

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ МЕТОДОМ МИКРОВОЛНОВОЙ УЛЬТРАРЕФРАКТОМЕТРИИ АТМОСФЕРЫ

Анализ данных, полученных в течение более чем четырехлетних непрерывных измерений показателя преломления (ПП) на частоте 10 ГГц, показывает, что по характеру флуктуаций ПП возможен краткосрочный прогноз гео- и тропосферных катастроф. На основе учета приливных явлений предлагаются механизмы формирования очагов землетрясения, а также ядер глубоких циклонов и ураганов. Обсуждается еще один возможный источник атмосферного инфразвука.

Показатель преломления (ПП) электромагнитных волн в атмосфере, зависящий в основном от метеорологических параметров, является, по существу, ее интегральной характеристикой. В 1988 году в экспедиционном рейсе на научно-исследовательском судне “Профессор Богоров” для изучения динамических процессов в приводном слое атмосферы был использован модифицированный рефрактометр, работающий на частоте 10 Гц. В режиме непрерывных измерений исследовались пространственно-временные вариации ПП в пограничном слое вода-атмосфера. Достоинством прибора является его высокая чувствительность, позволяющая надежно регистрировать изменения ПП до $\pm 0.01\%$ от среднего значения. Поэтому оказалось возможным осуществить детектирование рельефа морского дна на глубинах до 5 км и зафиксировать подводную гору “Кагосима-V” по изменению ПП в приводном слое атмосферы. В дальнейшем прибор использовался в лабораторных условиях для непрерывного зондирования атмосферы с целью изучения динамических процессов, связанных с метеоусловиями. На протяжении более чем четырехлетних непрерывных измерений собран большой материал, где наблюдаются интенсивные колебания ПП с различной периодичностью. Обычно они предшествуют, опережая на двое-трое суток, прохождению цик-

лонов или землетрясений силой более пяти баллов по шкале Рихтера. Анализ статистического материала с большой достоверностью показывает, что короткопериодные вариации ПП связаны с движением атмосферных циклонических фронтов. Длиннопериодные (более 10^3 с) колебания ПП с такой же степенью достоверности могут быть отнесены к предвестникам землетрясений. Идентификация прохождений циклонов с данными изменений ПП проводилась по космическим картам погоды.

Длиннопериодные колебания ПП сопоставлялись с данными, полученными из национального информационного центра по землетрясениям (NEIC) США. Показано, что кратковременные и сезонные перемещения воздушных масс как регионального, так и местного характера могут быть вызваны возмущениями гравитационного поля. По теоретическим оценкам изменения силы тяжести для этих процессов составляют 15–20 мкГал. Возмущения гравитационного поля связаны с нарушением равновесного распределения масс в земной коре. Такое нарушение может быть стимулировано приливными силами и с наибольшей вероятностью в зонах тектонических разломов. В результате возникают локальные пятна “избыточной” и “недостающей” масс, вызывающие локальный скачок силы тяжести. Мы считаем, что избы-

точная масса впоследствии становится очагом землетрясения со временем жизни, определяемым механоупругими свойствами подстилающих пород, а недостающая масса приводит к возникновению ядра будущего циклона. Таким образом, по нашему мнению, в системе Земля-Луна за счет нарушения распределения масс в земной коре возникают атмосферные возмущения, сигнализирующие о приближающейся катастрофе. Для определения координат очага землетрясения или ядра зарождающегося циклона необходима глобальная наблюдательная сеть.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Основой измерительного комплекса является высокоточный рефрактометр с рабочей частотой 10 ГГц, позволяющий измерять показатель преломления (ПП) атмосферы с погрешностью не более $\pm 0.01\%$. В приборе используется метод сравнения частот двух генераторов, частота одного из которых привязана к частоте вакуумированного резонатора, другого – к частоте открытого, связанного с атмосферой резонатора. На рис.1 приведена блок-схема прибора.

Соотношением, связывающим собственную частоту резонатора с диэлектрической проницаемостью (ДП) атмосферы, является:

$$f_p = \frac{c}{4\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{\chi}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{L}\right)^2},$$

где c – скорость света; ϵ – относительная ДП; μ – относительная магнитная проницаемость; R – радиус резонатора; χ – корень функции Бесселя для данного типа волны; L – длина резонатора; n – число полуволн на этой длине.

