

УДК 533.77:539.1.043:551.59

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПОПРАВКИ ХИМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПАРОВ ВОДЫ В АТМОСФЕРЕ ОТ УДАЛЕННОСТИ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

К.А. Боярчук  
(ОАО «НИИЭМ»)

А.В. Карелин  
(Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН)

А.В. Надольский  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Рассмотрен метод предсказания землетрясений, получивший название метод «поправки химического потенциала». Дано фундаментальное обоснование метода. Проведена статистическая оценка зависимости поправки химического потенциала паров воды в атмосфере от удаленности эпицентра землетрясения по данным целого ряда метеонаблюдений за последние десять лет.*

**Ключевые слова:** предвестник землетрясения, центр конденсации, поправка химического потенциала, диполь-дипольное взаимодействие, заряд-дипольное взаимодействие, молекулярно-кинетическая теория, пары воды, радон-222.

Предсказание места, времени и магнитуды катастрофических землетрясений по-прежнему остается актуальной и нерешенной задачей.

В настоящее время предлагается большое количество различных методов предсказания землетрясений [1]. Для создания надежной системы детектирования предвестников землетрясений следует опираться на те методы, которые имеют достаточно ясное физическое обоснование и допускают в перспективе возможность серьезного статистического анализа.

Многие физические эффекты в природе, в том числе и в атмосфере, связаны с конденсацией. Поэтому ее исследованию посвящено значительное количество работ [2 – 8]. При этом во всех работах для качественного и количественного описания процесса конденсации необходимым способом авторы привлекают такие физические величины как коэффициенты пересыщения среды (отношение парциального давления паров воды к давлению насыщенных паров, которое всегда больше единицы) и аккомодации молекул воды к центрам конденсации (эффективность прилипания всегда меньше единицы). Однако в атмосфере при наличии конденсации не всегда имеет место пересыщение, а коэффициенты аккомодации, по мнению авторов, могут быть для каждого конкретного случая процесса конденсации получены только из экспериментов. Выход из этого положения можно найти, если перейти на молекулярно-кинетический уровень описания данного процесса [9]. При этом можно получить фундаментальное понимание некоторых важных физических процессов в атмосфере.

В ряде наблюдений перед землетрясением было

обнаружено резкое падение влажности [9]. Существенные изменения влажности в приземном слое допускают теоретическое описание с позиции молекулярно-кинетической теории конденсации.

Зависимость концентрации насыщенных паров воды от температуры  $T_g$  может быть грубо описана формулой, строго получаемой в термодинамике из уравнения Клаузиуса-Клапейрона [10]

$$n = \frac{A}{T_g} \exp\left(-\frac{U}{k_B T_g}\right), \quad (1)$$

которая согласуется с кинетической формулой Аррениуса для констант скоростей химических реакций. Здесь  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $U$  – скрытая теплота испарения в пересчете на одну молекулу (в статистической физике – это химический потенциал);  $A$  – постоянная.

Скрытую теплоту испарения на одну молекулу воды (химический потенциал паров воды, работу выхода из капли) можно оценить, исходя из теплоты кипения  $Q = 40,683$  кДж/моль при температуре кипения ( $T = 100^\circ\text{C}$ ),  $U_0 = Q/N_A = 0,422$  эВ, где  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ /моль. В молекулярной кинетике эта работа выхода молекулы воды равна энергии диполь-дипольного взаимодействия вращающихся диполей на расстоянии  $r = 2,46$  Å (равном примерно радиусу молекулы воды), рассчитанной по формуле [11]

$$U = 2\mu_{\text{H}_2\text{O}}^4 / 3k_B T_g r^6, \quad (2)$$

где  $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 1,85 \cdot 10^{-18}$  СГС·см – дипольный момент молекулы воды.

Присутствие внешних воздействий в усредненной по объему квазиоднокомпонентной системе будет сказываться в качестве временных вариаций химического потенциала в формуле расчета влажности атмосферного воздуха с учетом (1) и (2):

$$H(t) = \frac{\exp\left(-\frac{U(t)}{k_B T_g}\right)}{\exp\left(-\frac{U_0}{k_B T_g}\right)} = \exp\left(\frac{U_0 - U(t)}{k_B T_g}\right) = \exp\left(-\frac{0,032\Delta U \cos^2 t}{(k_B T_g)^2}\right), \quad (3)$$

где  $U(t) = U_0 + \Delta U \cos^2 t$ ;  $\Delta U$  – поправка химического потенциала в результате внешнего воздействия или наличия посторонних примесей в воздухе. Суточные колебания солнечного излучения учитывались в виде квадрата косинуса. Здесь учтено также, что  $U_0$  рассчитывалась при температуре кипения.

Сравнение результатов расчетов по формуле (3) при  $\Delta U = 0,019$  и  $0,03$  эВ с результатами наблюдений перед землетрясением в Колима (Мексика) 21 января 2003 г. приведено на рис. 1.

Таким образом, в некоторые дни перед землетрясением поправка к усредненному химическому потенциалу квазиоднокомпонентной системы заметно возрастает. Это может быть обусловлено появлением большего количества заряженных центров конденсации, в которых энергия связи молекул воды определяется взаимодействием заряженного кластера с вращающимся диполем [11].

