

Результаты отражены на рис. 3. (Величина температуры приведена в отчетах АЦП.)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 99-01-00343 и 98-05-64113).

Литература

1. Хунджуга Г.Г., Андреев Е.Г. // Изв. АН СССР, ФАО. 1974. 10, № 10. С. 1110.
2. Пытьев Ю.П. Методы анализа и интерпретации эксперимента. М.: Изд-во МГУ, 1990.

3. Пытьев Ю.П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1986. № 3. С. 14 (Moscow University Phys. Bull. 1986. No. 3. P. 14).
4. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. М.: Энергия, 1990.
5. Пытьев Ю.П., Сердобольская М.Л. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1988. № 5. С. 18 (Moscow University Phys. Bull. 1988. No. 5. P. 19).

Поступила в редакцию
01.10.99

УДК 539.038

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. И. Григорьев, В. С. Ростовский

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

Обсуждается принципиально новая методика прогнозирования землетрясений, основанная на поляриметрических исследованиях.

Попытки найти метод предсказания землетрясений продолжают уже десятилетия, если не века. Назывались весьма разнообразные предвестники, хотя их научное истолкование, как правило, отсутствовало. Действительно, как объяснить, например, многократно отмечавшееся беспоконное поведение животных перед землетрясениями или увеличение солености воды в глубоких колодцах? И не связано ли это с замеченными локальными вариациями магнитного и электрического поля, предшествующими сейсмическим событиям?

Эти вариации, регистрируемые объективными физическими методами, как полагает ряд исследователей (см., напр., [1]), являются самыми надежными предвестниками землетрясений, хотя пока еще не достигнуто общепризнанное понимание их физической природы.

По нашему мнению, определяющая роль в формировании электромагнитных предвестников сейсмических событий принадлежит бароэлектрическому эффекту — эффекту перераспределения электрических зарядов в проводнике при возникновении в нем неоднородных механических напряжений (для простоты — «давлений»).

Мы не будем здесь подробно излагать теорию бароэлектрического эффекта (этому посвящены, например, публикации [2–7]), ограничившись напоминанием качественной стороны дела: электроны «выдавливаются» из областей повышенного (впрочем, и пониженного) давления, что обусловлено зависимостью работы выхода от давления. Благодаря такому перераспределению зарядов и порождаются поля.

Если рассматривать модель сферически симметричной планеты, то перепады давлений, обусловленные ее собственной (т. е. создаваемой распределением ее масс) гравитацией, приводят к появлению бароэлектрического поля (будем именовать его главным), направленного радиально, величина напряженности

которого монотонно возрастает от нуля в центре планеты до максимального значения $E(R)$ у поверхности и скачком обращается в нуль за ее пределами. Поверхностная плотность зарядов $\rho_s = -\frac{1}{4\pi}E(R)$. Внутренняя же область заряжена положительно, так что планета в целом предполагается электронейтральной. Вращение планеты, в которое вовлекаются и перераспределившиеся заряды, порождает магнитное поле, которое также можно называть главным бароэлектрическим; последнее, в отличие от главного бароэлектрического поля, захватывает как внутреннюю, так и внешнюю область планеты.

Если же сферическая симметрия нарушается, бароэлектрическое поле проникает и во внешнюю область. Причинами таких нарушений могут быть локальные неоднородности в толще планеты (особенности ее рельефа также сказываются, но в меньшей степени из-за явления изостазии), а также сторонние воздействия, из которых самое заметное влияние оказывают приливные силы.

Обусловленное этими причинами бароэлектрическое поле над поверхностью планеты если и меняется со временем, то сравнительно медленно и, что важнее всего, регулярно. Для прогнозирования землетрясений основное значение могут иметь именно предшествующие (и сопутствующие) им *нерегулярные* локальные изменения напряженности поля, вызываемые изменениями градиентов давлений в толще планеты и особенно вблизи ее поверхности. Временной ход этих изменений проявляется и в наблюдаемой картине вариаций полей: напряженность магнитного поля (а именно к нему относится наибольшее число имеющихся экспериментальных данных) перед землетрясением начинает медленно, а затем все быстрее нарастать, потом резко падает, что естественно истолковать как признак постепенного накопления и последующего резкого «сброса» напряжений в коре перед и во время землетрясения.