В вакууме (при давлении $\leq 10^{-3}$ мм рт.ст.) $\epsilon \sim 1$. С достаточной степенью точности относительную магнитную проницаемость также можно считать равной единице, но небольшое отличие оказывается весьма значительным фактором для распространения электромагнитных волн. Коэффициент преломления

$$n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{1 + (\epsilon - 1)} \approx 1 + \frac{\epsilon - 1}{2}$$

тоже мало отличается от единицы. Поэтому для тонкого учета малой части после единицы пользуются коэффициентом преломления в “N- единицах”, $N = (n-1)10^6$.

В приземном слое атмосферы N меняется в пределах 150–400 единиц. На выходе прибора отсчитывается разность частот генераторов $\Delta f = f_\beta - f_\alpha = N \cdot 10^4$. Здесь f_β – частота генератора с вакуумированным резонатором, f_α – частота генератора со связанным с атмосферой открытым генератором.

Единице N всегда соответствует частота $\sim 10^4$ Гц.

Таким образом, если оба резонатора работают на одном типе волны, имеют одни и те же размеры, причем один вакуумирован, а другой сообщается с атмосферой, то разность их частот будет мерой ПП.

Это является основным достоинством. Другим положительным фактором является стабильность частоты генераторов, а отсюда и высокая чувствительность в определении N, так как основная погрешность зависит от точности подстройки генераторов под собственные частоты резонаторов посредством системы стабилизации.

В основу прибора положена схема Крейна, но для обеспечения высокой стабильности генераторов СВЧ используется высокоэффективная система автоматической подстройки частоты (АПЧ). Кроме того, приняты меры, предотвращающие излучение СВЧ энергии из измерительного резонатора в открытое пространство. Это позволило заметно увеличить добротность резонатора, а вместе с ней и эффективность системы АПЧ.

Объемные резонаторы выполнены в едином блоке из металла с малым коэффициентом линейного расширения (инвара) и помещены в пассивный термостат, что очень заметно уменьшает влияние внешней температуры на точность измерений. При работе приходится демпфировать высокочастотные колебания, связанные с трехмерной турбулентностью, поэтому все указанные меры необходимы для того, чтобы компенсировать неизбежную при этом потерю полезного сигнала и надежно регистрировать очень малые вариации N.

Рефрактометр состоит из следующих узлов:

1) системы СВЧ, которая имеет два генератора с опорным (вакуумированным) и измерительным (открытым) резонаторами, два ферритовых вентиля, два направленных ответвителя, две детекторные секции и смеситель;

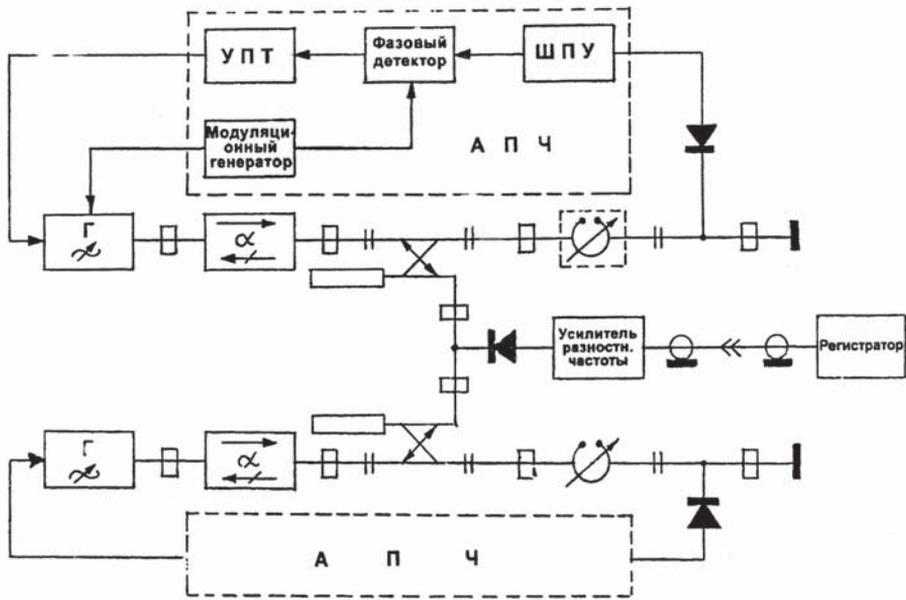


Рис. 1

2) двух систем АФЧ, каждая из которых состоит из модуляционного генератора, широкополосного усилителя, фазового детектора, усилителя постоянного тока и усилителя промежуточной частоты.