Большое количество заряженных центров конденсации в атмосфере перед землетрясением обусловлено вытеснением из земной поверхности радиоактивного газа радона-222 (непрерывно образуется в некоторых горных породах; период полураспада 3,8 суток; излучает альфа-частицы с энергией 5,49 МэВ).

В некоторых случаях эманация радона поднимается с восходящим воздушным потоком на высоту свыше 500 м и приводит к возникновению мощного (свыше трех баллов) облачного покрова. При этом изменения поправки химического потенциала в приземной области атмосферы могут быть не очень значительными, но предвестники землетрясений в виде линейных облачных структур [1], как результат конденсации паров воды, вдоль разломов земной коры могут быть хорошо заметны из космоса.

Возникновение заряженных центров конденсации приводит не только к возникновению облачного покрова, но и выпадению дождевых осадков из верхней части приземного слоя. Которые, в свою очередь, могут приводить к изменению метеопараметров атмосферы (температуры, относительной влажности, скорости ветра) и, соответственно, закамouflированию предвестников землетрясений в виде поправки химического потенциала паров воды в воздухе.

В зависимости от характерных горизонтальных размеров явлений все вертикальные движения, наблюдаемые в атмосфере, можно условно разделить на три основных класса [12].

**I класс. Неупорядоченные (пульсационные) вертикальные движения.** Характерные горизонтальные размеры объемов воздуха (струй) изменяются от нескольких сантиметров до десятков и сотен метров. Характерная вертикальная скорость таких струй составляет, как правило, несколько метров в секунду (внутри мощных кучевых и кучево-дождевых облаков – до нескольких десятков метров в секунду).

**II класс. Мезомасштабные вертикальные движения.** Горизонтальные размеры объемов воздуха, охваченных вертикальными движениями одного знака, колеблются от нескольких километров до нескольких десятков километров (как правило, не более 20 – 30 км). Характерные скорости изменяются от нескольких до десятков сантиметров в секунду. К этому классу относятся движения, возникающие под влиянием неоднородностей подстилающей поверхности: бризовой, горно-долинной циркуляции и др.

**III класс. Макромасштабные вертикальные движения.** Такие движения одного знака охватывают области, горизонтальные размеры которых составляют сотни и тысячи километров. Модуль скорости упорядоченных токов колеблется от долей сантиметров в секунду до нескольких сантиметров в секунду (как правило, не более 1 – 2 см/с). Под влиянием движений III класса образуются, в частности, системы слоистообразных облаков. При этом внутри облаков наблюдаются вертикальные движения I и II классов.

Ионизация воздуха радоном может служить дополнительной разгоняющей физической причиной развития восходящих потоков I класса в результате выделения латентного тепла в процессе конденсации паров воды на тяжелых заряженных или нейтральных кластерах:

$$\frac{d\nu}{dt} = \frac{\left[ A_c(T_g)U_{cd}(T_g)\sqrt{\frac{\nu_i(t)N}{\beta_{ii}}} + (A_{ass}(T_g) - A_{diss}(T_g))U_{dd}(T_g)N_n(t) \right] \nu}{p}, \quad (4)$$

где  $v$  – искомая скорость;  $\rho$  – плотность воздуха;  $U_{dd}$ ,  $U_{cd}$  – потенциалы диполь-дипольного (2) и заряд-дипольного взаимодействия ( $U_{cd} = q^2 \mu_{H_2O}^2 / 3k_B T_g r^4$ ,  $q$  – заряд кластера);  $N_n$  – концентрация нейтральных центров конденсации;  $A_c$ ,  $A_{ass}$ ,  $A_{diss}$  – вероятности процессов конверсии молекул воды на заряженных центрах конденсации, а также ассоциации и диссоциации на нейтральных центрах;  $\beta_{ii}$  – скорость ион-ионной рекомбинации тяжелых ионных кластеров ( $\beta_{ii} \approx 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ );  $T_g$  в скобках указывает на зависимость соответствующих параметров от температуры среды.

Вероятности процессов конверсии молекул воды на заряженных центрах конденсации, а также ассоциации на нейтральных центрах могут оцениваться по формулам

$$A_{con,ass} = k_{con,ass} [H_2O][N_2], \quad (5)$$

где  $[H_2O]$ ,  $[N_2]$  – концентрации заряженных и нейтральных центров конденсации, паров воды, азота;  $k_{con,ass}$  – константы скорости конверсии и ассоциации

$$k_{con} = \frac{4\pi^2}{3} \left( \frac{q\mu_{H_2O}}{k_B T_g} \right)^{0,75} \left( \frac{q^2 \beta_{N_2}}{M} \right)^{0,5};$$

$$k_{ac} = \frac{4\pi^2}{3} \left( \frac{\beta_{N_2} \mu_{H_2O}^2}{k_B T_g} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{H_2O}^2}{k_B T_g} \right) \left( \frac{2k_B T_g}{M} \right)^{1/2}.$$

Здесь  $M$  – приведенная масса;  $\beta_{N_2}$  – поляризуемость молекулы азота. Константы скоростей реакций диссоциации  $k_{dis}$  и отрыва  $k_{dt}$  связаны с константами скоростей ассоциации и конверсии принципом детального равновесия

$$k_{dis,dt} = \frac{g_{n-1} g_{H_2O}}{g_n} k_{ac,con} K_{eq}, \quad (6)$$

где  $g_n$ ,  $g_{n-1}$ ,  $g_{H_2O}$  – статистические веса кластеров и молекулы воды;  $K_{eq}$  – константа равновесия:

$$K_{eq1,2} = 6,53 \cdot 10^{26} \exp\left(-\frac{U_{dd,cd}}{k_B T_g}\right). \quad (7)$$