Однако пунктов слежения за напряженностями магнитных (и особенно электрических) полей заведомо слишком мало для получения полной картины данных, относящихся ко всей планете. По нашему мнению, для решения этой задачи можно использовать поляризметрические методы исследований.

Поляризацию света Солнца при отражении от Луны заметил еще в XIX в. Доменик Франсуа Араго (см., напр., [8]). Надежно установлена и поляризация при отражении от других планет. Но, как это ни парадоксально, степень поляризации солнечного света при его отражении от поверхности Земли никто, по-видимому, еще не исследовал (при том, что сам факт поляризации и установлен), хотя технические возможности для этого возникли уже давно, например с появлением метеорологических спутников.

Физическая основа предлагаемого нами поляризметрического метода прогнозирования состоит в том, что на поляризацию отражаемого от поверхности Земли света влияют вариации напряженности геоэлектрического поля, которое благодаря эффекту Керра вызывает возникновение оптической анизотропии вещества поверхности планеты.

Влияние электрического поля на поляризацию света при его отражении

Благодаря действию главного бароэлектрического поля на породы Земли, в частности поверхностные, они приобретают оптическую анизотропию (квадратичный эффект Керра); главная оптическая ось направлена по полю, т. е. радиально, от центра Земли. Детальное рассмотрение влияния этой анизотропии на отражение света приводит к следующему качественному выводу.

Общеизвестный стандартный способ решения задач о поляризации состоит в том, что падающую волну рассматривают как результат наложения двух волн, в одной из которых вектор напряженности электрического поля перпендикулярен (*s*-волна), а в другой — лежит в плоскости падения (*p*-волна).

Используя уравнения Максвелла (они выступают здесь как граничные условия) и материальные уравнения, которые в случае анизотропной среды принимают вид

$$D_n = \epsilon_{nm} E_m,$$

получают известные уравнения Френеля (см., напр., [9]), что позволяет найти интенсивности I_s и I_p отраженных волн.

Для описания поляризации используется величина

$$P = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p}, \quad (1)$$

которую, следуя Араго, называют степенью поляризации, или чаще просто поляризацией.

Если отражение происходит от поверхности изотропного вещества, то всегда $I_s \geq I_p$, т. е. поляризация P не может быть отрицательной. Действительно, при нормальном падении $I_s = I_p$, так что $P = 0$; по мере увеличения угла падения I_s монотонно возрастает, тогда как I_p вначале уменьшается, достигая нулевого значения при угле падения, равном углу

Брюстера, а только потом вновь начинает расти, никогда не превышая I_s .

Положение меняется, если свет отражается от поверхности анизотропного вещества. При этом поляризация может оказаться и отрицательной.

Если ограничиться наиболее распространенными случаями, когда постоянная Керра положительна, то показатель преломления n (напомним, что в анизотропной среде показатель преломления $n = |\mathbf{n}|$; $\mathbf{n} = \frac{c}{\omega} \mathbf{k}$ зависит от направления распространения волны) для необыкновенного луча в присутствии электрического поля может оказаться больше, чем в его отсутствие, а поскольку коэффициент отражения при прочих равных условиях тем больше, чем выше показатель преломления, то возникает возможность отрицательной поляризации.

Удобно представить графически результаты довольно громоздких вычислений для величины поляризации P . В качестве примера, иллюстрирующего появление областей отрицательной поляризации при отражении света от поверхности анизотропной среды, на рис. 1 приведены пять графиков (для различных значений постоянной Керра, что отвечает различным значениям ϵ_{zz} для необыкновенного луча) зависимости поляризации от углов падения при фиксированном угле между главной оптической осью и нормалью к плоскости падения.

