

УДК 551.594.21(571.66)

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОЧЕНЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

*Агранат И.В.*

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН  
п. Паратунка, Камчатский край*

*научный руководитель к.ф.-м.н. Чернева Н.В.*

Естественные электромагнитные сигналы очень низкой частоты (ОНЧ ЭМИ) атмосферного происхождения (атмосферики, свистящие атмосферики) представляют собой очень интересный и ценный объект исследования. Причиной появления атмосфериков являются молниевые разряды. В ИКИР ДВО РАН функционирует измерительный комплекс ОНЧ, который ведет непрерывную регистрацию ОНЧ ЭМИ. Данный измерительный комплекс включен в Мировую сеть локации гроз WWLLN (World Wide Location Network). Так же измерительный комплекс позволяет вести исследования по обнаружению молниевых разрядов, связанных с пепловыми извержениями вулканов Камчатки по принципам, лежащим в основе международного проекта «Global Volcanic Lightning Monitor». Результаты описанных наблюдений приведены в тексте статьи. Так же в статье освещаются некоторые результаты исследований свистящих атмосфериков, ведущихся в нескольких смежных направлениях: ведение статистики появления вистлеров в зависимости от грозовой активности; изучение причин — как природных, так и антропогенных — возникновения сигналов такого вида, и разработка системы автоматического детектирования вистлеров и моделирование свистящих атмосфериков.

*Ключевые слова: излучение очень низкой частоты, ионосфера, атмосферики, свистящие атмосферики, пепловые извержения вулканов, WWLLN.*

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОНЧ ЭМИ

Диапазон частот от долей герца до десятков килогерц привлекает внимание большого количества радиоспециалистов и геофизиков. Естественные электромагнитные излучения (ЭМИ) в этом диапазоне позволяют получать сведения о физических условиях в космическом пространстве, состоянии ионосферы, литосферы, магнитосферы, а так же много другой информации об окружающей среде. К таким излучениям относят «классические» геомагнит-

ные вариации (бухты, бури), геомагнитные пульсации (падающие из космического пространства на поверхность Земли электромагнитные волны очень низкой частоты), атмосферные шумы, ОНЧ излучения (атмосферные радиопомехи, свистящие атмосферерики) [2].

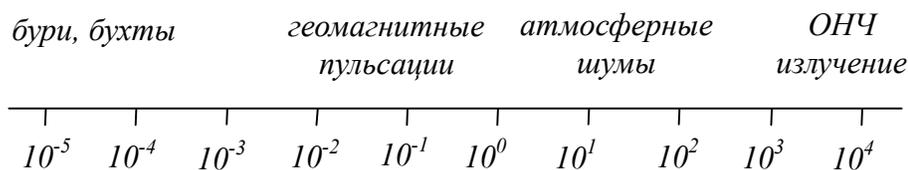


Рис. 1. Шкала частот естественных электромагнитных излучений

Появление атмосфериков в первую очередь связано с грозowymi разрядами. Разряды молний имеют достаточно большую протяженность, благодаря чему излучаются сигналы очень низкой частоты (сверхдлинные волны, СДВ). СДВ хорошо отражаются от ионосферы и от земной поверхности, имеют слабое затухание при распространении в приземном волноводном канале. При излучении молниевых разрядов основная часть их энергии распространяется в приземном волноводе (рис. 2а) в виде электромагнитного импульса — атмосферика, — а прошедшая через ионосферу часть излучения образует свистящие атмосферерики, отличающиеся от обычных атмосфериков характером изменения частоты со временем.