Наиболее эффективно процесс конденсации во влажной приземной атмосфере идет по следующему механизму [9]: вследствие высокой концентрации паров воды образование капель сначала идет в результате ассоциации нейтральных молекул, затем к ним со скоростью поляризационного захвата присоединяются

ионные кластеры, образовавшиеся в результате плазмохимических реакций, развивающихся под воздействием внешнего ионизирующего излучения; это, в свою очередь, приводит к затруднению отрыва молекул воды от заряженных капель вследствие более высокой энергии связи и ускорению их удаления из объема под воздействием атмосферного электрического поля.

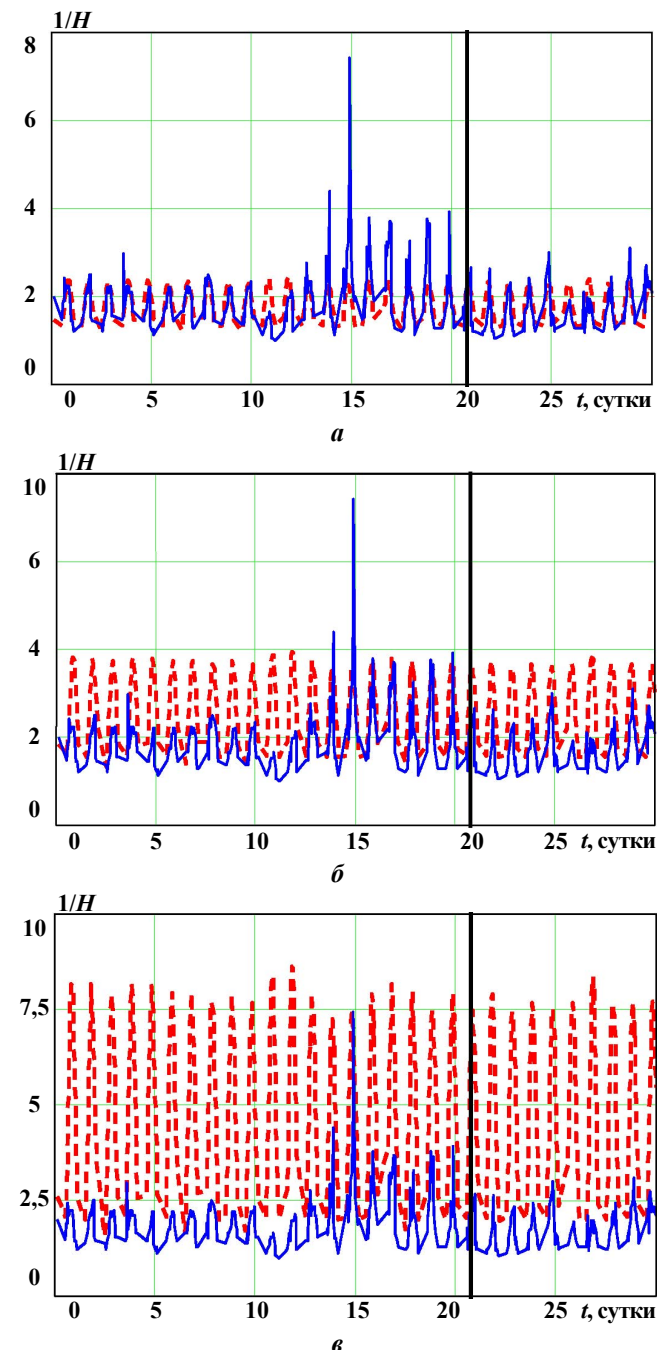


Рис. 1. Временные развертки суточных вариаций относительного значения влажности атмосферного воздуха при различных поправках химического потенциала  $\Delta U = 0,019$  (а);  $0,022$  (б) и  $0,03$  (в) эВ. Сплошные кривые – наблюдения, пунктирные – расчет по формуле (3), вертикальная прямая – дата землетрясения