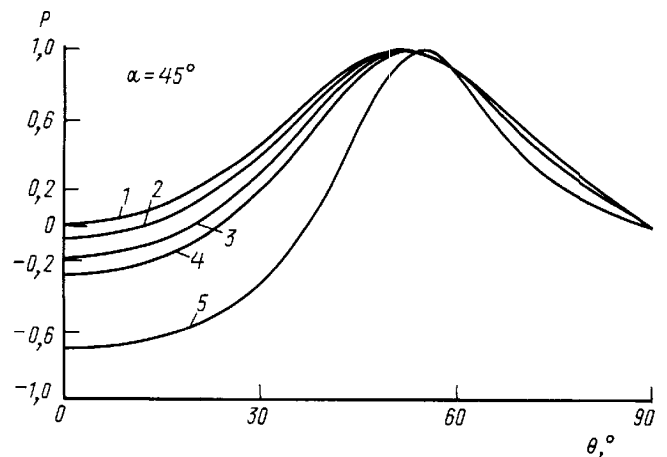


Рис. 1. Зависимость поляризации P от угла падения θ при отражении света от плоской поверхности анизотропной среды. Главная оптическая ось предполагается лежащей в плоскости падения под углом $\alpha = 45^\circ$ к нормали: $\epsilon_{zz} = 1,5$ (1); 1,6 (2); 1,8 (3); 2,0 (4); и 10 (5)

Поверхность Земли не является гладкой; на любом ее участке найдутся элементы, которые отразят свет в установленный на спутнике детектор — поляриметр.

Оценки для предлагаемой методики прогнозирования

Электрическое поле вблизи поверхности Земли складывается из нескольких частей, самой значительной из которых является главное бароэлектрическое поле. Можно принять, что оно почти не зависит от времени, как и локальные добавки к нему, обусловленные особенностями рельефа Земли. Эти добавки сравнительно невелики вследствие эффекта изостазии.

Электрическое поле Земли имеет и меняющиеся со временем составляющие. Из них укажем прежде всего

те, которые вызываются приливными воздействиями на Землю со стороны Луны и Солнца; нестационарность таких приливных полей обуславливается в основном суточным вращением Земли и в определенном смысле может быть названа регулярной. Под поверхностью Земли величина напряженности приливного поля пренебрежимо мала — порядка десятимиллионной доли от величины напряженности главного бароэлектрического поля.

Гораздо значительнее могут быть вклады от электрических полей, порождаемых локальными напряжениями в коре Земли, которые связаны с землетрясениями. Оценить величину достигаемых здесь давлений затруднительно, но важность такой оценки очевидна: приводимые на рис. 1 графики, получаемые в результате довольно громоздких расчетов, иллюстрируют связь между отрицательной поляризацией и напряженностью электрического поля: отрицательная поляризация тем значительнее, чем больше напряженность электрического поля, а значит, и масштаб индуцируемой им анизотропии, т. е. значения диэлектрической проницаемости ϵ_{ax} .

Типичные локальные аномальные давления, способные вызывать разломы и другие разрушения земных пород, составляют величину порядка 10^{10} дин/см².

Добавка $\delta\mathbf{E}$ к напряженности главного бароэлектрического поля \mathbf{E} , вызванная локальным изменением давления, предшествующим землетрясению, направлена радиально, как и напряженность главного бароэлектрического поля. Действительно, в периоды, предшествующие сейсмическим событиям, происходит перераспределение давлений; поскольку оно захватывает области ограниченных размеров, то именно в этих областях и возникают избыточные положительные заряды (независимо от направления градиентов избыточных давлений!), поле которых направлено радиально.

Если вертикальная протяженность области вариаций давлений заметно меньше горизонтальной, то для нахождения величины напряженности дополнительного поля $\delta\mathbf{E}$ вблизи поверхности Земли можно ограничиться рассмотрением одномерной задачи, и тогда эта напряженность определяется лишь значением максимального дополнительного давления p_{\max} :

$$\delta E \approx \sqrt{\frac{4\pi p_{\max}^2}{K}},$$

где K — объемный модуль упругости.

