

УДК 550.388.2

## Перспективы развития исследований атмосферы и ионосферы с использованием искусственного акустического воздействия

А. А. Негода<sup>1</sup>, С. А. Сорока<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національне космічне агентство України, Київ

<sup>2</sup>Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України та НКА України

*Надійшла до редакції 15.03.99*

---

Розглянуто питання дослідження атмосфери та іоносфери з використанням активного акустичного збудження наземним випромінювачем для розв'язку задач прикладної геофізики. Сформульовано математичну постановку задачі відбору інформації. Показано, що створення мобільного комплексу для регулярного вивчення електромагнітних відгуків при акустичному збудженні атмосфери та іоносфери розширить можливості експериментального дослідження ряду геофізичних явищ, взаємозв'язків в системі літосфера—іоносфера.

---

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОТБОРА ИНФОРМАЦИИ ИЗ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ. ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРУ

В последние три десятилетия развиваются методы диагностики атмосферы и ионосферы с использованием управляемых искусственных воздействий. Здесь имеются в виду высокоэнергетические воздействия, существенно изменяющие параметры среды. Как пример можно привести мощные электромагнитные нагревные стенды для исследования ионосферы. К этим методам следует отнести и исследования с использованием взрывов, крупномасштабных выбросов в атмосферу и ионосферу химических веществ. Невзирая на большую эффективность, эти исследования в последнее время проводятся редко ввиду их экологической опасности. В данной работе рассмотрена возможность использования для исследования атмосферы и ионосферы акустического воздействия с энергетикой, эквивалентной шуму самолетного реактивного двигателя. С экологической точки зрения такое воздействие не представляет опасности, а возможности исследова-

ний взаимосвязи процессов в системе литосфера — ионосфера будут расширены. Таким образом ставится задача создания «акустического нагревного» стенда.

Целью работы является определение особенностей и перспектив использования акустического возбуждения атмосферы и ионосферы мощным наземным источником для решения задач прикладной геофизики.

Для определения общих требований к системе отбора информации из атмосферы и ионосферы с активным воздействием будем рассматривать ее как некоторую абстрактную систему (рис. 1). По аналогии с теорией систем [6, 20] можно ввести понятие наблюдаемости исследуемой среды. Наблюдаемость исследуемой среды — это такое свойство системы отбора информации, в которой по входным воздействиям и наблюдаемым выходным реакциям можно восстановить параметры исследуемой среды.

Интуитивно понятно, что наблюдаемость исследуемой среды и установление закономерностей взаимосвязи ее различных частей и процессов зависит от управляемости входного воздействия и наблюда-

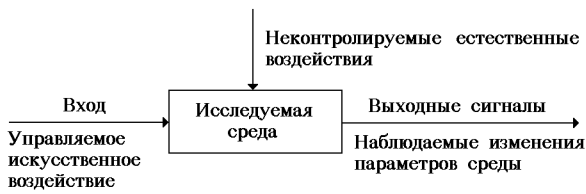


Рис. 1. Обобщенная схема отбора информации с активным воздействием

емости выходных реакций исследуемой среды. Управляемость входных воздействий требует, чтобы каждое состояние исследуемой среды было чувствительно к входному воздействию, а наблюдаемость требует, чтобы каждое состояние среды влияло на измеряемые выходные сигналы. Формально можно записать соотношение:

Наблюдаемость среды = Управляемость входного воздействия + Наблюдаемость выходных реакций.

Из этого соотношения следует, что наблюдаемость среды может быть обеспечена как за счет повышения управляемости входных воздействий, так и за счет повышения наблюдаемости выходных реакций. Система активного воздействия является полностью управляемой, если с помощью воздействий можно возбудить все виды колебаний исследуемой среды. Аналогично понятию полностью управляемой системы воздействия можно ввести понятие полной наблюдаемости системы регистрации выходных реакций. Система регистрации выходных реакций обладает свойством полной наблюдаемости, если по ее данным можно восстановить все виды колебаний исследуемой среды. На практике вследствие физических и технических ограничений невозможно создание полностью управляемых систем воздействия и систем регистрации выходных реакций, обладающих свойством полной наблюдаемости. Даже простое ограничение пространственной области, в которой производятся измерения выходных реакций, приведет к уменьшению наблюдаемости. Таким образом, не существует систем отбора информации с полностью наблюдаемыми выходными реакциями. В случае неконтролируемых внешних воздействий обеспечить полную наблюдаемость выходных реакций невозможно. Все реальные системы отбора информации из среды не полностью управляемы и не полностью наблюдаемы. С практической точки зрения проблема заключается в следующем: создавать ли для решения некоторой задачи сложную дорогую систему наблюдения с полностью неизвестным (частично известным) входом или создавать более простую систему наблюдения с использованием известного ис-

кусственно созданного воздействия? В некоторых случаях сложная дорогостоящая система наблюдения не позволит решить задачу наблюдения или она будет решаться слишком долго. Таким образом, входное известное воздействие должно облегчить задачу наблюдения параметров среды.

Такая общая постановка задачи отбора информации из среды с активным воздействием имеет скорее методологическое значение и может быть использовано при выборе общей схемы построения системы отбора информации. При ее построении необходимо уточнять понятия наблюдаемости среды, управляемости входных воздействий и наблюдаемости выходных реакций. Кроме этого, должны быть даны их количественные оценки. При отсутствии математической модели среды это можно сделать на основе информационных оценок по аналогии с теорией связи. Эти оценки только позволяют определить предельные возможности системы отбора информации, однако не дадут ответа на то, как технически реализовать систему.