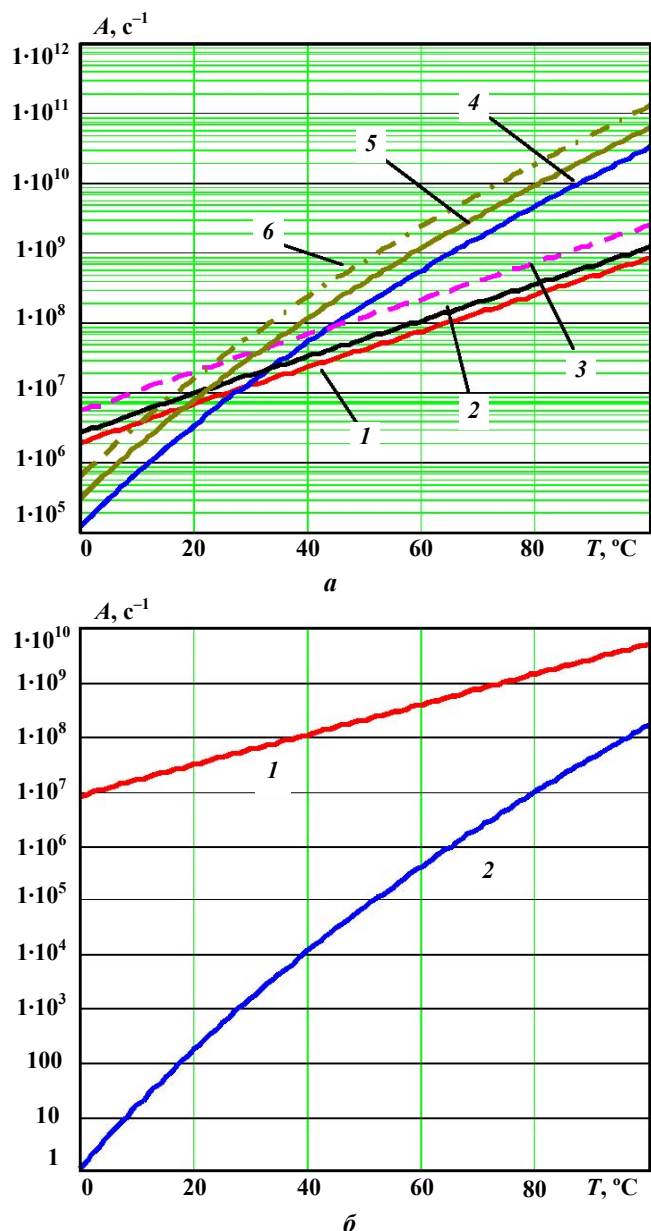


Рис. 2. Зависимость вероятностей: *a* – ассоциации 1 – H<sub>2</sub>O; 2 – NaCl; 3 – SiO<sub>2</sub> и диссоциации 4 – H<sub>2</sub>O; 5 – NaCl; 6 – SiO<sub>2</sub> с участием нейтральных молекул; *b* – конверсии 1 и отрыва 2 нейтральных молекул от заряженных частиц

В гомогенной конденсации выделяют два этапа [8]. На первом из них происходит образование ядер конденсации (кластеров), а на втором – рост капель и их удаление из объема, а также уменьшение концентрации молекул воды вплоть до установления фазового равновесия. Первый этап конденсации требует отдельного рассмотрения.

Согласно существующим представлениям [13], ядрами конденсации в атмосфере являются морская соль (20%), продукты сгорания (40%), частицы почвы (20%), ядра неизвестной природы (20%) (к которым, согласно [9], следует отнести нейтральные кластеры

или, другими словами, частицы Айткена). Поэтому этап роста ядер конденсации следует проводить на основе молекулярной кинетики с участием гетерофазных реакций.

Характерные вероятности ассоциации, конверсии, диссоциации и отрыва для ядра конденсации размером 10<sup>-7</sup> см приведены на рис. 2. Для реакций с участием только нейтральных молекул вероятности диссоциации начинают превышать вероятности ассоциации в диапазоне температур 22 – 28 °С, а вероятности конверсии и отрыва с участием заряженных частиц не пересекаются вплоть до температуры кипения. Это означает, что в отсутствие значительного количества заряженных частиц в атмосфере в приповерхностном слое при относительно высоких температурах воздуха и воды испарение начинает превышать конденсацию.

Анализ результатов расчетов показывает, что даже при стопроцентной влажности и наличии нейтральных центров конденсации, но в отсутствие заряженных частиц, при достаточно высокой температуре воздуха (свыше 28°С) конденсации и выпадения осадков не будет. В то же время, даже при достаточно низкой относительной влажности (ниже 40%) и высокой температуре (свыше 30°С) конденсация идет, и выпадение осадков возможно при наличии значительного количества заряженных центров конденсации. А поскольку процессы зарядки аэрозолей и конденсации в атмосфере характеризуются асимметрией по знаку заряда, то инжекция электронов или отрицательных ионов будет приводить к стимуляции осадков, а положительных ионов – к развалу капель.

Можно сделать вывод о том, что, поскольку значительное пересыщения паров воды в атмосфере отсутствует, процесс развития ядер конденсации начинается на аэрозольных частицах Айткена, концентрация которых в атмосфере достаточно велика, а продолжается на нейтральных и заряженных каплях воды. К ядрам конденсации неизвестной природы следует отнести нейтральные кластеры. Они на расстояниях, которые намного больше их размера, не идентифицируются как заряженные частицы, но в процессе зарождения ядер конденсации на расстояниях порядка межатомного выступают как заряженные кластеры [9].

Абсолютная величина поправки к усредненному химическому потенциалу паров воды в атмосфере по данным метеонаблюдений, измеряемая в электрон-вольтах (эВ), может оцениваться по формуле

$$\Delta U = 5,8 \cdot 10^{-10} (20T_g + 5463)^2 \ln \left( \frac{100}{H} \right), \quad (9)$$

где  $T_g$  – температура воздуха, °С;  $H$  – относительная влажность, %.