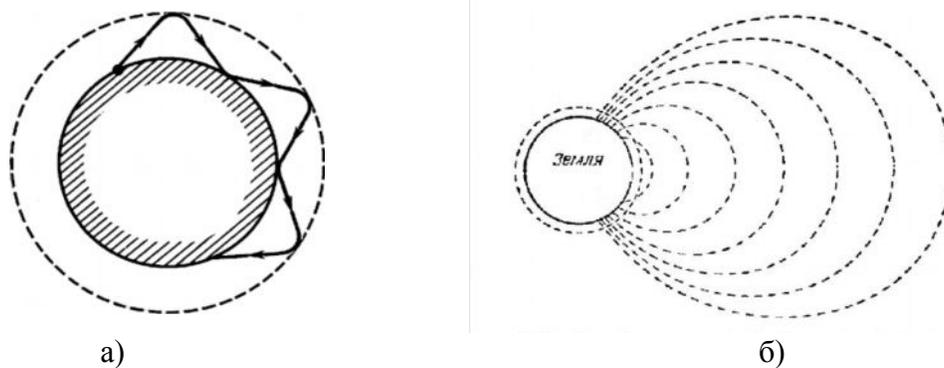


Рис. 2. траектория движения а) атмосферика, б) свистящего атмосферика.

Свистящий атмосферик (вистлер) в самом простом случае имеет единственную частоту, понижающуюся во времени (рис. 3). Вистлер образуется при распространении импульсного излучения через ионосферу. Войдя в ионосферу, электромагнитная волна распространяется вдоль силовой геомагнитной линии (рис. 2.б). Волна уходит далеко в магнитосферу и возвращается к земле в магнитно-сопряженную точку, где на уровне земли она может быть зарегистрирована. Частотные компоненты первоначального импульса распространяются с различными скоростями и приходят в точку приёма в разные моменты времени. Иногда вистлер, придя на дальний конец силовой линии, отражается от земной поверхности и, претерпев двойную дисперсию, возвращается в то же место, откуда он вышел. Он может быть отражён от обоих концов линии так, что его движение от одной точки к другой повторяется много раз [5].

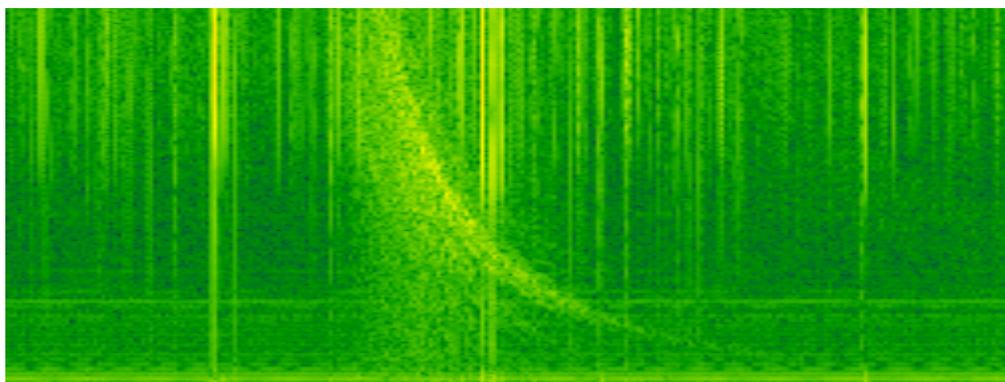


Рис. 3. Спектрограмма свистящего атмосферика (вистлера)

Описанные ОНЧ сигналы имеют следующую особенность: поскольку номинально частотный диапазон атмосфериков (1-10 кГц) входит в диапазон слышимых человеком звуковых частот, данные электромагнитные сигналы можно воспроизводить как звуковые. При таком воспроизведении атмосферика воспринимаются как треск, вистлеры — как свист с понижающейся частотой (с этим и связано название «свистящие атмосферики»).

На практике, исследование атмосфериков позволяет отслеживать перемещение грозных очагов вблизи точки приема, следить издали за процессами их формирования; атмосферерики, в том числе и вистлеры, позволяют делать выводы об электронной концентрации в магнитосфере. Таким образом, использование атмосфериков для получения информации об атмосфере является весьма эффективным и перспективным методом исследования.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОНЧ ЭМИ В ИКИР ДВО РАН

В институте космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН на обсерваторском пункте «Паратунка» осуществляется непрерывная регистрация естественных ЭМИ ОНЧ диапазона с применением ОНЧ-пеленгатора, разработанного и изготовленного в ИКИР ДВО РАН [1,3].