В абстрактном изложении систему отбора информации из среды можно представить в виде схемы

$$a \rightarrow m \rightarrow s \rightarrow m', \quad (1)$$

где  $a$  — входное воздействие из пространства возможных значений  $\tilde{A}$ ,  $m$  — параметры исследуемой среды из пространства возможных значений  $M$ ,  $s$  — выходная реакция из пространства возможных значений  $S$ ,  $m'$  — восстановленные параметры среды. Под входным воздействием  $a$  среда перейдет из состояния  $m_0$  в  $m_1$ , а наблюдаемые сигналы реакции — из  $s_0$  в  $s_1$ . По выходным сигналам  $s$  восстанавливают параметры среды  $m'$ . Схему (1) можно интерпретировать как систему передачи информации, в которой кодирование и передача совмещены в одном канале. Операции преобразований по схеме (1) можно характеризовать условными распределениями

$$Pm | a = P(m \in \tilde{M}_i | a = \tilde{a}), \quad (2)$$

$$Ps | a = P(s \in \tilde{S}_i | m = \tilde{m}), \quad (3)$$

$$Pm' | s = P(m' \in \tilde{M}'_i | s = \tilde{s}). \quad (4)$$

Условные распределения вероятностей (2)—(4) характеризуют работу системы отбора информации. Качество работы системы определяется совместным распределением вероятности

$$P_{mm'} \in W, \quad (5)$$

где  $W$  — некоторый класс совместных распределений. Операцию  $m \rightarrow s$  можно рассматривать как передачу и одновременно кодирование параметров

среды. Эта операция зависит от входного воздействия и возможностей системы регистрации реакций среды.

Из предположения, что последовательность  $a, m, s, m'$  марковская, следует весьма общее необходимое условие отбора информации из среды [13, 21]:

$$\inf_{P_{mm'} \in W} I(m, m') \leq \sup_{P_m \in W} I(s, m), \quad (6)$$

где величина слева, рассчитанная на единицу времени, характеризует скорость создания информации, а величина справа — пропускную способность канала отбора информации;

$$I(m, m') = \int_{\tilde{M}} \int_{\tilde{M}'} P_{mm'}(d\tilde{m}d\tilde{m}') \log_2 \frac{P_{mm'}(d\tilde{m}d\tilde{m}')}{P_m(d\tilde{m})P_{m'}(d\tilde{m}')}, \quad (7)$$

$$I(s, m) = \int_{\tilde{S}} \int_{\tilde{M}} P_{sm}(d\tilde{s}d\tilde{m}) \log_2 \frac{P_{sm}(d\tilde{s}d\tilde{m})}{P_s(d\tilde{s})P_m(d\tilde{m})}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) записаны для случайных объектов  $m, S$  и  $m'$  общей природы, которые могут быть векторами, функциями и т. п. В частном случае, когда распределения вероятностей можно представить в виде

$$\begin{aligned} P_m(\tilde{M}_i) &= \int_{\tilde{M}_i} p_m(\tilde{m})d\tilde{m}, \\ P_{m'}(\tilde{M}'_i) &= \int_{\tilde{M}'_i} p_{m'}(\tilde{m}')d\tilde{m}', \\ P_{mm'}(W_i) &= \int_{\tilde{W}_i} p_{mm'}(\tilde{m}, \tilde{m}')d\tilde{m}d\tilde{m}' \end{aligned} \quad (9)$$

и аналогичном представлении  $P_s$  и  $P_{sm}$ , выражения (7) и (8) можно записать в виде

$$I(m, m') = \int_{\tilde{M}} \int_{\tilde{M}'} P_{mm'}(\tilde{m}\tilde{m}') \log_2 \frac{P_{mm'}(\tilde{m}\tilde{m}')}{P_m(\tilde{m})P_{m'}(\tilde{m}')} d\tilde{m} d\tilde{m}', \quad (10)$$

$$I(s, m) = \int_{\tilde{S}} \int_{\tilde{M}} P_{sm}(\tilde{s}\tilde{m}) \log_2 \frac{P_{sm}(\tilde{s}\tilde{m})}{P_s(\tilde{s})P_m(\tilde{m})}. \quad (11)$$

При построении некоторых систем отбора информации предметом интереса исследователей является не сама среда, а параметры входного воздействия. В этом случае система отбора информации может быть представлена схемой

$$a \rightarrow m \rightarrow s \rightarrow a', \quad (12)$$

где, как и в схеме (1),  $a$  — входное воздействие,  $m$  — параметры среды,  $s$  — сигналы (выходные реакции среды),  $a'$  — восстановленные параметры входного воздействия, а пространства их возможных значений —  $\tilde{A}, \tilde{M}, \tilde{S}, \tilde{A}'$ . Заданы также классы допустимых распределений величин  $a$  и  $m$ :

$$\begin{aligned} P_a(\tilde{A}_i) &= P(a \in \tilde{A}_i), \\ P_m(\tilde{M}_i) &= P(m \in \tilde{M}_i). \end{aligned}$$

В частности, по такой схеме можно рассматривать задачи обнаружения аномальных естественных явлений и их предвестников по наблюдениям ионосферных эффектов средствами наземного и космического базирования. Наиболее известной является задача обнаружения предвестников землетрясений по спутниковым наблюдениям параметров ионосферной среды.

Так же, как и в схеме отбора информации (1), в схеме (12) условные вероятности

$$Pm|a = P(m \in \tilde{M}_i | a = \tilde{a}), \quad (13)$$

$$Ps|m = P(s \in \tilde{S}_i | m = \tilde{m}) \quad (14)$$

характеризуют преобразования входных воздействий, в изменения параметров среды  $m$  и преобразования последних в наблюдаемые сигналы в системе регистрации реакций среды. Качество работы системы отбора информации задается совместным распределением вероятности

$$P_{aa'} \in W.$$

Полагая, что последовательность  $a, m, s, a'$  — марковская, можно записать выражение, аналогичное (6):

$$\inf_{P_{aa'} \in W} I(a, a') \leq \sup_{P_m \in W} I(s, m), \quad (15)$$

Величины  $I(a, a')$  и  $I(m, s)$  описываются выражениями, аналогичными (7), (8), а при условиях типа (9) (Шенновский случай) — выражениями (10), (11). Величина  $I(a, a')$  определяет количество информации в восстановленном воздействии  $a'$  относительно входного воздействия  $a$ . Аналогичную интерпретацию имеет величина  $I(m, s)$ . Левая часть неравенства (15) характеризует информационную производительность, необходимую для решения задачи с заданной точностью  $P_{aa'} \in W$ , а правая — пропускную способность канала отбора информации. В общем случае пропускная способность канала отбора информации определяется распределением условной вероятности  $Ps|m$ , которая в свою очередь зависит от параметров системы регистрации сигналов реакции среды и сигналов помех.

