

А.В. Алексеев, Р.З. Шарипов

Микроволновая ультрарефрактометрия атмосферы

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Поступила в редакцию 17.09.2001 г.

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.

Введение

Показатель преломления (ПП) электромагнитных волн в атмосфере, зависящий в основном от метеорологических параметров, является, по существу, ее интегральной характеристикой. В 1988 г. в экспедиционном рейсе на научно-исследовательском судне «Профессор Богоров» для изучения динамических процессов в приземном слое атмосферы был использован модифицированный рефрактометр, работающий на частоте 10 ГГц. 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 приземном 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 4-летних непрерывных измерений собран большой материал по наблюдению интенсивных колебаний ПП с различной периодичностью. Обычно они предшествуют (примерно на двое – трое суток) прохождению циклонов или землетрясениям 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 как к предвестникам атмосферных циклонических фронтов, так и 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.

В [1] показано, что кратковременные и сезонные перемещения воздушных масс как регионального, так и местного характера могут быть вызваны возмущениями гравитационного поля, которые связаны с нарушением равновесного распределения масс в земной коре. Такое нарушение может быть стимулировано приливными си-

лами и с наибольшей вероятностью в зонах тектонических разломов. В результате возникают локальные пятна «избыточной» и «недостающей» масс, вызывающие локальный скачок силы тяжести. Избыточная масса в области неустойчивых тектонических образований может впоследствии стать очагом землетрясения со временем жизни, определяемым механоупругими свойствами подстилающих пород. 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.

Измерительный комплекс

Основой измерительного комплекса является высокоточный рефрактометр с рабочей частотой 10 ГГц, позволяющий измерять показатель преломления 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 представлена схема измерительного комплекса с воздуховодом, соединяющим пространство между оконными рамами с вентиляционным каналом. Оконное межрамное пространство выполняет роль заградительного фильтра для ВЧ-колебаний, связанных с трехмерной турбулентностью в атмосфере [4]. Воздуховод обеспечивает не 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. Подобная схема эксперимента дает совокупное представление о наблюдаемом процессе.

В качестве датчиков температуры использованы термисторы КМТ-17В, сопротивление которых регистрируется цифровыми вольтметрами В7-40, а влажность измеряется цифровыми приборами Е7-8, к которым подсоединены безынерционные гигрометры, изготовленные по принципу напыленных на ситаловую подложку встречных гребенок. Подобные конструкции используются для генерации поверхностных акустических волн в твердых телах [5].

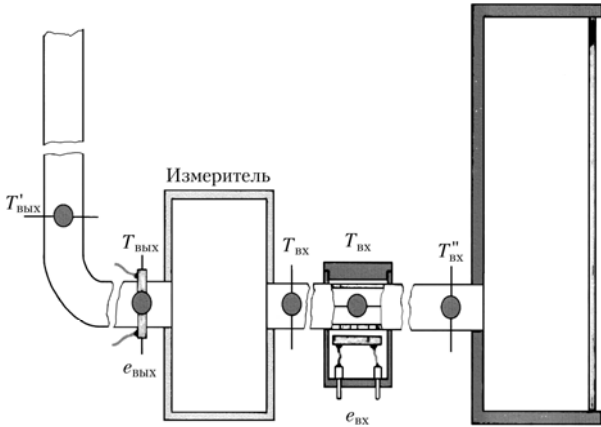


Рис. 1. Схема измерительного комплекса (межрамное пространство, расположенное справа, посредством воздуховода и измерительной ячейки соединяется с вентиляционным каналом). В воздуховодном канале в различных точках расположены датчики температуры и влажности, которые в зависимости от положения обозначены через $T_{ВХ}$, $T_{ВМХ}$ и $e_{ВХ}$, $e_{ВМХ}$.

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

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

Эта формула справедлива для цилиндрического резонатора: 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

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

тоже мало отличается от единицы. Поэтому для тонкого учета малой части после единицы пользуются коэффициентом преломления в « N -единицах», $N = (n - 1) \cdot 10^6$. В приземном слое атмосферы N меняется в пределах $150 \div 400$ ед.

На выходе прибора отсчитывается разность частот генераторов $\Delta f = f_b - f_a = N \cdot 10^4$ Гц. Здесь f_b – частота генератора с вакуумированным резонатором; f_a – частота генератора с открытым резонатором, связанным с атмосферой. 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 используемого метода, так как исключаются погрешности за счет дополнительных преобразований информации о ПП.

Другим положительным фактором является стабильность частоты генераторов, а отсюда и высокая чувствительность в определении N , так как основная погреш-

ность зависит от точности подстройки генераторов под собственные частоты резонаторов посредством системы стабилизации.

В основу прибора положена схема Грейна [2], 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 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 .