Рис. 4. Внешний вид ОНЧ пеленгатора

Регистрация проводится в диапазоне частот от 3 до 60 кГц. Сигналы от грозных источников принимаются антенной системой пеленгатора, состоящей из двух взаимно-перпендикулярных рамочных антенн и одной штыревой антенны. Антенны, предназначенные для приема магнитной составляющей

электромагнитного поля, представляют собой рамки, расположенные вертикально в направлении север-юг и восток-запад. Штыревая антенна служит для приема электрической составляющей электромагнитного поля. Напряжения с выхода антенной системы поступают на предварительные усилители, находящиеся непосредственно у основания антенны, затем по кабельной линии связи подаются на блок аналоговой и цифровой обработки сигнала. После усиления, преобразования в цифровую форму и частотной фильтрации сигналы записываются на компьютер [6].

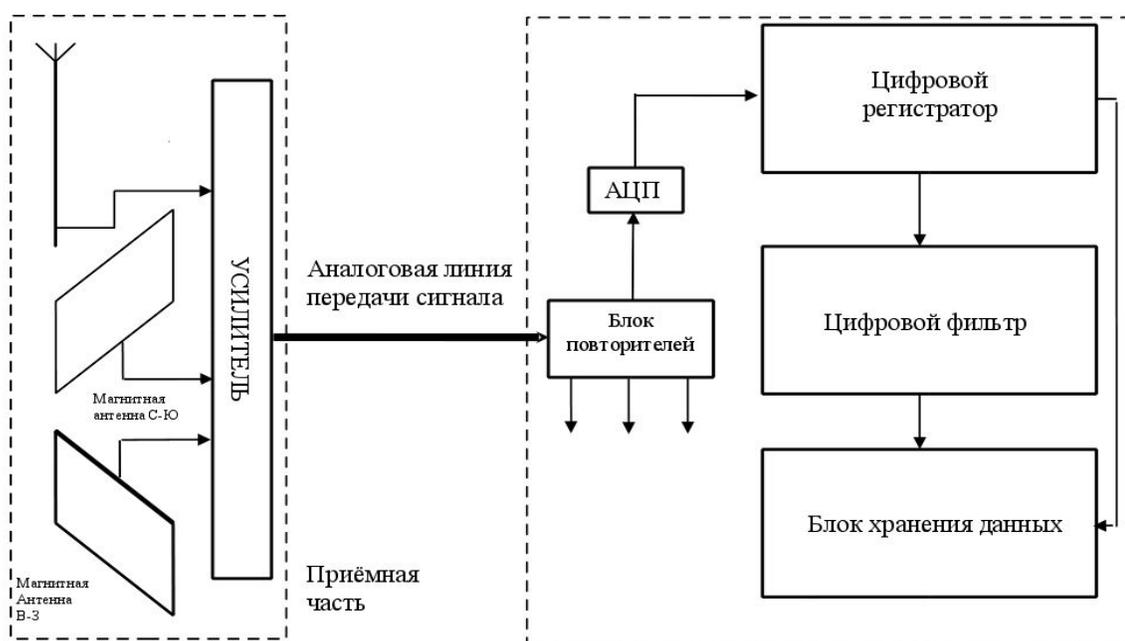


Рис. 5. Структурная схема пеленгатора

Необходимо отметить, что регистрация электрической составляющей электромагнитного поля ведется с соблюдением требований организации по обмену данными между приемными станциями, входящими в международную сеть для определения местоположения гроз (WWLLN), что позволяет институту осуществлять обмен данными с приемными станциями других регионов мира, а так же участвовать в совместных проектах.

По данным, получаемым с применением ОНЧ-пеленгатора, строится

азимутальное распределение грозовых разрядов за период прохождения грозы в районе пункта наблюдения. Визуальное сравнение пеленгационных данных с данными WWLLN, предоставленными профессором Holzworth R.H., позволило выявить идентичность картин распределения грозовых разрядов для обоих наборов данных (рис. 6). Такая схожесть говорит о том, что результаты, полученные пеленгатором, вполне объективны и могут быть использованы для дальнейших совместных исследований.

Одним из направлений таких исследований является идентификация молний, связанных с пепловыми извержениями вулканов на Камчатке [4] в рамках научно-исследовательского проекта Global Volcanic Lightning Monitor (<http://wwlln.net/volcanoMonitor.html>). Идея этого проекта заключается в следующем: данные мониторинга облаков пепла всех вулканов мира, обновляемые каждую минуту, сравниваются с данными координат молний и в случае совпадения с координатами вулкана формируется сигнал тревоги. На рис. 7. отмечены вспышки молний, присутствующие как в данных ИКИР, так и WWLLN. В представленный день (27.10.2010) наблюдалось пепловое извержение вулкана Шивелуч.