Правильная постановка задачи отбора информации требует соблюдения условий (6) или (15). В отличие от классической задачи передачи информации в системах отбора информации часто отсутствуют данные о параметрах входных воздействий и даже их физический переносчик не всегда известен. Это значительно усложняет задачу построения системы отбора информации. Создание системы отбора информации должно включать следующие этапы.

1. Получение исходных данных об исследуемой среде. Построение модели системы отбора информации.

2. Верификация модели системы с использованием априорно известных входных воздействий.

3. Изучение помеховой обстановки.

4. Оптимизация параметров системы отбора информации.

Согласно п. 2 для проверки модели системы отбора информации необходимо создать на входе исследуемой среды известное воздействие. Это можно реализовать путем создания искусственного воздействия или используя естественное явление с известными параметрами. Так, в задаче поиска ионосферных предвестников землетрясений используют само землетрясение. Сложность такого подхода заключается в том, что практически невозможно согласовать нахождение спутниковой измерительной системы над зоной землетрясения. Отсутствуют точные данные о параметрах землетрясения. Возможные каналы физического воздействия сейсмической активности на ионосферную среду показаны на рис. 2.

Для оценки пропускной способности канала литосфера — ионосфера целесообразно использовать искусственные воздействия с заданными параметрами. Исследование канала литосфера — ионосфера на основе использования в качестве входных воздействий естественных процессов, например землетрясений, может оказаться крайне длительным и дорогим.

Управляемое воздействие на околоземную среду можно реализовать по двум физическим каналам — электромагнитному и акустическому. Общая схема активной системы отбора информации из околоземной среды показана на рис. 3. Для активного воздействия на ионосферу наиболее часто используют мощные электромагнитные нагревные стенды [5, 7, 8]. Эксперименты с акустическим воздействием проводились значительно реже — акустическое возбуждение ионосферы связывалось с большими мощностями и использовались взрывные методы генерации акустических волн. Полагалось, что ощутимый эффект воздействия на ионосферу можно получить при взрывах зарядов около 100 т тротилового эквивалента [11]. Для исследования особенностей акустического канала связи литосферных и ионосферных процессов было проведено несколько крупных взрывов [12]. Вследствие большой стоимости такие исследования в настоящее время практически не проводятся. Однако некоторые особенности акустического воздействия на околоземную среду ставят их в ряд весьма перспективных направлений.

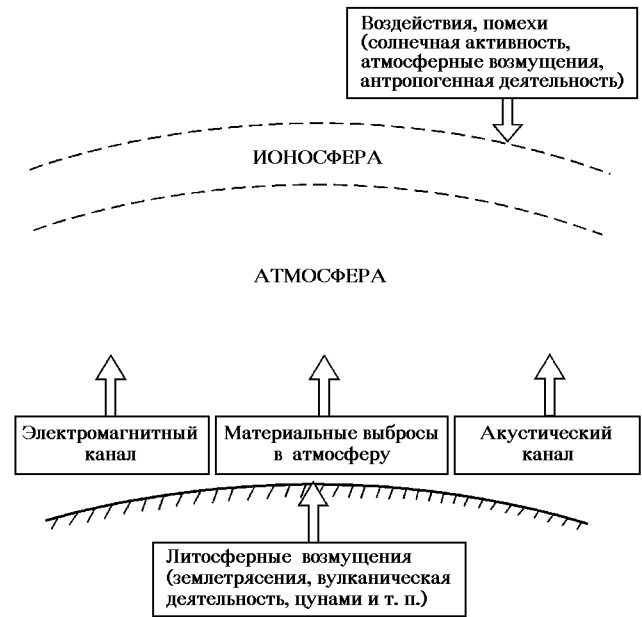


Рис. 2. Физические каналы взаимодействия в системе литосфера — ионосфера

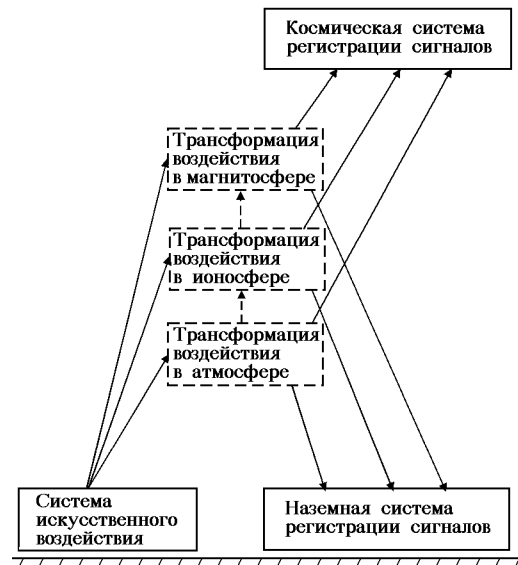


Рис. 3. Общая схема активной системы отбора информации из околоземной среды с наземным искусственным воздействием

В отличие от электромагнитных волн, акустические волны, возбужденные на поверхности Земли, взаимодействуют как с нейтральной атмосферой, так и с ионосферой. Возможные акусто-электромагнитные эффекты и причины их возникновения показаны на схеме (рис. 4).