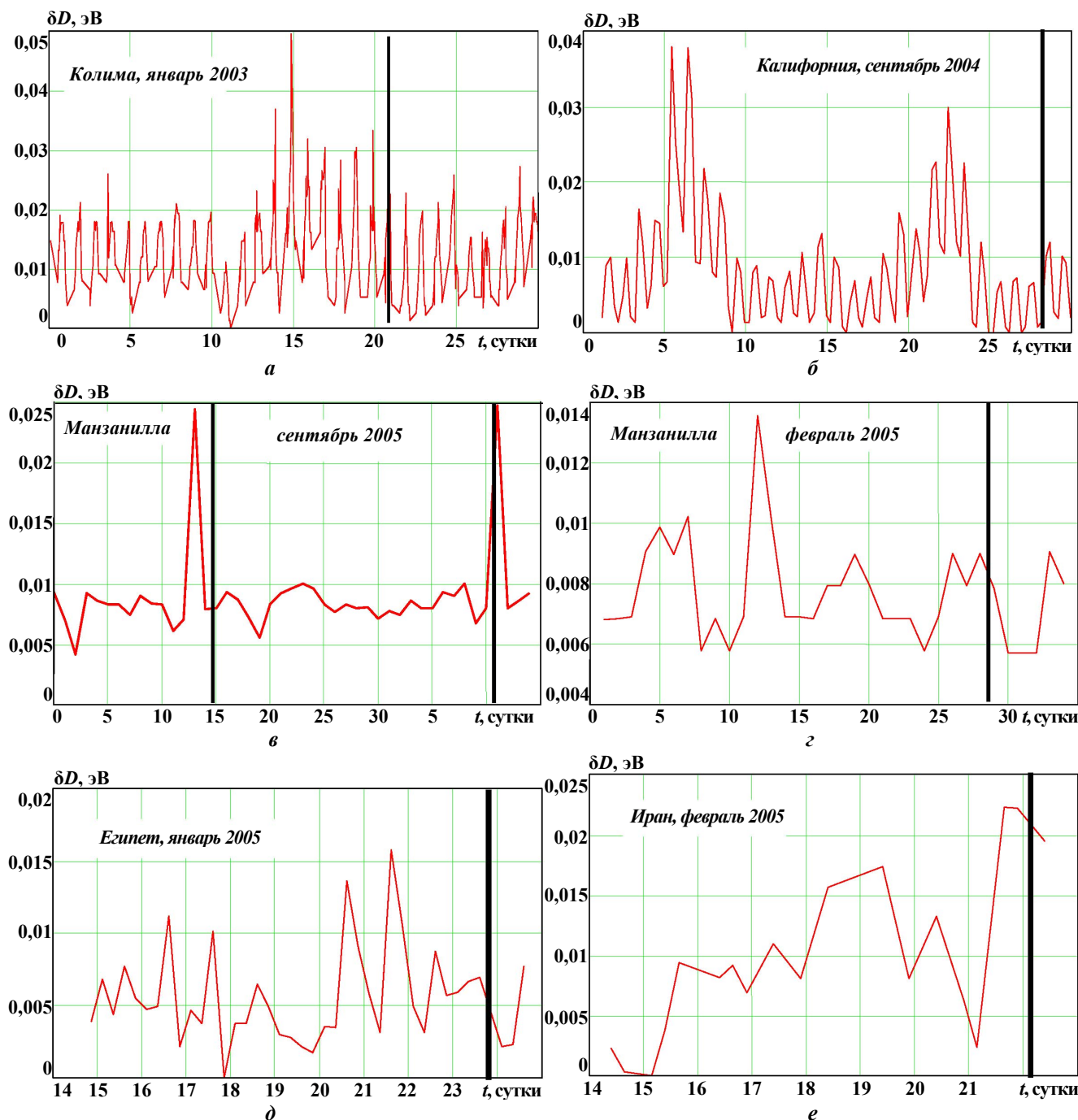


Рис. 3. Суточные колебания поправки к химическому потенциалу перед землетрясениями: а – Колима (Мексика) в январе 2003 г.; б – Калифорния (Мексика) в сентябре 2004 г.; в – Манзанилла (Мексика) в сентябре 1995 г. и г – феврале 2005 г.; д – Александрия (Египет) в январе 2005 г. и е – район Керман 31 N – 57 E (данные метеостанции Бирджанд 32°52' N - 59°12' E, Иран) в феврале 2005 г. Вертикальные прямые – даты землетрясений

Иллюстрации поведения поправки химического потенциала перед землетрясениями в Манзанилле (Мексика) в сентябре 1995 г. и феврале 2005 г., Калифорнии (Мексика) в сентябре 2004 г., Колиме (Мексика) в январе 2003 г., Александрии (Египет) в январе 2005 г. и в районе Керман (Иран) в феврале 2005 г. приведены на рис. 3.

Видно, что значительное изменение поправки, как правило, имеет место за 2 – 5 суток до землетрясения. Таким образом, метод мониторинга предвестников землетрясений на основе тотального динамического анализа данных метеонаблюдений в сейсмоопасных регионах может быть назван методом «поправки химического потенциала».