ОНЧ-пеленгатор позволяет регистрировать не только сами атмосферерики, но и так называемые твики (tweeks) — сигналы, которые считаются подвидом свистящих атмосферериков, «рассеянные атмосферерики». Твики поступают в пункт регистрации несколько позже, чем сами атмосферерики из-за большего числа отражений в ионосфере. Эти сигналы могут быть зарегистрированы преимущественно в ночные часы, когда в слое D ионосферы преобладают процессы ионной рекомбинации. В дневное время электронная концентрация в слое D настолько велика, что твики не могут проходить сквозь него.

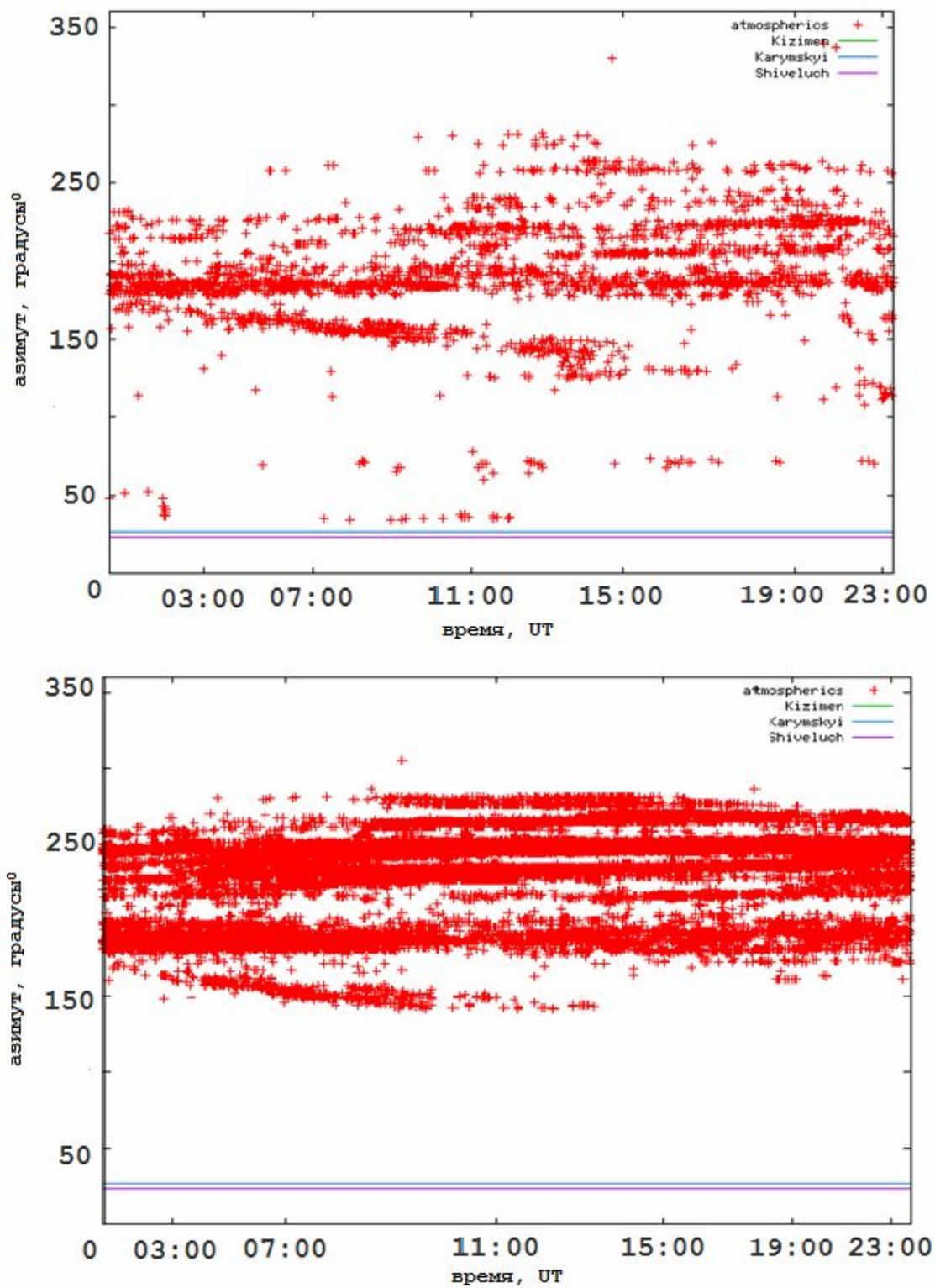


Рис. 5. Картины азимутального распределения грозовых разрядов; верхний график – по данным ИКИР, нижний – по данным WWLLN