В приземном слое атмосферы акустическое воздействие может порождать низкочастотные элект-



Рис. 4. Возможные акусто-электромагнитные эффекты в атмосфере и ионосфере и их причины

ромагнитные колебания за счет взаимодействия с атмосферными электрическими зарядами. В работах [16, 17] теоретически показано, что заряды различной физической природы увлекаются акустическим импульсом и могут создавать в окружающем пространстве и на поверхности Земли электрические поля в диапазоне десятков герц. Не исключено, что возможны электромагнитные колебания на более высоких частотах за счет иных механизмов генерации. В частности, это может быть результат крупномасштабной перестройки электрических полей вследствие локального акустического возмущения.

Акустическое воздействие в средней атмосфере, вероятно, будет оказывать влияние на химические процессы взаимодействия возбужденных солнечным излучением молекул. Принципиально существует возможность нарушения равновесия фотохимических процессов [3, 10, 15]. При больших запасах колебательной энергии молекул на средних высотах дополнительное акустическое воздействие может вызывать свечение воздуха. Наиболее многочисленные эффекты должно вызывать вторжение акустической волны в ионосферную плазму (высота  $H > 90$  км). Теоретическим вопросам исследования акустического воздействия на ионосферу посвящены многочисленные работы [1, 2, 18, 19], а экспериментальным значительно меньше.

Не останавливаясь на деталях, перечислим возможные акусто-ионосферные эффекты. 1. Образование мелкомасштабной турбулентности. 2. Модуляция ионосферных токов. 3. Запуск механизмов плазменных неустойчивостей. 4. Образование коле-

бательных макроструктур.

В результате этих эффектов возникают вторичные явления, которые заключаются в изменении характера прохождения через ионосферу и отражения от нее радиосигналов КВ-диапазона, генерации геомагнитных пульсаций, возбуждении электромагнитных колебаний в высокочастотных диапазонах.

Таким образом, прохождение акустической волны в промежутке литосфера — ионосфера на каждой высоте может сопровождаться возбуждением специфических электромагнитных сигналов. Все эти сигналы можно регистрировать измерительными системами наземного и космического базирования. При наличии знаний относительно механизмов их образования можно восстановить параметры и взаимосвязь процессов в цепочке литосфера — ионосфера. Возможность многократного повторения возбуждения в различных географических зонах и различной помеховой обстановки позволит оценить информационную эффективность акустического канала в системе литосфера — ионосфера и реальность его практического использования.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАНАЛА ЛИТОСФЕРА — ИОНОСФЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Для обнаружения электромагнитных откликов из атмосферы и ионосферы при акустическом воздействии был создан измерительный комплекс, в состав которого входили: мощный акустический излучатель, устройство измерения электрических полей, магнитометр, измерительный приемник, радиотелескоп УРАН-3 и система цифровой регистрации сигналов.

Акустический излучатель состоял из двух секций, каждая генерировала звуковые колебания на частотах около 600 и 1200 Гц. Небольшая разность (10—30 Гц) между частотами секции позволяла получать низкочастотные колебания за счет параметрического взаимодействия в атмосфере. Наличие низкочастотных компонентов звука позволяло возбуждать атмосферные слои на больших высотах. Вследствие уменьшения атмосферного давления с высотой амплитуда акустических колебаний должна увеличиваться, и можно было ожидать значительных возмущений в ионосфере [22].

Общая схема измерительной системы для обнаружения акусто-электромагнитных эффектов показана на рис. 5. Акустическое воздействие варьировалось по длительности от 10 с до 100 с. Было замечено, что увеличение длительности воздействия сверх 100 с и повторные воздействия через

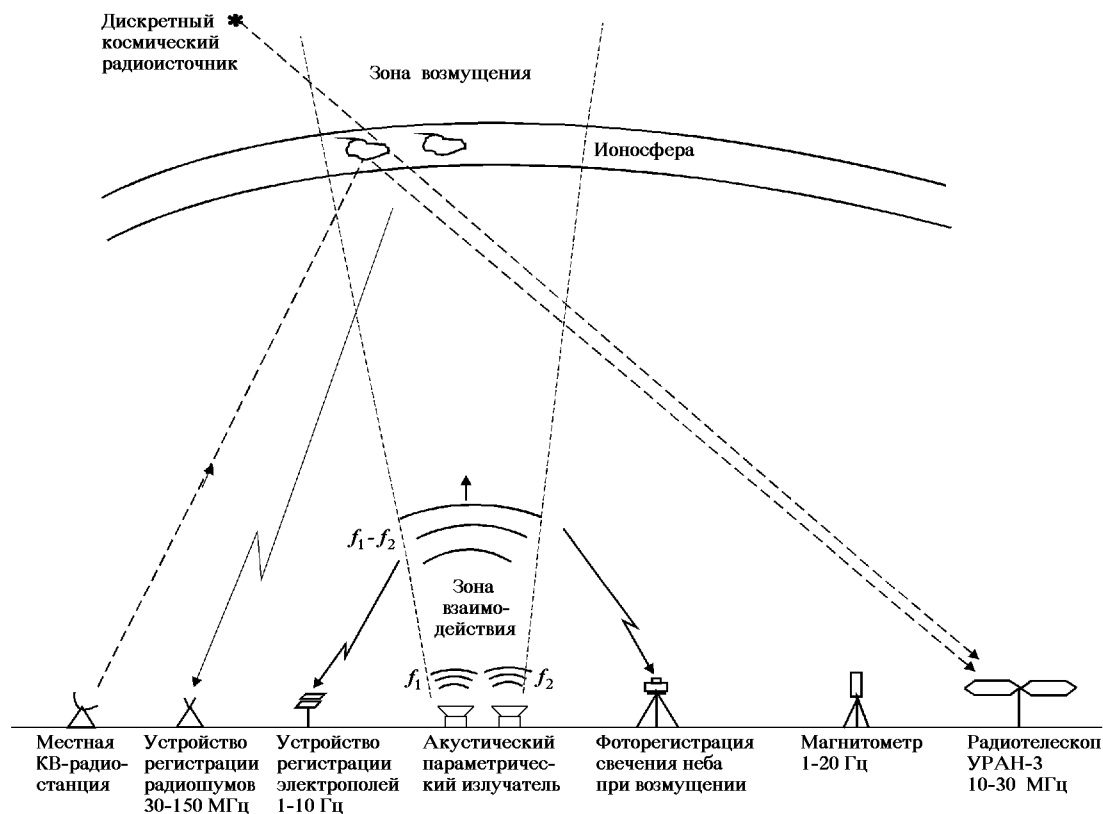


Рис. 5. Общая схема обнаружения акусто-электромагнитных эффектов в атмосфере и ионосфере