Оценить влияние этой добавки на формирование отрицательной поляризации можно, принимая во внимание, что эффект Керра является квадратичным, т. е. пропорциональным величине $(\mathbf{E} + \delta\mathbf{E})^2 = \mathbf{E}^2 + 2(\delta\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) + (\delta\mathbf{E})^2$. Поскольку напряженность добавочного поля примерно на четыре порядка меньше напряженности главного бароэлектрического поля, т. е. $|\delta\mathbf{E}| \sim 10^2$ Гс, основное влияние на формирование локальных (и достаточно быстро изменяющихся) участков поверхности Земли, где отраженный свет имеет отрицательную поляризацию, определяется именно вторым слагаемым (первое не

меняется со временем, последнее существенно меньше). Это второе слагаемое порядка $10^6 \cdot 10^2 = 10^8$, т. е. такого же порядка, как и квадрат напряженности электрического поля под поверхностью Луны [10]. Но поляриметрические исследования Луны надежно установили наличие отрицательной поляризации, что можно проиллюстрировать полученными непосредственно из наблюдений данными, примеры которых приведены на рис. 2 (см., напр., [11]). Учитывая, что все планеты Земной группы, в частности и Луна, имеют сходный химический состав, а значит, и близкие значения постоянной Керра, можно ожидать, что предлагаемый поляриметрический метод прогнозирования землетрясений окажется эффективным. Предлагаемая методика прогнозирования сводится, таким образом, к непрерывному слежению за изменениями со временем поляризации света, отражающегося от различных участков поверхности Земли, и выявлению тех участков, где обнаруживаются нерегулярные (непериодические) и достаточно быстрые изменения этой поляризации. Необходимая для этого поляриметрическая аппаратура уже разработана, она может быть достаточно компактной и сравнительно недорогой, так что ее установка, в частности, на метеорологических спутниках вполне осуществима.

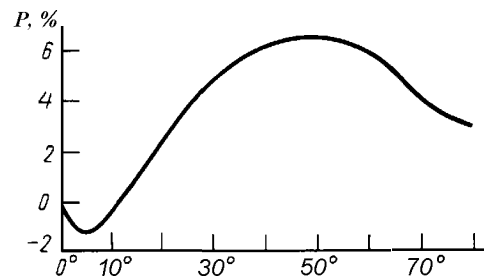


Рис. 2. Зависимость поляризации интегрального лунного света от угла фазы Луны (по работе [11])

Литература

1. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / Под ред. М.Б. Гохберга. М., ИФЗ АН СССР, 1988.
2. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1986. № 2. С. 3 (Moscow University Phys. Bull. 1986. No. 2. P. 1).
3. Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1990. № 4. С. 3.
4. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. № 5. С. 68 (Moscow University Phys. Bull. 1991. No. 5. P. 66).
5. Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. // Прикл. физика. 1995. № 3–4. С. 154.
6. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995.
7. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 2. С. 50 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 2. P. 65).
8. Физика Луны и планет: Международный симпозиум 15–22 октября 1968 г., Киев. М.: Наука, 1972.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

10. Григорьев В.И., Григорьева Е.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 1. С. 61 (Moscow University Phys. Bull. 1995. No. 1. P. 56).

11. Луна / Под ред. Г.А. Манова. М.: ГИФМЛ, 1960.

Поступила в редакцию 06.12.99

АСТРОНОМИЯ

УДК 521.135

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ В НЕЛИНЕЙНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ КОЛЛИНЕАРНЫХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОГРАНИЧЕННОЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОТОГРАВИТАЦИОННОЙ ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ

А. Ю. Кочеткова

(ГАИШ)

Впервые в нелинейном приближении исследованы области устойчивости коллинеарных точек либрации в ограниченной обобщенной фотогравитационной эллиптической задаче трех тел.

Области устойчивости коллинеарных точек либрации были определены только в случае круговой фотогравитационной задачи в линейном приближении. В работе [1] было впервые установлено, что при определенных значениях параметров существуют области линейной устойчивости коллинеарных точек. Л. Г. Лукьянов в работе [2] установил области устойчивости этих точек для большинства начальных условий.