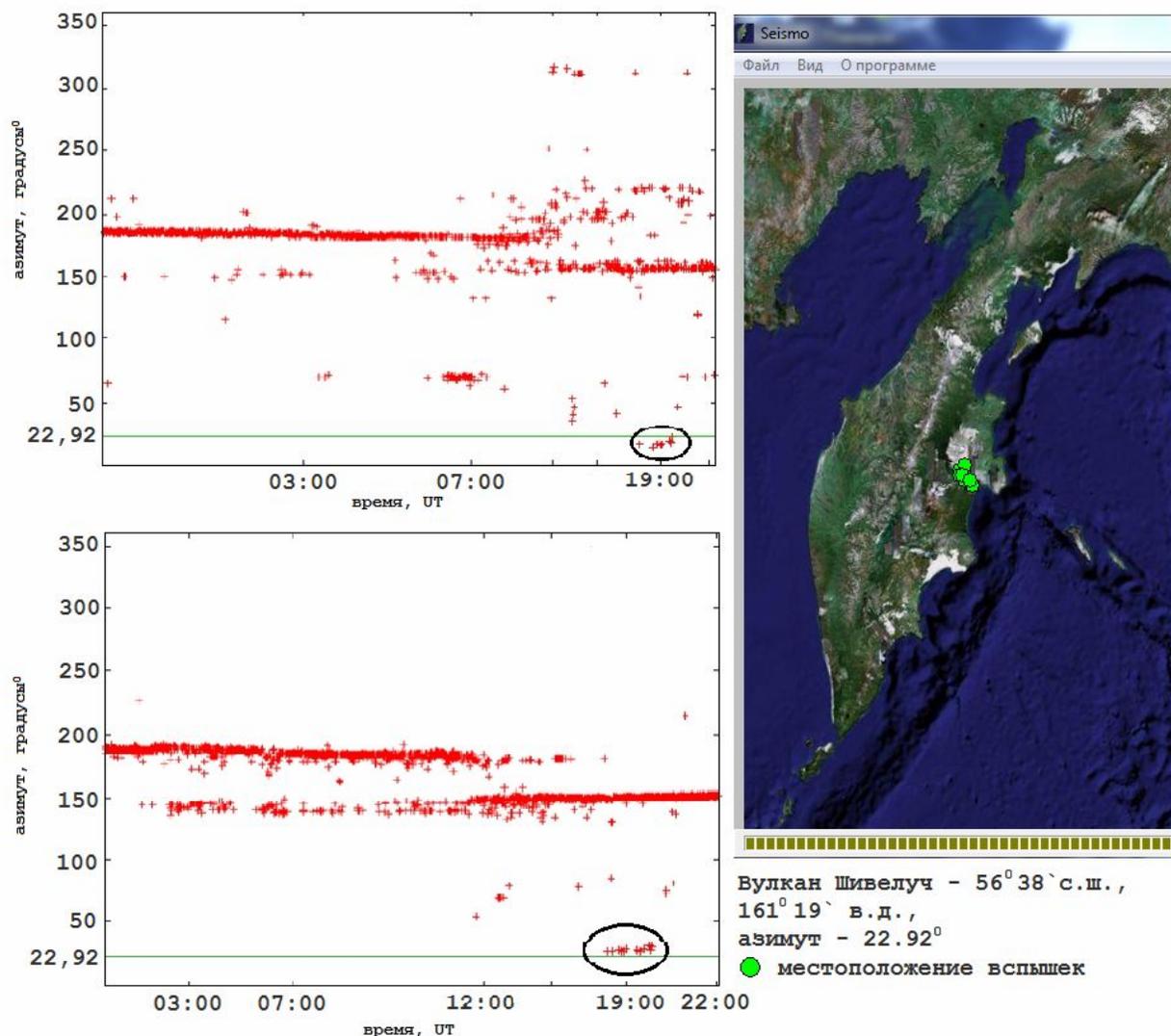


Рис. 7. Вспышки, связанные с пепловым извержением вулкана Шивелуч; верхний график – распределение разрядов по данным ИКИР, нижний – по данным WWLLN; местоположение вспышек по данным WWLLN совпадает с координатами вулкана.

Динамический спектр твиков (рис. 8) представляет собой вертикальную линию на высоких частотах (около 6 