несколько минут усложняют интерпретацию откликов и не всегда их увеличивают. В основном акустическое воздействие длилось 50—60 с. Были проведены следующие измерения:

- электрического поля в диапазоне 1—40 Гц,
- электромагнитных шумов в диапазоне 25—30 МГц, 150 МГц,
- магнитных сигналов в диапазоне 1—20 Гц,
- сигналов дискретных космических радиоисточников, прошедших через возмущенную ионосферу на частоте 25 МГц,
- сигналов местных радиостанций, отраженные от возмущенной ионосферы.

Электрические сигналы регистрировались практически с первых секунд после включения акустического генератора или с запаздыванием на десятки секунд. Причиной появления акусто-электрических эффектов скорее всего является взаимодействие акустической волны с объемными зарядами в атмосфере, что предвиделось в работах [16, 17]. На рис. 6 представлен образец записи электрического сигнала в диапазоне 1—30 Гц. Наблюдаемые сигналы сильно зависели от погодных условий.

Весьма перспективным направлением исследо-

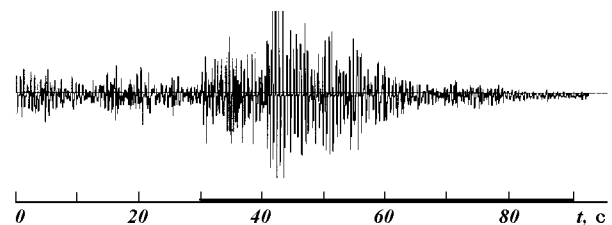


Рис. 6. Электрический сигнал в момент акустического возмущения (длительность возмущения отмечена жирной линией)

вания атмосферы и ионосферы является измерение радишумов на частотах выше 25 МГц. Как показали эксперименты, сигналы радишумов могут поступать с любых высот, начиная с момента включения акустического генератора, т. е. с высоты  $H = 0$ . На рис. 7 представлена огибающая сигнала на 30 МГц в момент работы генератора звука. Сигнал носит шумовой характер с наличием частот, кратных частоте акустического возбуждения. Сигналы с запаздыванием появлялись в основном через 5 и 40 мин после акустического возбуждения. На рис. 8 представлена характерная запись вспле-

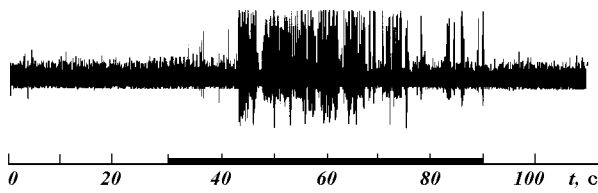


Рис. 7. Радишумы на частоте 30 МГц в момент акустического возмущения

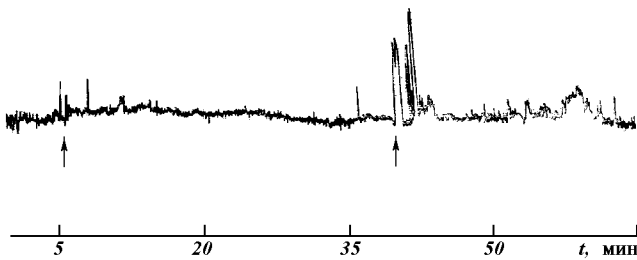


Рис. 8. Всплески радишумов на 5-й и 40-й мин

сков радишумов. Запаздывание около 5 мин легко объясняется временем, необходимым для достижения акустической волной нижней ионосферы. Запаздывание около 40 мин не имеет простого объяснения, и для выяснения причин столь большого запаздывания необходимы дополнительные исследования.

Проведены немногочисленные наблюдения свечения ночного неба после прохождения акустической волны. Трудность этих экспериментов заключалась в том, что их можно было проводить в хорошую погоду и при отсутствии Луны. Регистрация свечения проводилась фотографическим методом с последующим фотометрированием фотопленки вдоль средней линии кадра. На рис. 9, *a* приведены профили почернения негативов в относительных единицах через каждые 2 мин (пунктиром обозначены профили почернения до акустического воздействия, сплошной линией — после). На рис. 9, *б* показано изменение плотности почернения со временем. Вертикальной пунктирной линией на рис. 9, *б* отмечен момент акустического воздействия. Уровень свечения после акустического возбуждения увеличился почти на 40 %. Работы в этом направлении целесообразно продолжить для набора статистики и достоверной интерпретации результатов. Однако даже в тех экспериментах, что уже проведены, небольшое увеличение свечения наблюдалось в большинстве случаев. В качестве примера приведен лучший результат.

