектры встречаются лишь во время воздействия электроимпульсов, можно предположить, что смещение спектральных максимумов связано с особенностью развития дефектов при релаксации упругого поля, созданного энерговоздействиями.

### Резюме

В работе показано, что распределение событий АЭ по амплитуде сигнала в целом подчиняется закону повторяемости, однако при приближении уровня постоянной нагрузки к разрушению отмечено увеличение количества слабых сигналов при одновременном уменьшении сильных, происходящее как раз в период внешнего воздействия ЭМ поля (особенно в начальный момент воздействия и в момент максимального прироста инициируемых АЭ). Спектральный анализ указал на отличие потока сигналов АЭ при спонтанных всплесках активности от сигналов, составляющих отклики АЭ на внешнее воздействие. Продемонстрировано, что при активации, стимулированной внешним полем, в потоке сигналов АЭ появляется подвыборка сигналов, у которых спектральный максимум смещен в сторону низких частот на 50 -100 кГц.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря гранту № 07-05-00687а Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и проекту по Программе № 15 фундаментальных исследований Президиума РАН «Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно - вычислительной среды на основе технологий GRID»

### Список литературы

1. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Пономарев А.В., Соболев Г.А., Некоторые вопросы изменения состояния геологической среды при электромагнитном воздействии импульсами МГД-генератора // Научные труды ИТЭС ОИВТ РАН. Ред. Фортов В.Е. и Лихачев А.П. – М. : ОИВТ РАН. 2000. Вып. 3. С.217-224.
2. Гольдин С.В. Физика живой Земли. Проблемы геофизики XXI века. Кн.1. Ред. Николаев А.В. М.: Наука. 2003. С. 17-36.
3. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др. Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. Ред. Леонов Ю.Г. и Гольдин С.В. – Москва- Бишкек : 2003. С. 304-324.

4. Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величина сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006. № 10. С. 43-50.
5. Капустян Н.К. Техногенные механические вибрации: параметры воздействий и наведенные процессы в земной коре// Вестник ОГГГН РАН. 2001. №4 ([http://www.scgis.ru/russian/cp125/h\\_dgggms/4-2001/kapustian.htm#begin](http://www.scgis.ru/russian/cp125/h_dgggms/4-2001/kapustian.htm#begin))
6. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на выделение сейсмической энергии // Прогноз землетрясений. 1983. № 4. – Душанбе-Москва : Дониш. С. 365-372.
7. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука 1987. 101 с
8. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
9. Bogomolov L.M., P'ichev P.V., Zakupin A.S., et.al. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic- electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. V.47, N 1. P.65-72.
10. Sobolev G., Spetzler H., Koltsov A., Chelidze T. An experimental study of triggered stick-slip // Pageoph. 1993. V. 140, №1. P. 80-94.

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА И ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНОЙ ТОКОВОЙ СИСТЕМЫ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ**

### **RELATIONSHIP OF NEAR GROUND WIND AND CHARACTERISTICS OF IONOSPHERIC CURRENT SYSTEM IN THE NORTH-EAST OF RUSSIA**

*А.В. Веницкий, В.В. Казанцева*

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН*

On the basis of cosmophysical data of “Magadan” observatory and aerological data of Kolymsky Hydrometeocenter the relationships between changes of monthly mean values of zonal, meridional ground level wind components and characteristics of ionospheric current system were considered. Zonal and meridional wind components were calculated using lower level (120 m) aerological atmospheric sounding data about wind velocity and direction obtained in Magadan during the period from 1980 to 1997. To characterize the ionospheric current system the changes of geomagnetic field elements and the time of their extreme values during the day were used. The analysis of the data has shown that wind components have annual variation corresponding to the seasonal wind change at the boundary of two atmospheric center couples acting in the region in summer and winter. At the same time significant (as compared with annual) year to year variations were found. In these variations the superposition of solar and geomagnetic activity occurs. The wind components changes are associated with annual and inter-annual variations of time of geomagnetic field declination minimum value during the day. The later characterizes the time location of current and corresponding wind stream from the north at the lower thermospheric heights in the morning.

Исследованию проблемы связи поведения нижней атмосферы с состоянием ближнего космоса, с солнечной активностью в последние годы уделяется большое внимание. Однако пока не получено универсальных зависимостей атмосферных параметров на различных высотах в разных регионах от космофизических факторов. Обзор основных результатов отечественных и зарубежных исследований [1] позволил сделать вывод, что корреляционные связи между изменениями параметров тропосферы, стратосферы и индексами солнечной, геомагнитной активности для различных областей