кГц), заканчивающуюся «крючком» на уровне 2 кГц. Звук твиков напоминает своего рода чириканье (tweet — отсюда и название «твики»). В отличие от вистлеров, твики образуются в верхних слоях ионосферы и регистрируемый сигнал возникает из-за большого количества отражений внутри одного слоя.

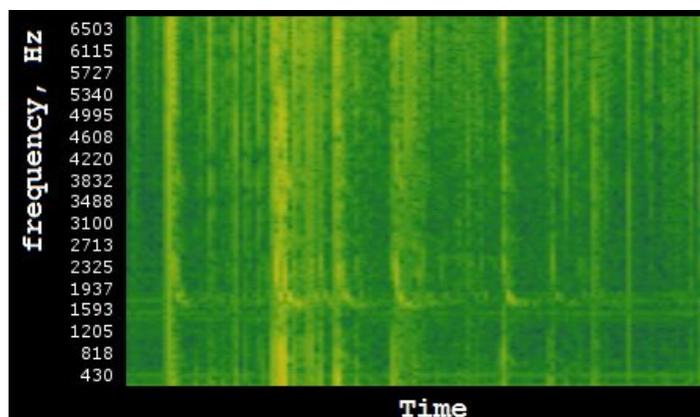
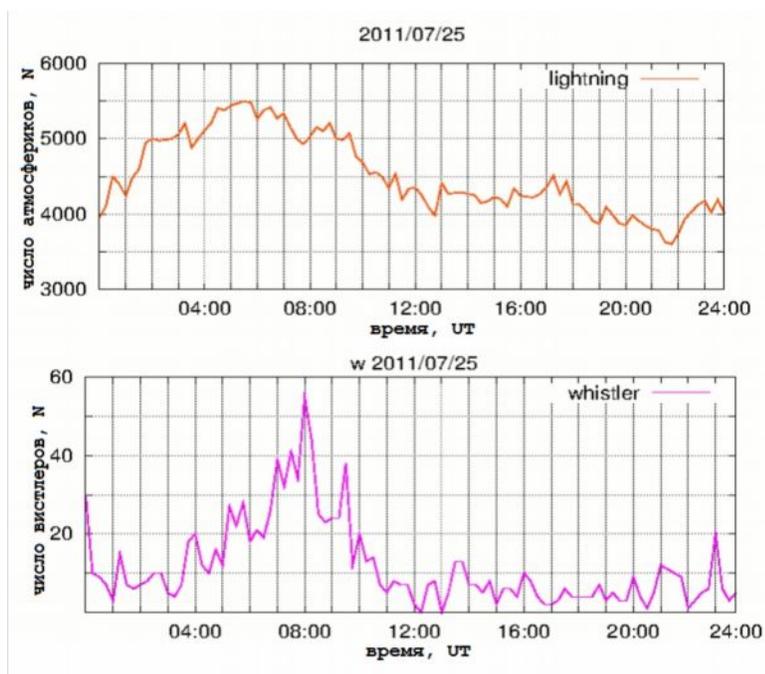