По аналогии с работами по электромагнитному нагреву ионосферы [5] была сделана попытка регистрации геомагнитных пульсаций при акустиче-

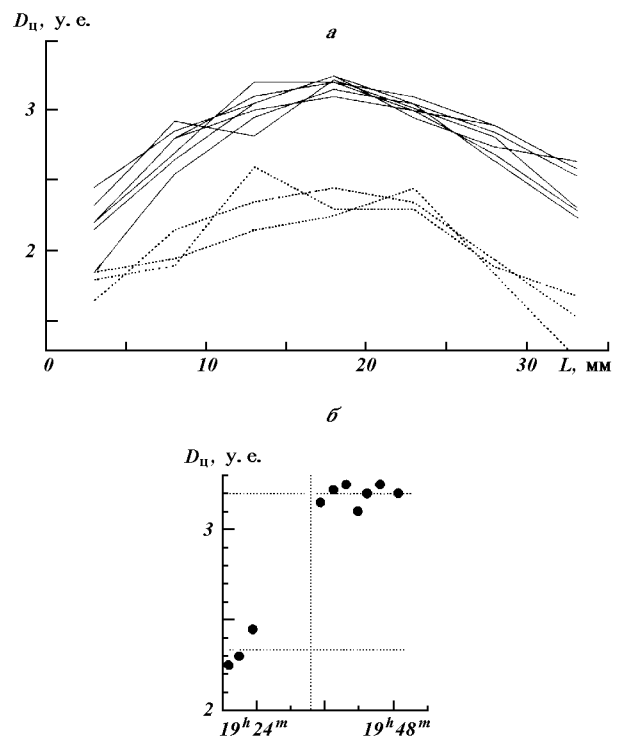


Рис. 9. Результаты наблюдения 26.01.98 г. свечения ночного неба при акустическом возмущении: *a* — кривые почернения негативов до и после возбуждения (сплошная линия); *б* — изменение плотности почернения со временем (вертикальной линией отмечено воздействие)

ском возбуждении ионосферы. Геомагнитные вариации являются важным информационным параметром при исследованиях сейсмо — ионосферных связей. Доступность и относительная простота реализации аппаратуры ставит магнитометрические исследования ионосферы в ряд наиболее важных методов получения информации о процессах в ионосфере. Комплексация магнитометрических измерений с управляемым акустическим воздействием подняло бы их на качественно новый уровень. Эксперименты, проведенные в 1997—1998 гг. подтвердили возможность акустического возбуждения геомагнитных пульсаций. Пульсации наблюдались в диапазоне 1—10 Гц и носили характер моногармонических или полигармонических сигналов. Наиболее часто наблюдались частоты 3, 4.3, 5.3, 7 Гц. Вероятно, механизм генерации магнитных сигналов связан с модуляцией акустической волной проводимости в *E*-слое. Модуляция проводимости обусловлена изменением частоты соударений частиц в акустической волне и нарушением ионизационно-рекомбинационного баланса.

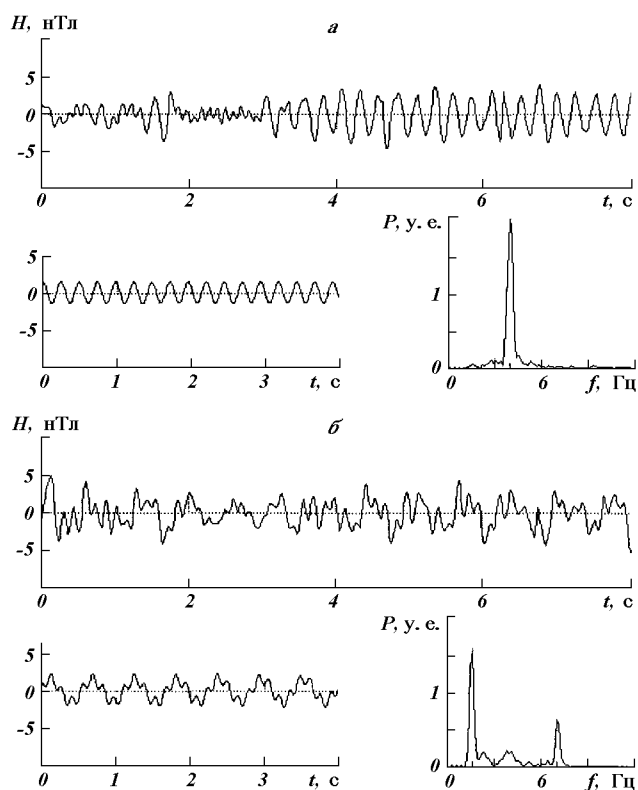


Рис. 10. Магнитные сигналы при акустическом возмущении: а — одночастотный, б — двухчастотный

На рис. 10 показаны примеры записи магнитных сигналов: реализация записи, отфильтрованный сигнал и спектральная плотность реализации. Сигналы превышали уровень помех в 2–3 раза и составляли 3–5 нТл с длительностью порядка длительности акустического воздействия или меньше. Время появления сигналов — 5–6 мин после акустического воздействия, что соответствует времени распространения акустической волны до высоты 90–120 км. Очень часто наблюдались сигналы в момент, близкий к 40-й мин после акустического воздействия. Эта закономерность проявлялась во всех экспериментах — наблюдениях радишумов, наблюдениях ионосферных возмущений «на просвет» с использованием радиотелескопа УРАН-3. Вероятно, это результат откликов магнитосферного резонатора на ионосферные возмущения.

Были проведены многочисленные эксперименты по наблюдению ионосферных возмущений при акустическом воздействии методом «на просвет», с использованием дискретных космических радиисточников, и «на отражение», с использованием радиосигналов местных радиостанций. Детально

результаты этих экспериментов описаны в работе [14]. Можно отметить только, что ионосферные возмущения при акустическом воздействии были зафиксированы в большинстве экспериментов, и время их наблюдения совпадало со временем наблюдения акусто-электромагнитных эффектов в других экспериментах.

Таким образом, результаты большинства экспериментов подтвердили возможность возбуждения ионосферы наземным акустическим излучателем. Отсутствие эффектов в части экспериментов можно объяснить ветровой и температурной рефракцией акустической волны и возвратом ее на поверхность Земли. Так, отрицательные результаты наблюдались в основном в плохую погоду.