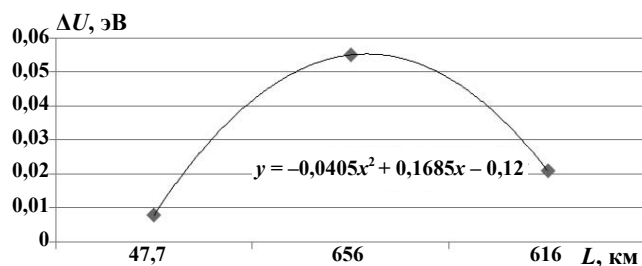


Рис. 4. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения в Перу 2007 г., магнитуа 8

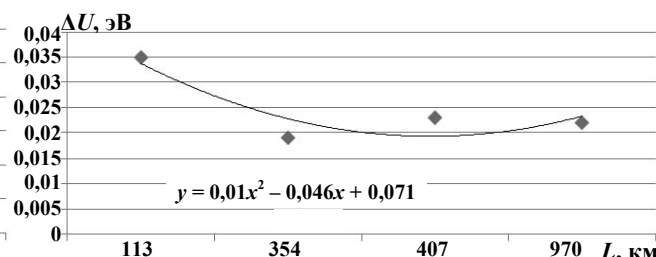


Рис. 5. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения в Пакистане 2008 г., магнитуа 6,4

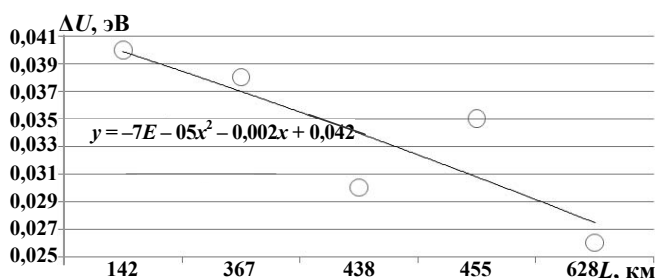


Рис. 6. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения в провинции Сычуань 2008 г., магнитуа 7,9

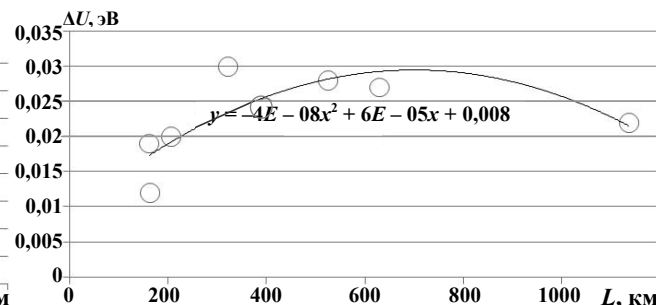


Рис. 7. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения в Италии 2009 г., магнитуа 5,8

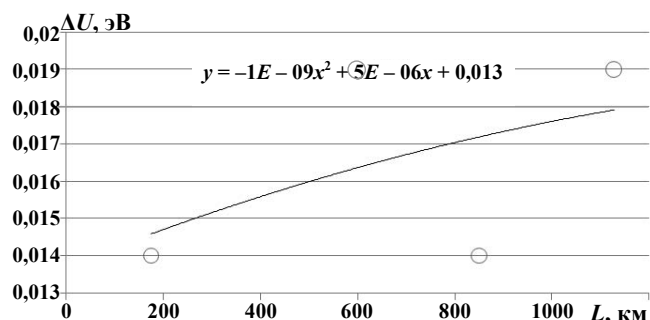


Рис. 8. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения в Индонезии 2009 г., магнитуа 6,0. Крайняя правая точка выделяется из общей картины. Это может быть следствием большой сейсмической активности в данном регионе

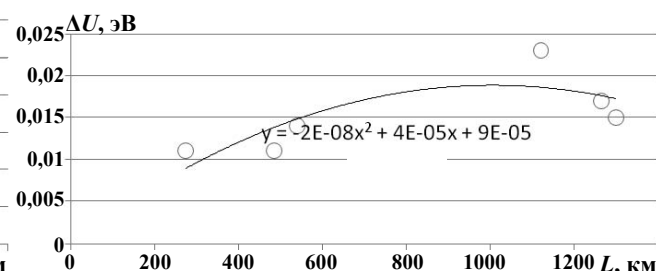


Рис. 9. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения в Гаити 2010 г., магнитуа 7,0; 5,9. Самая верхняя точка – метеостанция, расположенная перпендикулярно линии разлома земной коры в зоне землетрясений

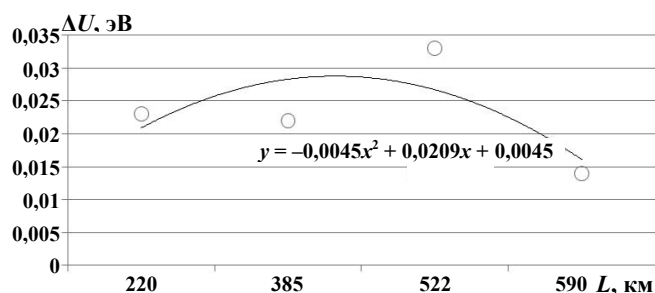


Рис. 10. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения в Чили 2010 г., магнитуа 8,8