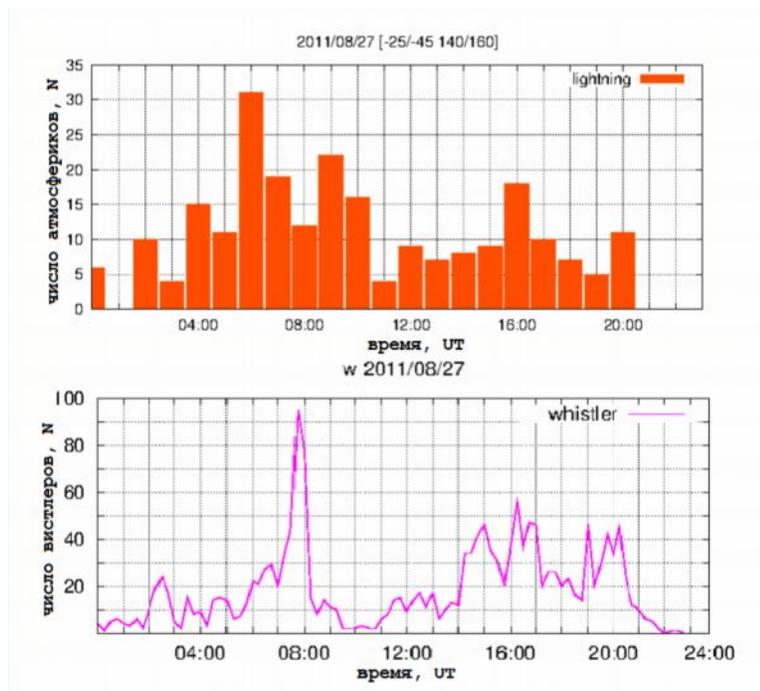
Рис. 8. Динамический спектр твиков; изменение цвета от темного к светлому соответствует увеличению интенсивности сигнала

Особый интерес представляет детектирование и изучение свистящих атмосфериков, характеристика которых была дана выше. Для их регистрации используются те же методы, что и для регистрации молниевых разрядов.

Настоящее исследование свистящих атмосфериков в ИКИР ДВО РАН преследует две основные цели: изучение происхождения вистлеров и разработка программного комплекса, обеспечивающего их автоматическую регистрацию. Ведение статистики вистлеров, слежение за динамикой изменения числа принимаемых сигналов необходимо для выявления как природных, так и антропогенных причин их появления. Основная естественная причина возникновения вистлеров — грозовые разряды. По данным, получаемым от WWLLN, и по ведущейся в ИКИР ДВО РАН статистике свистящих атмосфериков, строятся графики, отображающие грозовую активность и число принятых вистлеров. На рис. 9а показан один их вариантов таких графиков для 25.07.2011. Верхний график соответствует изменению грозовой активности по всему миру (суммарное число вспышек), нижний — числу принятых вистлеров. Для представленного дня явно прослеживается связь роста числа принятых вистлеров с увеличением грозовой активности. Рис. 9б иллюстрирует аналогичную связь с увеличением грозовой активности в районе магнитно-сопряженной точки (для Камчатки это Канберра, Австралия).



а)



б)

Рис. 9. Связь числа вистлеров с грозовой активностью а) суммарной по всему миру; б) в районе магнитно-сопряженной точки