Исследование канала литосфера — ионосфера с использованием наземного управляемого акустического излучателя значительно дешевле взрывных методов, используемых в эксперименте МАССА и др. [12]. Новый метод воздействия на ионосферу значительно дешевле и электромагнитных нагревных стенов.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Полученные экспериментальные результаты по акусто-электромагнитным эффектам в атмосфере и ионосфере открывают перспективы создания новых приборов для мониторинга геосфер и ставят новые научные задачи теоретических и прикладных геофизических исследований.

Что касается научных задач, то в первую очередь это задача построения математической и физической моделей генерации электромагнитных откликов на акустическое возмущение. Учитывая многообразие электромагнитных откликов, их огромный разброс по диапазону частот (от нескольких герц до десятков мегагерц), ясно, что в рамках одной модели это вряд ли возможно сделать. Развиваемый в настоящее время микроописательный подход [1, 16, 18], в котором воздействие акустической волны на электрически активную среду (среду с наличием электрически заряженных частиц, ионов и электронов) рассматривается на уровне движений частиц среды в поле акустической волны, не позволяет объяснить все наблюдаемые сигналы. Такой подход может объяснить только низкочастотные электромагнитные отклики в диапазоне частот акустического воздействия. Наблюдаемые высокочастотные отклики и запаздывание их на большое время объяснить в рамках такого подхода невозможно.



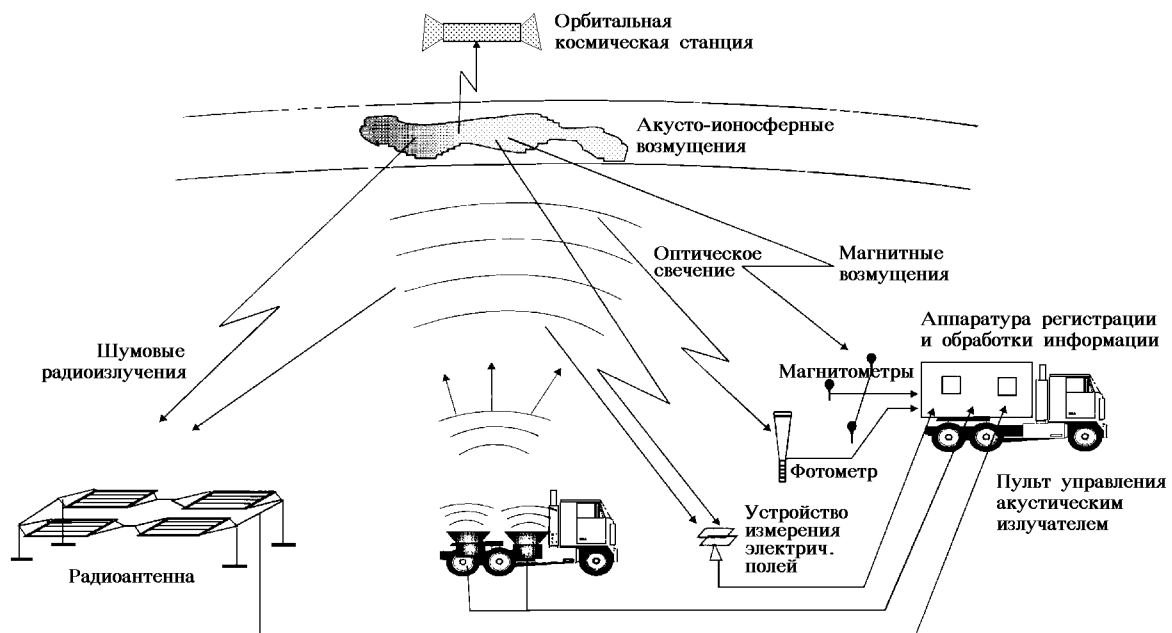


Рис. 11. Мобильный акусто-электромагнитный комплекс для исследования канала литосфера — атмосфера — ионосфера

Другим важным направлением работ является исследование зависимости электромагнитных откликов от метеоусловий. При проведении экспериментов было замечено, что результаты в значительной степени зависят от погоды. Очевидно, что существуют и сезонные зависимости. Представляет интерес исследование акустического воздействия на грозовые тучи. Уже проведенные единичные эксперименты пока не дают оснований для достоверных выводов.

Возможно, наиболее важной задачей в теоретическом плане является оценка информационной эффективности акусто-электромагнитного зондирования и возможность его использования для решения практических задач мониторинга атмосферы и ионосферы. А учитывая, что низкочастотные электромагнитные отклики зависят от проводимости поверхностного слоя Земли, в этот список можно включить и литосферу.

Для решения этих задач целесообразно создание мобильного акусто-электромагнитного зондирующего комплекса (рис. 11). В зондирующем комплексе будет использован сверхмощный параметрический акустический излучатель, состоящий из двух модулей. Каждый из модулей будет иметь акустическую мощность около 100 кВт. За счет параметрического взаимодействия акустических волн двух модулей будут создаваться низкочастотные колебания для возбуждения атмосферы на

больших высотах. Регистрация электромагнитных откликов будет производиться в нескольких различных диапазонах частот, которые будут уточнены при проведении дальнейших экспериментов. Предвидится и регистрация оптических эффектов. Последнее представляет интерес для контроля выхода радиоактивных газов из горных пород при сейсмической активности. Известно, что воздух при предельном радиоактивном облучении под воздействием акустических волн дает световые вспышки. Подобные наблюдения проводились только в лабораторных условиях. Обнаружение подобного эффекта в условиях реальной атмосферы позволило бы создать приборы для обнаружения выбросов радиоактивных газов и аэрозолей.