Рефрактومتر 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;
- 2) двух систем АПЧ, 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 АПЧ в обоих каналах (опорном и измерительном) частоты генераторов жестко привязаны к собственным частотам соответствующих резонаторов. Обе системы АПЧ идентичны.

Рассмотренной схеме прибора присущи следующие погрешности.

1. Систематическая погрешность, вызванная изменениями частот опорного и измерительного резонаторов за счет градиента температур между ними. В [3] показано, что при выполнении резонаторов в едином блоке из инвара максимально возможная амплитуда температурной волны составляет 0,02 К. При использовании термостата ее можно подавить до 0,007 К, что соответствует результирующей ошибке $\sim 7 \cdot 10^{-9}$.

2. Систематическая погрешность за счет постоянной времени обработки ошибки системой АПЧ. При определении этой ошибки оказалось, что отличие частоты генератора от собственной частоты резонатора при включенной системе АПЧ 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 равной примерно 10^{-8} .

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

Таким образом, абсолютная ошибка с учетом вышесказанного составит $\leq 10^{-8}$, что составляет $\pm 0,01 N$ -единиц. Такие характеристики прибора позволяют осуществить метрологическое обеспечение при измерении метеорологических параметров.

Зависимость N от метеопараметров выражается посредством соотношения

$$N = k_1 \frac{p}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2},$$

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

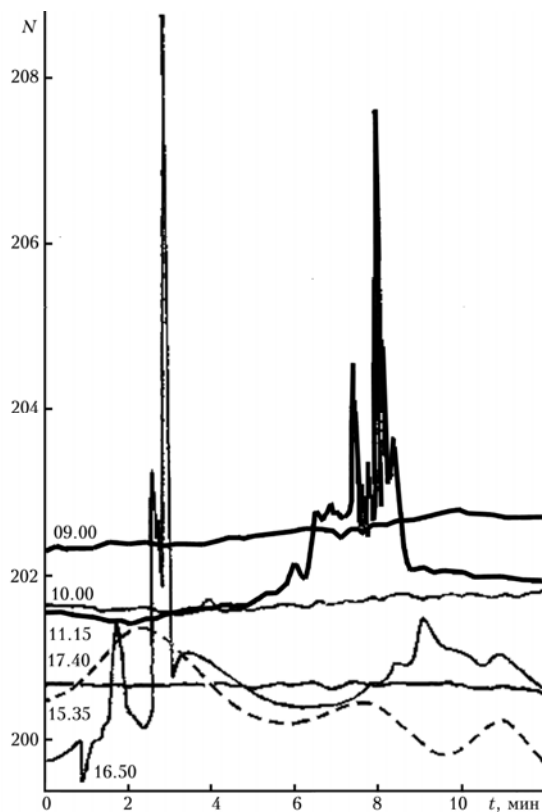


Рис. 2. Двенадцатиминутные фрагменты динамики показателя преломления, полученные накануне землетрясения на о. Шикотан в ночь с 04.10 на 05.10.1994 г.

Первые результаты, показывающие, что динамика N представляет собой интересный объект для предопределения грозовых процессов в гео- и тропосфере, были получены 4 октября 1994 г. во время прохождения циклонического ливня. В течение дня производились 12-минутные записи с дискретностью 2 с. Характер записи (рис. 2) имел различный вид, а амплитуда выбросов N в некоторые моменты составляла около 10% от нормального уровня. Это наблюдалось накануне сильного разрушительного землетрясения на о. Шикотан. Кроме того, в течение дня проводилась регистрация N и атмосферного давления с получасовым интервалом (рис. 3). Для сравнения на рис. 3 показан характер поведения тех же параметров 05.10.94 г. в «спокойный» день и 12.10.94 г. во время прохождения циклона, подобного тому, который был 04.10.94 г.

Очевидная разница в поведении N стимулировала постановку длительных непрерывных измерений и отработку оптимальной методики наблюдений. Сбор данных шел непрерывно с минимально возможной дискретностью 1 мин, а цифровые приборы были закольцованы и запускались по сигналам времени.

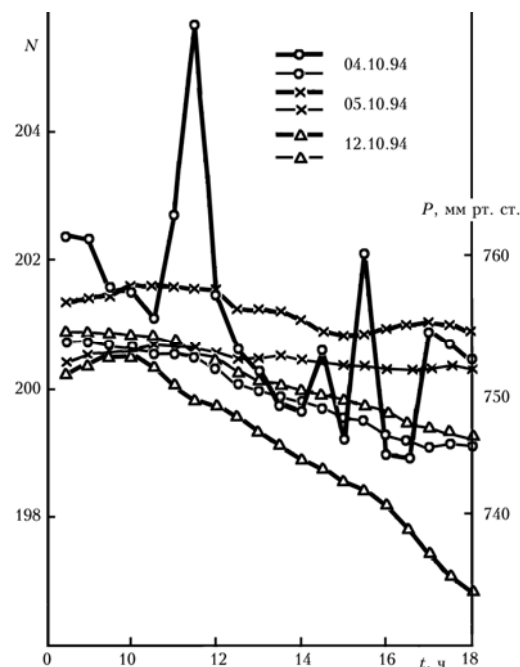


Рис. 3. Пример записи показателя преломления и атмосферного давления с получасовым интервалом. Утолщенные кривые относятся к показателю преломления (левая ордината), а тонкие – к атмосферному давлению (правая ордината)