Источниками энергии в СВЧ системе являются генераторы на диодах Ганна. Объемные цилиндрические резонаторы работают на основном типе колебаний TE_{011} . На этом типе колебаний реализуется наибольшая добротность, которая определяет стабильность и чувствительность прибора. С помощью системы АФЧ в обоих каналах (опорном и измерительном) частоты генераторов жестко привязаны к собственным частотам соответствующих резонаторов. Обе системы АФЧ идентичны.

Рассмотренной схеме прибора присущи следующие погрешности.

1. Систематическая погрешность, вызванная изменениями частот опорного и измерительного резонаторов за счет градиента температур между ними. В работе показано, что при выполнении резонаторов в едином блоке из инвара максимально возможная амплитуда температурной волны составляет 0.02 К. При использовании термостата ее можно подравнять до 0.007 К, что соответствует результирующей ошибке $\sim 7 \cdot 10^{-9}$.

2. Систематическая погрешность за счет постоянной времени обработки ошибки системой АФЧ. При определении этой ошибки оказалось, что отличие частоты генератора от собственной частоты резонатора при включенной системе АФЧ не превышает $5 \cdot 10^2$ Гц, а так как каналы идентичны, то уход частоты в них односторонний и суммарная ошибка не более 10^2 Гц.

Таким образом, погрешность по этой причине оказывается $\sim 10^{-8}$.

3. Случайная ошибка, вызванная изменениями частот опорного и измерительного резонаторов за счет их расогласования с внешними волноводными трактами при изменении температуры прибора. Эта ошибка сведена до минимума тем, что прибор работает без включений питания в непрерывном режиме, а резонаторный блок с волноводным трактом термостатирован и составляет менее $5 \cdot 10^{-9}$ при изменении температуры в пределах 250–330 К.

Таким образом, абсолютная ошибка с учетом всего вышесказанного составит $\leq 10^{-8}$, что в "N-единицах" составляет ± 0.01 N.

Такие характеристики прибора позволяют осуществить метрологическое обеспечение при измерении метеорологических параметров.

Зависимость N от метеопараметров выражается посредством соотношения



Рис. 2

$$N = k_1 \frac{p}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T},$$

где T – абсолютная температура, p, e – парциальное давление сухого воздуха и паров воды соответственно.

Коэффициент k_1 характеризует поляризуемость или влияние смещения электрических зарядов молекул сухого воздуха; коэффициент k_2 характеризует тот же эффект для молекул воды; k_3 определяет дипольный момент молекул воды, их ориентацию, а значит и поляризацию. При вычислении N по метеопараметрам применяют формулу

$$N = 77 \cdot 6 / T(p + 4810e/T),$$

среднеквадратичная ошибка которой составляет 0.5%, т.е. 1.5 N -единиц. Эта ошибка обусловлена неточностью эмпирических коэффициентов k_1, k_2, k_3 . Другим источником погрешности в определении N являются ошибки измерения параметров p, T и e . Поэтому очевидно преимущество использования рефрактометра, позволяющего обойтись без измерения метеопараметров. Предпринятые технические усовершенствования совместно с непрерывным режимом измерений динамики ПП позволяют осуществить мониторинг состояния атмосферы по очень малым вариациям N , а сам метод назвать микроволновой ультрарефрактометрией атмосферы (МУРА).

Первые результаты, показывающие, что динамика N представляет собой интересный объект для предопределения грозных процессов в гео- и тропосфере, были получены 4 октября 1994 г. во время прохождения цикло-

нического ливня. В течение дня производились двенадцатиминутные записи с дискретностью 2 сек. Характер записи (рис.3) имеет различный вид, а амплитуда выбросов N в некоторые моменты составляла около 10% от нормального уровня. Это произошло накануне сильного разрушительного землетрясения на о.Шикотан.

Очевидная разница в поведении N стимулировала постановку длительных непрерывных измерений и отработку оптимальной методики наблюдений.