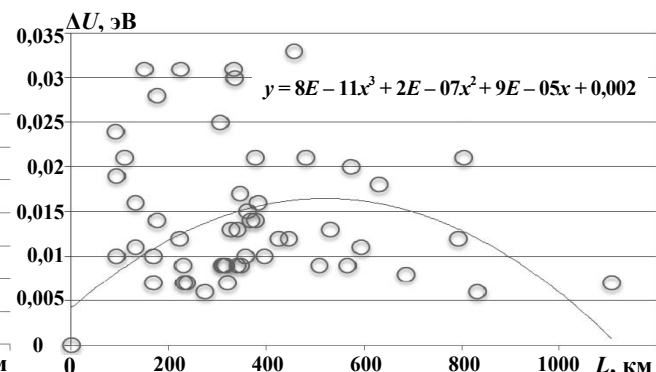


Рис. 11. Поправка химического потенциала в зависимости от расстояния метеостанции до эпицентра землетрясения по данным метеостанций за 2001 г., магнитуа 8,8

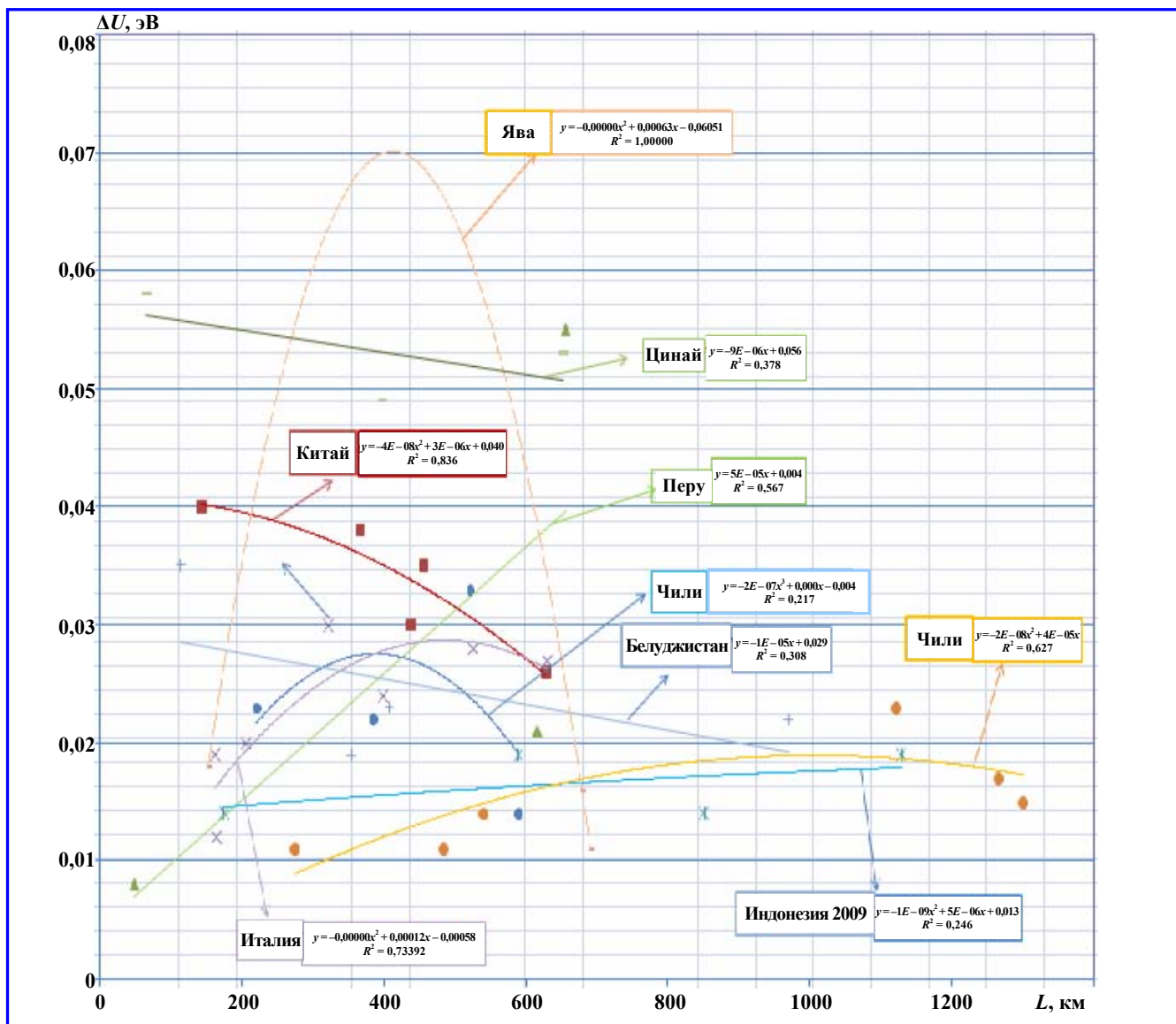


Рис. 12. Общий график землетрясений, представленных на рис. 4 – 10: ● – Чили; ■ – Китай; ▲ – Перу; × – Италия; ◆ – Индонезия, 2009; ♦ – Гаити; + – Белуджистан; - - Ява; - - Цинхай; — — полиномиальная (Чили); — — полиномиальная (Китай); — — линейная (Перу); — — полиномиальная (Италия); — — полиномиальная (Индонезия, 2009); — — полиномиальная (Гаити); — — линейная (Белуджистан); — — полиномиальная (Ява); — — линейная (Цинхай)

Анализ поведения динамики поправки химического потенциала паров воды в атмосфере перед землетрясением показывает, что для различных случаев абсолютная величина максимального скачка поправки может принимать различные значения (рис. 3). Поэтому наши дальнейшие усилия были сосредоточены на установлении связи абсолютного значения величины поправки химического потенциала с координатами предстоящего землетрясения.