Результаты наблюдений

За весь период наблюдений с октября 1994 г. по настоящее время 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 и картами погоды, получаемыми по спутниковой системе. За время постоянных наблюдений про-

изошло 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. Не полное совпадение с данными NEIC связано с тем, что измерения проводились в основном только в дневное время. Диапазон флуктуаций ПП простирается от менее 10^{-3} до нескольких герц.

На рис. 4 иллюстрируется взаимосвязь ПП с влажностью e , измеренной в резонаторе, и с температурами на входе и выходе резонатора. Наблюдается полное согласие ПП с влажностью в резонаторе.

Здесь приблизительно в 14.30 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 15.30 появились признаки приближающегося тайфуна «Тина».

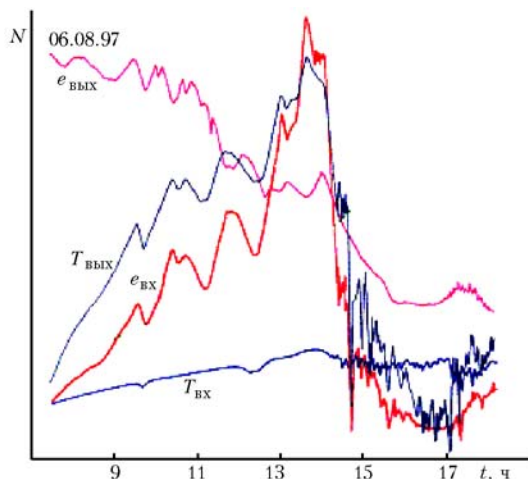


Рис. 4. Взаимосвязь показателя преломления с влажностью в резонаторе и с температурами на входе и выходе резонатора

Большой интерес представляет эффект «встречных» колебаний температур на входе и выходе резонатора. Он наблюдается при определенном расстоянии между датчиками температуры на фоне интенсивных флуктуаций ПП и, по-видимому, связан с термоакустическими колебаниями. Подобный эффект наблюдается в газообразном гелии, находящемся в трубке с открытыми концами, на которых есть перепад температур [9]. В трубке возникают продольные колебания. Энергия этих колебаний может быть достаточно большой, и в область более низких температур может передаваться значительное количество тепла. N синфазно флуктуирует с температурой на входе резонатора и противофазно с температурой на выходе. По максимуму противоколебаний температур можно определить половину длины волны этих колебаний. В зимнее время эта величина в 3–4 раза больше. Термоакустические колебания свидетельствуют об активности атмосферы.

Обсуждение результатов

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

Следует учитывать также то, что Земля является частью системы небесных тел. 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 оказывается 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. Под влиянием гравитационных сил луно-земного притяжения происходит вертикальное смещение литосферы вдоль линии разлома. В этой области может возникнуть некоторый «избыток» массы за счет обрушения или перетока вещества. 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.

Кратковременные перемещения атмосферных масс регионального характера вызывают возмущения гравитационного поля до 15–20 мкГал. И наоборот, если такое изменение стимулировано «избыточной» массой, то возмущения генерируются соответственно в атмосфере. Иногда за счет тех же сил вместо избытка массы может возникнуть ее недостаток. Тогда появляется вероятность мезомасштабной аномалии по причине локальной депрессии атмосферного давления. Нормально стратифицированное состояние атмосферы из устойчивого переходит в возбужденное и становится дополнительным источником атмосферного инфразвука.

Таким образом, можно сделать заключение, что «избыток» массы локального характера или ее «недостаток» могут быть соответственно очагом будущего землетрясения. 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.

Атмосфера может сигнализировать о локальных изменениях в литосфере. Сигнал к такому детектору поступает в виде инфразвуковых колебаний, которые возникают в результате локального скачка силы тяжести Δg . Таким образом, контролируя тонкие изменения в состоянии атмосферы, можно обеспечить мониторинг быстрых геофизических процессов. В настоящее время существуют определенные данные по перестройке атмосферы и возникновению над активизирующимися разломами протяженных облачных линейных аномалий [6].

В последнее время накоплено много сведений [7, 8] об изменениях гравитационного поля Земли во времени. Геодинамические полигоны для измерения силы тяжести организованы в Южной Калифорнии, Японии, Северной Исландии. Эти измерения проводятся с одновременным нивелированием поверхности Земли. На указанных полигонах четко фиксируются изменения силы тяжести, вызываемые совокупностью явлений, предвещающих или сопровождающих извержение вулканов. В ряде случаев зафиксировано изменение гравитационного поля Земли до и после сильных землетрясений. Эти изменения коррелируют с изменениями высот.