На рис.2 представлена схема измерительного комплекса с воздухопроводом, соединяющим пространство между оконными рамами с вентиляционным каналом. Оконное межрамное пространство выполняет роль заградительного фильтра для ВЧ колебаний, связанных с трехмерной турбулентностью в атмосфере. Воздуховод обеспечивает принудительный поток атмосферы через измерительный резонатор прибора. В разных точках воздуховода вблизи резонатора установлены датчики температуры и влажности, которые позволяют контролировать динамику и этих параметров. Таким образом, получается совокупное представление о наблюдаемом процессе.

В качестве датчиков температуры использованы термисторы КМТ-17В, сопротивление которых регистрируется цифровыми приборами Е 7-8, к которым подсоединены безынерционные гигрометры, изготовленные по принципу напыленных на ситалловую подложку встречных гребенок. Подобные конструкции используются для генера-

ции поверхностных акустических волн в твердых телах.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

За весь период наблюдений, с октября 1994 г. до 1999 г., снято около 2.5 млн. показаний, иногда производились круглосуточные измерения. Анализ всех полученных записей показывает, что усиленные колебания ПП предшествуют либо атмосферному, либо земному катаклизмам. Ими могут быть приближение глубоких циклонов, тайфунов или их прохождение вблизи зоны наблюдений, а также наступление будущего землетрясения силой более 5 баллов по шкале Рихтера. Все записи идентифицировались с данными NEIC (американским информационным центром по землетрясениям) и картами погоды, получаемыми по спутниковой системе. За время постоянных наблюдений произошло около 100 землетрясений силой более 5 баллов в различных точках Земли и несколько десятков атмосферных явлений, среди которых крупные циклоны, тайфуны, штормы. Соответствие между регистрируемыми данными и последующими природными событиями очень высокое.

По причине отсутствия технических возможностей строгая математическая обработка базы данных пока не проведена, но даже на уровне качественного анализа можно сделать некоторые интересные заключения.

Диапазон флуктуаций ПП простирается от менее чем 10^{-3} до нескольких герц.

На рис.4 приведены записи N, которые можно отнести к землетрясению, случившемуся 09.08.95 г. в Бурятии. Сила толчков составляла более 5 баллов по шкале Рихтера. На диаграмме достаточно интенсивный выброс промодулирован длиннопериодными квазипериодическими колебаниями, которые могут быть вызваны модуляцией поля влажности атмосферным инфразвуком. Несколько другой спектральный характер имеет запись, представленная на рис.5. Здесь очень интенсивный выброс N сопровождается модуляцией более высокочастотных колебаний. Следует отметить, что частотный спектр всегда сдвигается в область более высоких частот с ростом амплитуды флуктуаций N. Эта диа-

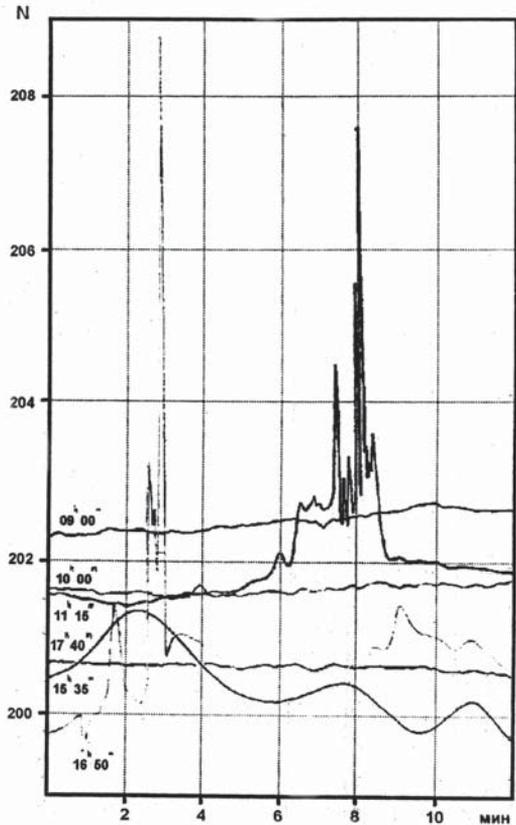


Рис. 3

грамма соответствует сильному землетрясению в 6,5 балла по шкале Рихтера, которое произошло 17.08.96 г. в Колумбии и Перу.