Постановка задачи, основные уравнения движения и метод нормализации гамильтониана, по коэффициентам которого можно сделать заключение об устойчивости коллинеарных точек либрации, подробно изложены в работе [3]. Перечислим только основные параметры задачи: эксцентриситет орбиты основных тел M_1, M_2 — $e \in [0, 1]$; массовый параметр $\mu = m_2/(m_1 + m_2)$, где m_1 и m_2 — массы этих тел) и фотогравитационные параметры Q_1 и Q_2 , которые, вообще говоря, могут принимать значения в диапазоне $(-\infty, 1]$. Роль независимой переменной выполняет истинная аномалия ν .

Координаты коллинеарных точек либрации $L_i(\alpha_i, 0, 0)$ ($i = 1, 2, 3$) в системе координат Нехвила [4] находятся из формулы [5]: $\alpha_i = \sigma_i - \mu$, где σ_i — корни уравнения

$$\sigma_i - \mu \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} Q_1(1 - \mu)/\sigma_i^2 \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} Q_2\mu/\sigma_i^2 = 0. \quad (1)$$

Верхний знак в (1) соответствует точке либрации L_1 , средний — L_2 и нижний — L_3 .

Нормальная форма функции Гамильтона в полярных координатах ρ_j, θ_j ($j = 1, 2, 3$) с учетом членов до четвертого порядка включительно по $\rho_j^{1/2}$ будет иметь вид [6]

$$H = \lambda_1\rho_1 + \lambda_2\rho_2 + \rho_3 + A\rho_1^2 + B\rho_1\rho_2 + C\rho_2^2 + \rho_3(F_1\rho_1 + F_2\rho_2 + F_3\rho_3), \quad (2)$$

$$F_j = D_j + E_j \sin(2\psi) + G_j \cos(2\psi) + K_j \sin(4\psi) + L_j \cos(4\psi),$$

где $\pm i\lambda_j$ — характеристические показатели линейной системы, причем $\lambda_3 \equiv 1$; $\psi = \theta_3 - \nu$; $A, B, C, D_j, E_j, G_j, K_j, L_j$ являются константами при фиксированных параметрах задачи.

После этого проверяются условия устойчивости исследуемой точки либрации, полученные А. П. Маркеевым [6]:

1) условие достаточной устойчивости для большинства начальных условий: дискриминант

$$D = B^2 - 4AC \neq 0;$$

2) положение равновесия устойчиво при учете в нормальной форме (2) членов до четвертого порядка включительно, если $F_3(\psi) \neq 0$ при любых значениях ψ .

Положение равновесия неустойчиво по Ляпунову, если существуют значения ψ , при которых $F_3(\psi) = 0$, но при этих значениях $dF_3/d\psi \neq 0$.

Вычисления и результаты

Вычисления проводились с использованием численных и аналитических средств программирования языка MATLAB. Качественная зависимость области линейной устойчивости точки L_2 от фотогравитационных параметров на плоскости e, μ показана на рис. 1. Линия 1 соответствует значениям фотогравитационных параметров $Q_1 = Q_2 = 0,100$, линия 2 — значениям $Q_1 = Q_2 = 0,114$, линия 3 — $Q_1 = Q_2 = 0,122$, линия 4 — $Q_1 = Q_2 = 0,124$.

В силу того что анализ нелинейной устойчивости требовал много машинного времени (расчет для одной точки занимал 10–20 мин в зависимости от значений параметров e и μ), исследование проводилось лишь для двух случаев: $Q_1 = Q_2 = 0,100$ и параметров, соответствующих полуконтактной двойной звезде PY Per. Результат вычислений для $Q_1 = Q_2 = 0,100$ показан на рис. 2 в плоскости e, μ .

На рис. 2 (так же, как и на рис. 3–5) жирной линией обозначена граница области линейной устойчивости, тонкими сплошными линиями — резонансные