По данным метеостанций в радиусе 1000 км от эпицентра были построены графики зависимости поправки химического потенциала от уда-

ленности. На рис. 4 – 10 представлены самые мощные и разрушительные землетрясения за последние 5 лет. На рис. 11 приведены обобщенные результаты зависимости поправки к химическому потенциалу от расстояния до эпицентра для 50-ти наиболее мощных землетрясений за 2001 г. по данным 50-ти метеостанций, наиболее близко расположенных к эпицентрам. На рис. 12 приведена обобщенная картина зависимостей, приведенных на рис. 4 – 10.

Была выявлена явная зависимость поправки от удаленности. Большая часть зависимостей описывается квадратичными уравнениями. Экст-

раполяция зависимостей к началу координат позволяет с определенной точностью оценить местоположение эпицентра землетрясения.

Для землетрясений в Белуджистане, Гаити, Италии, Перу, Чили и на острове Ява эпицентр определяется с точностью не хуже 25 км.

Таким образом, примерно в 70% рассмотренных случаев эпицентр землетрясений можно предсказать с точностью  $\pm 30$  км. Что, несомненно, является очень обнадеживающим результатом, но для окончательного вывода необходимо еще большая статистическая обработка данных.

Анализ влияния количества метеостанций на точность оценки координат эпицентра показал, что при построении графиков по данным только трех метеостанций, мы получаем достаточно большой разброс ( $\pm 100 - 150$  км от эпицентра).

Следует отметить, что для разных местностей имеют место различные амплитуды величины поправки химического потенциала. И это обусловлено не только удаленностью от эпицентра землетрясения, но и характером местности (наличием и величиной восходящих потоков воздуха) и, как следствие, особенностями метеоусловий – наличием дождевых осадков и горизонтальных воздушных потоков. Поэтому универсальную зависимость абсолютной величины поправки химического потенциала от расстояния между точкой наблюдения и эпицентром землетрясения получить не удастся. Поэтому требуется система непрерывного мониторинга сейсмоопасных регионов Земли и решение обратной задачи определения координат возможного эпицентра для каждого конкретного случая на основе имеющегося набора точек наблюдения (наземных метеостанций или дистанционного зондирования Земли из космоса в надир на базе спутников метеорологического назначения, типа «Метеор-М» [14]).

## Литература

1. Pulinets S., Boyarchuk K. Ionospheric precursors of earthquakes / S. Pulinets, K. Boyarchuk // Springer. – 2004.
2. Зельдович Я.Б. К теории образования новой фазы кавитации / Я.Б. Зельдович // ЖЭТФ. – М., 1942. – Т. 12. – Вып. 11 – 12. – С. 524 – 538.
3. Shankar P.N. A kinetic theory of steady condensation / P.N. Shankar // P.N. Shankar // J. Fluid Mech. – 1970. – Vol. 40. – № 5. – Pp. 411 – 422.
4. Черняк В.Г. Кинетическая теория испарения и конденсационного роста сферических частиц / В.Г. Черняк, А.Е. Маргилевский // ТВТ. – 1980. – Т. 18. – № 5. – С. 1032 – 1039.
5. Ивченко И.Н. Исследование конденсационного роста и испарения водяных капель в воздухе // ДАН СССР. – 1984. – Т. 274. – № 3. – С. 572 – 575.
6. Ивченко И.Н. Обобщение теории испарения сферических капель в диффузионном режиме / И.Н. Ивченко, В.А. Никишин // ДАН СССР. – М., 1984. – Т. 277. – № 5. – С. 1111 – 1114.
7. Русанов А.И. К теории зародышеобразования на заряженных ядрах / А.И. Русанов, Ф.М. Куни // Коллоидный журнал. – М., 1992. – Т. 54. – № 5. – С. 934 – 941.
8. Гордиец Б.Ф. Кинетика изотермических процессов гомогенной конденсации / Б.Ф. Гордиец, Л.А. Шелепин, Ю.С. Шмоткин // Кинетика низкотемпературной плазмы и газовые лазеры. Труды ФИАН. – М., 1984. – Т. 145. – С. 189 – 219.
9. Боярчук К.А. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К.А. Боярчук, А.В. Карелин, Р.В. Широков. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 203 с.
10. Ферми Э. Термодинамика / Э. Ферми. – Ижевск: Издательский дом Удмуртский университет, 1998. – 163 с.
11. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды / Г.Н. Зацепина. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 184 с.
12. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – 751 с.
13. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн. – Изд. 2-е. – Л.: Химия, 1972. – 428 с.
14. Боярчук К.А. Мониторинг предвестников землетрясений из космоса на основе метода «химического потенциала» / К.А. Боярчук, А.В. Карелин, А.В. Надольский // Международный Российско-Американский научный журнал «Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем». – 2009. – №2 (29). – Т.14. – С. 84 – 93.

Поступила в редакцию 16.08.2010

**Кирилл Александрович Боярчук**, д-р физ.-мат. наук, генеральный директор, т. 994-51-10.  
**Александр Витальевич Карелин**, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, 8-(496)-751-02-79, e-mail: avkarelin@mail.ru.  
**Антон Вячеславович Надольский**, аспирант, т. 366-29-55, e-mail: vniiem@vniiem.ru.