На рис.6 качественно иллюстрируется взаимосвязь ПП с влажностью, измеренной в резонаторе, и с температурами на входе и выходе резонатора. Наблюдается полное согласие ПП с влажностью в резонаторе. Здесь приблизительно в $15^{\text{h}}30^{\text{m}}$ на всех кривых наблюдается внезапное "вторжение" ВЧ колебаний почти всех параметров, кроме температуры на входе измерительной системы. Запись сделана накануне нескольких толчков силой 5.5 балла по шкале Рихтера, которые произошли в Японии. После $15^{\text{h}}30^{\text{m}}$ появились признаки приближающегося тайфуна "Тина".

ВЫВОДЫ

Современная геофизическая концепция построена на представлении, что внешний слой Земли – литосфера состоит из полутора десятков жестких,

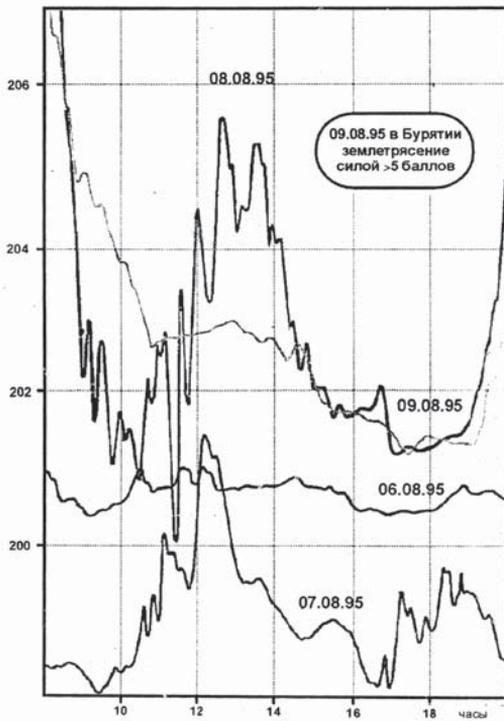


Рис. 4

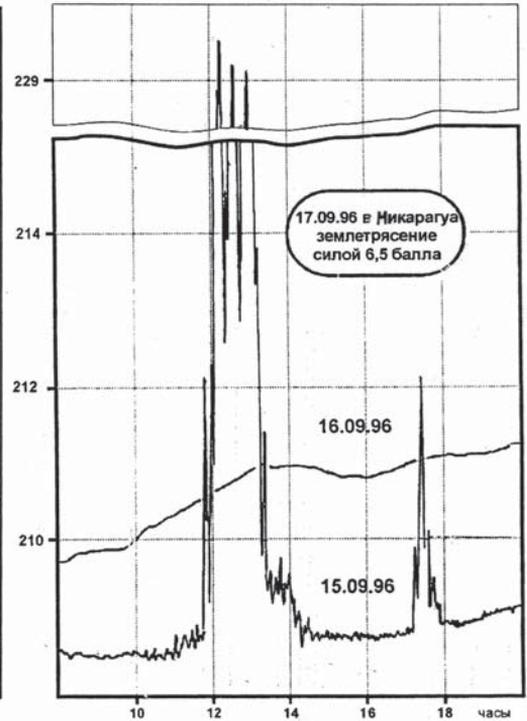


Рис. 5

несущих верхнюю кору плит, которые движутся по подстилающей мантии. Образование геологических структур происходит в результате тектонических движений. При этом в верхнем слое Земли в течение длительного времени формируются разрывы поверхности, ограничивающие соответствующие геологические структуры. Интенсивность тектонических движений определяется высокой сейсмической активностью областей, где эти движения наиболее заметно проявляются. Сейчас можно считать установленным, что срединно-океанические хребты, островные дуги и другие подобные образования являются результатом интенсивных тектонических движений. Медленные движения иногда сопровождаются смещениями по разрывам, вызывая землетрясения.

Но Земля является частью системы небесных тел, поэтому ее необходимо рассматривать во взаимодействии с окружением. Самое сильное влияние она испытывает со стороны Луны. Гравитационные силы взаимного притяжения вызывают приливы и отливы. Внешний слой Земли по этой причине находится в переменном силовом поле.