Основным преимуществом создаваемого комплекса является возможность его перемещения и работы в густонаселенных районах. Взрывные методы для акустического возмущения атмосферы и ионосферы опасны и практически исключают такую возможность. Кроме того, в отличие от взрыва, генератор звука допускает управляемость по частоте, уровню интенсивности и может работать длительное время. Мобильность излучателя позволит проводить эксперименты в комплексе с другими методами активного воздействия, например, нагревными электромагнитными стендами. Откроется также возможность проведения экспериментов в различных сейсмических зонах.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований и анализа показали, что акустическая модификация атмосферы и ионосферы приводит к появлению электромагнитных откликов. Прямое преобразование энергии акустических волн в электромагнитное излучение в атмосфере может быть использовано для решения ряда прикладных задач:

— для создания бесконтактных методов измерения вертикального распределения объемных зарядов в атмосфере;

— для поиска прогностических признаков сейсмической и вулканической активности;

— для мониторинга акустического «загрязнения» атмосферы Земли и оценки его влияния на биосферу и физико-химические процессы в атмосфере;

— для исследования влияния акустических возмущений на распространение радиоволн.

В аспекте фундаментальных исследований новое направление даст возможность оценить роль акусто-электромагнитных преобразований в общем энергобалансе атмосферы Земли. Можно допустить, что множество электромагнитных шумов имеют своей первопричиной акусто-электромагнитные преобразования в атмосфере и ионосфере. Знание свойств этого преобразования позволит восстановить отдельные параметры первичного «акустического портрета» планеты и стоящие за ним явления. Создаваемый мобильный акусто-электромагнитный зондирующий комплекс должен значительно облегчить эту задачу и открыть новую страницу в геофизических исследованиях.

1. Абурджания Г. Д., Мачабели Г. З. Параметрическая генерация электромагнитных возмущений акустическими волнами в ионосфере // Геомагнетизм и аэронаука.—1998.—38, № 4.—С. 105—111.
2. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Сорокин В. М., Федорович Г. Ф. О генерации геомагнитных вариаций акустическими колебаниями во время землетрясений // Физика Земли.—1979.—№ 3.—С. 58—68.
3. Брасье Г., Соломон С. Аэронаука средней атмосферы. — Л.: Гидрометиздат, 1987.—417 с.
4. Гармаш К. П. и др. Исследование реакции ионосферной плазмы на воздействие подземных, наземных, воздушных взрывов и землетрясений // Физика космической плазмы. 6—10 июня 1993. — Киев, 1993.—С. 151—160.
5. Гетманцев Г. Г., Гульельми А. В., Клайн Б. И. и др. Возбуждение магнитных пульсаций при воздействии на ионосферу излучением мощного коротковолнового передатчика // Изв. вузов. Радиофизика.—1977.—20, № 7.—С. 1017—1119.
6. Гроп Д. Методы идентификации систем. — М.: Мир, 1979.—302 с.
7. Гуревич А. В., Шварцбург М. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973.—457 с.
8. Гуревич А. В., Шлюгер И. С. Исследование нелинейных

явлений при распространении мощного радиоимпульса в нижних слоях ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика.—1975.—18, № 9.—С. 1238—1260.

9. Данилов А. М., Довженко В. А. О возбуждении электромагнитных полей при вхождении акустических импульсов в ионосферу // Геомагнетизм и аэронаука.—1987.—27, № 5.—С. 772—777.
10. Девятиреков И. А., Иванов Е. А., Козлов С. М., Кудрявцев В. И. О поведении заряженных частиц в нижней ионосфере при акустическом воздействии // Космич. исследования.—1984.—22, вып. 2.—С. 238—242.
11. Дробжев В. И., Краснов В. М., Салихов Н. М. Об ионосферных возмущениях, сопровождающих землетрясения и взрывы // Изв. вузов. Радиофизика.—1978.—21, № 12.—С. 1862—1863.
12. Изв. АН СССР. Физика Земли.—1985.—№ 11.—(Тематический выпуск, посвященный экспериментам по проекту МАССА).
13. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. — М.: Наука, 1987.—304 с.
14. Кошовий В. В. Сорока С. О. Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 5/6.—С. 3—17.
15. Неравновесная колебательная кинетика / Под ред. М. Канителли. — М.: Мир, 1989.—391 с.
16. Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. Электрозвуковое зондирование атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика.—1992.—35, № 1.—С. 15—22.
17. Поляков С. В., Рукавишников В. И., Тамойкин В. В. Квазистационарное электрическое поле объемного заряда атмосферы, возникающее при воздействии на нее мощным импульсом звука // Изв. вузов. Радиофизика.—1992.—35, № 8.—С. 641—648.
18. Савельев В. Л., Железняков Е. В. Уравнение для электрического потенциала в движущейся неоднородной ионосферной плазме // Геомагнетизм и аэронаука.—1990.—30, вып. 6.—С. 990—997.
19. Сенитаров В. Е. О генерации магнитного поля в ионосфере инфразвуковыми волнами // Геомагнетизм и аэронаука.—1991.—31, № 4.—С. 727—729.
20. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления. — М.: Наука, 1980.—375 с.
21. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. — М.: ИЛИ, 1963.—С. 243.
22. Koshevaya S. V., Hayakawa M., Baryakhar V. G., Kotsarenko N. Ya. Moving of the E- and F-layers of the ionosphere caused by atmospheric acoustic waves excited by oscillations of the Earth's surface, INSE, Tokyo, Japan, Proceedings of International Workshop on Seismo-Electromagnetics, 3—5 March 1997.—P. 72—77.

**PROSPECTS IN THE INVESTIGATIONS OF THE ATMOSPHERE AND IONOSPHERE WITH THE USE OF ARTIFICIAL ACOUSTIC INFLUENCE**

A. A. Negoda and S. A. Soroka

We examine the prospects in the use of the acoustic excitement of the atmosphere and ionosphere from the Earth's surface for solving some problems in the applied geophysics. We substantiate the expediency of constructing of mobile acoustic and electromagnetic sounding system which will allow the investigation of some geophysical phenomena and the lithosphere—ionosphere interactions by studying the electromagnetic response in the acoustic excitation of the atmosphere and ionosphere.