Наконец, необходимо сделать главное 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 [10]. 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 [11].

Оценки возможных изменений силы тяжести с учетом размеров очагов землетрясений [13] на пятнах повышенной плотности избыточной массы значительно превосходят 10^{-7} – 10^{-8} относительного уровня, который могут различить пружинные гравиметры. Совсем не случайно в последние годы много внимания уделяется изучению локальных изменений гравитационного потенциала на геодинамических полигонах. Целью этих исследований в первую очередь является выяснение возможности по изменениям силы тяжести на поверхности Земли получить информацию о перемещениях масс в земной коре, вызываемых подготовкой землетрясений [12].

Выводы

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. Предлагаемая точка зрения также не отвергает того, что внутренние гравитационные волны, генерируемые различ-

ными тропосферными возмущениями, представляют собой интересный объект для метеорологических наблюдений.

Возможно, что в атмосферных возмущениях косвенно проявляются гравитационные волны, порождаемые ускоренным движением масс в верхней мантии во время действия приливных сил. Согласно [14] 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 ряду проблемы обнаружения прямого поглощения ультразвука ядерной спин-системой в физике твердого тела [15]. Хотя эти проблемы по сложности не сопоставимы, можно отметить некоторые аналогии.

Так, коэффициент решеточного (фонового) поглощения в хороших акустических материалах имеет величину порядка 10^{-2} см⁻¹, коэффициент поглощения ультразвука за счет спин-фононной 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 этого 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 [16–18].

1. Деулит П.Д., Файтельсон А.Ш. Учет влияния атмосферы при изучении вековых изменений силы тяжести // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1976. Вып. 83. С. 182–184.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
3. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
4. Grain C.M. Apparates for recording fluctuation in the refractive index of the atmosphere at 3.2 cm // Rev. Sci. Instrum. 1950. V. 21. P. 456–461.
5. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976. 196 с.
6. Роуз А. Инструментальная техника низкотемпературного эксперимента. М.: Мир, 1966. 214 с.
7. Морозова Л.И. Спутниковый мониторинг землетрясений // Вестник ДВО РАН. 2001. № 2 (96). С. 18–27.
8. Yoichiro Fujii. Seismic crustal movement and associated gravity change // J. Geod. Soc. Jap. 1976. V. 22. № 4. P. 275–282.
9. Hagiwara Yukio. Gravity changes associated with seismic activity // J. Phys. Earth Supp. 1977. V. 23. № 2. P. 371–377.
10. Буланже Ю.Д. Некоторые результаты изучения неприливных изменений силы тяжести // Геотектоника. 1983. № 5. С. 8–19.
11. Брагинский В.Б. Экспериментальная проверка теории относительности. М.: Знание, 1977. 63 с.
12. Балакина Л.М. Землетрясения Тихого океана (пространственное расположение и процессы в очагах) // Геотектоника. 1983. № 5. С. 20–35.
13. Уайт Г.К. Экспериментальная техника в физике низких температур. М.: Мир, 1961. 368 с.
14. Балакин А.Б. Параметрическое воздействие гравитационных волн на кинетические системы // Гравитационная энергия и гравитационные волны. Дубна, 1992. С. 154–161.
15. Копиллем У.Х., Корепанов В.Д. Генерация гиперзвука при насыщении парамагнитного резонанса в кристаллах // Физ. тверд. тела (С.-Петербург). 1961. Т. 3. № 7. С. 2014–2022.
16. Proctor W.G., Tantilla W.H. Saturation of Nuclear Electric Quadruple Energy levels by Ultrasonic Excitation, // Phys. Rev. 1955. V. 98. № 6. P. 1855–1869.

17. Владимирцев Ю.В., Голенищев-Кутузов В.А. Методы исследования акустического парамагнитного поглощения на частотах 10^6 – $2 \cdot 10^8$ Гц // Приборы и техн. эксперим. 1967. № 4. С. 125–128.

18. Владимирцев Ю.В., Голенищев-Кутузов В.А., Шамуков Н.А., Аверьянов И.С. Акустическое насыщение линий ЯМР // Физ. тверд. тела (С.-Петербург). 1967. Т. 9. С. 2426–2428.

A.V. Alekseev, R.Z. Sharipov. Microwave ultra-refractometry of the atmosphere.

The analysis of the refractive index (RI) data at the frequency of 10 GHz shows that the RI fluctuation character may give the short-range forecasting of geo- and tropospheric catastrophes. The data set includes more than four-year observations. The mechanisms of the earthquake focal point formation are proposed. One more possible infrasound source in the atmosphere is under discussion.