Дважды в сутки за счет приливных сил в земной коре по линиям разрывов происходят значительные вертикальные смещения. При этом могут провоцироваться локальные перемещения масс, нарушая нормальное распределение плотности вещества по поверхности. Другими словами, локальная плотность переходит в некое "возбужденное" состояние, сопровождаемое скачком силы тяжести. Результатом такого скачка окажется такой же локальный скачок плотности атмосферы. Это вызывает генерацию цуга инфразвуковых колебаний, который, распространяясь без потерь, будет на своем пути модулировать поля влажности, температуры и давления.

В совокупном виде это выразится во флуктуациях ПП.

В свою очередь время жизни "возбужденного" состояния литосферного вещества определяется его механическими свойствами. На рис.7 схематично изображен процесс, когда под влиянием гравитационных сил лунноземного притяжения происходит вертикальное смещение литосферы вдоль линии разлома. В этой области может возникнуть некоторый "избыток" массы за счет обрушения или перетока веще-

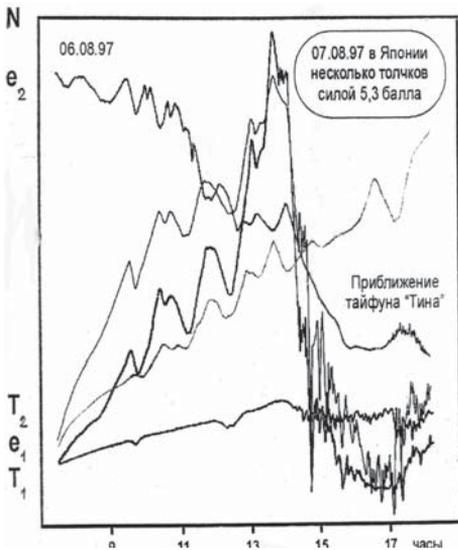


Рис. 6

ства. После окончания прилива под действием гигантских сил давления в этом месте возникает “пятно” с напряженным состоянием подстилающих пород. Напряжения накапливаются здесь до тех пор, пока на глубине нескольких километров не образуется разрыв и проскальзывание пород по нему не снимет напряженного состояния.

В литературе имеются теоретические оценки влияния кратковременных перемещений атмосферных масс регионального характера, вызывающие возмущения гравитационного поля до 15–20 мкГал. Если такое изменение стимулировано “избыточной” массой, то возмущения генерируются соответственно в атмосфере. Иногда за счет тех же сил вместо избытка массы может возникнуть и ее недостаток. Тогда появляется вероятность мезо-масштабной аномалии по причине локальной депрессии атмосферного давления. Нормально стратифицированное состояние атмосферы из устойчивого переходит в возбужденное.

Таким образом, можно сделать заключение, что избыток массы локального характера и ее недостаток могут быть соответственно очагом будущего землетрясения или ядром грядущего тайфуна или урагана. Такое представление подтверждается тем, что большинство землетрясений происходит вдоль линий тектонических разломов,

в пограничных зонах с континентами, в районах островных дуг и подобных структур. Именно здесь сосредоточена сейсмичность Тихого океана. В этих зонах происходит основное число поверхностных землетрясений и освобождается более 80% всей сейсмической энергии Земли. Кроме того, в этих же районах зарождаются всевозможные атмосферные аномалии.

Таким образом, атмосфера может сигнализировать о локальных изменениях в литосфере. Сигнал к такому детектору поступает в виде инфразвуковых колебаний, которые возникнут в результате локального скачка Δg . Поэтому, контролируя тонкие изменения в состоянии атмосферы, можно обеспечить мониторинг быстрых геофизических процессов.

Наконец, необходимо сделать замечание о том, что некоторые тонкие измерения требуют учета локальных вариаций силы тяжести. Например, при измерении упругости пара по показаниям жидкостных манометров необходимо вносить поправки на изменения гравитационного поля в зависимости от географического положения. О важности такого подхода свидетельствует и тот факт, что пружинные и маятниковые гравиметры позволяют достаточно точно регистрировать изменения, вызванные колебаниями плотности воздуха в районе наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для того, чтобы подтвердить необходимость таких исследований, а в будущем стационарных наблюдений, нужно техническое обеспечение, достаточное для полной автоматизации сбора и обработки получаемой информации.

Разнесенная сеть наблюдений позволит ответить на вопрос: являются ли инфразвуковые колебания в атмосфере, стимулированные локальным скачком силы тяжести, переносчиком информации о предстоящей катастрофе? Положительный ответ должен подтвердить справедливость предлагаемого механизма, который, однако, не отвергает существующие положения о развитии очагов землетрясений.

В заключение можно предположить, что в атмосферных возмущениях косвенно проявляются гравитацион-

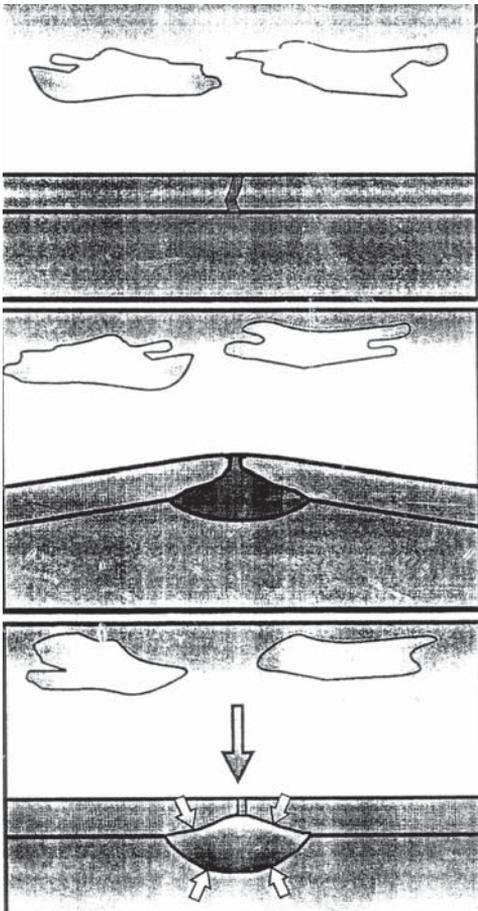


Рис. 7

ные волны, порождаемые ускоренным движением масс в верхней мантии во время действия приливных сил. Согласно А.Б. Балакину, периодические гравитационные волны могут влиять на сложные системы и параметрически вызывать структурообразующие эффекты. Возможно, что решение проблемы детектирования гравитационных волн лежит на пути параметрического усиления эффекта воздействия гравитационных волн на систему. По сложности обнаружения гравитационные волны находятся в одном ряду с проблемой выявления прямого поглощения ультразвука ядерной спин-системой в физике твердого тела. Хотя не все моменты сопоставимы, можно отметить и некоторые аналогии. Так, коэффициент решеточного (фононного)

поглощения в хороших акустических материалах имеет величину порядка 10^{-2} см⁻¹, коэффициент же поглощения ультразвука за счет спинфононной связи не превышает 10^{-7} – 10^{-8} см⁻¹, и для его измерения требуются очень чувствительные методы. Поэтому выполнено всего несколько экспериментальных работ по измерению данного коэффициента. В то же время косвенным методом, посредством насыщения ядерной спин-системы электромагнитным полем с одновременным воздействием ультразвука успешно исследуется взаимодействие акустических волн с ядерной системой. Может быть, физическая природа гравитационных волн со временем тоже будет изучена путем косвенных исследований.

Данная работа вызвана желанием моего учителя У.Х.Ковиллема научиться предсказывать природные катаклизмы физическими методами.

Р.З.Шарипов

* * *

Как видим, автор вышеопубликованной статьи обнаруживает наличие связи между изменениями силы тяжести и пятнами “избыточной” и “недостающей” массы на поверхности земли и в атмосфере, с которыми связаны локальные землетрясения, тайфуны, ураганы. Учитывая эти закономерности, он предлагает новый подход к решению прогнозирования особо опасных катастрофических явлений в природе. Четырехлетние экспериментальные исследования на суше и на море с аппаратурой, разработанной им, подтверждают обоснованность его методики.

Актуальность этой проблемы и необходимость продолжения начатых экспериментов очевидны. Кроме того, метод Шарипова позволяет определять возмущения гравитационного поля в свободной атмосфере, что важно также для гравиметрических наблюдений на суше и море.

Р.Ф.Усманов,
старший научный сотрудник
Центра астрогеофизических
прогнозов, г.Москва