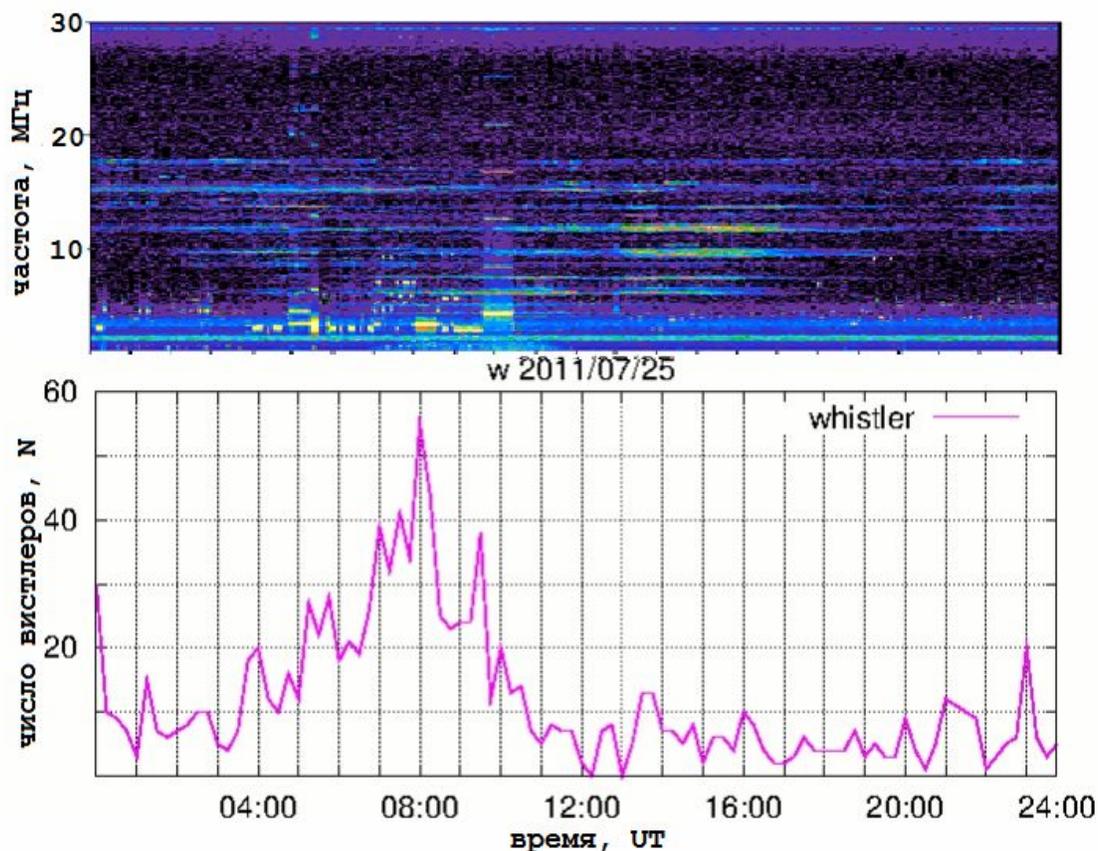


Рис. 10. Изменение числа вистлеров во время работы HAARP

Принимая во внимание среду распространения вистлеров (ионосфера) и их связь с грозowymi разрядами, можно предположить, что антропогенное воздействие на ионосферу также может повлечь за собой и рост числа вистлеров. Поскольку в настоящее время активное воздействие на ионосферу оказывает американская система HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program), возникает гипотеза о связи результатов работы этой системы и динамики появления вистлеров. Для проверки были сопоставлены спектрограмма процесса нагревания ионосферы антеннами HAARP и статистика появления вистлеров. Результаты представлены на рис. 10. Верхний график – спектрограмма процесса нагрева ионосферы в течение суток, нижний график – изменение числа вистлеров в течение суток. Как и в случае сравнения с грозовой активностью, заметна связь — во время работы HAARP (с 05:00 до 11:00

УТ 25.07.2011) наблюдается увеличение числа вистлеров. Однако для того чтобы более точно установить такую связь необходимо обработать большой промежуток времени, большое число дат.

В связи с этим возникает необходимость разработки комплекса автоматического детектирования вистлеров. За основу для создания такого комплекса в ИКИР ДВО РАН взяты идеи, предложенные Лихтенбергером в [8]. Описанный им метод автоматического детектирования основывается на 2D корреляции фрагмента динамического спектра исходного сигнала со спектрограммой модели свистящего атмосферика. В настоящее время комплекс, реализующий этот алгоритм, находится в разработке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектированный и изготовленный в ИКИР ДВО РАН ОНЧ-пеленгатор осуществляет непрерывную регистрацию атмосфериков. Данный комплекс удовлетворяет требованиям WWLLN к приемным станциям, что позволяет институту участвовать в различных международных проектах и исследованиях, связанных с изучением грозовых разрядов и их связи с другими явлениями. Одним из направлений таких исследований является идентификация молниевых разрядов, связанных с пепловыми извержениями вулканов. Важность таких наблюдений очень высока, поскольку обнаружение пепловых облаков крайне важно для авиации и т.д.

Свистящие атмосферика – ОНЧ сигналы, которые за счет дисперсии принимают характерный вид и звук. Причина их появления – молниевые разряды, что подтверждается сопоставлением статистики принятых с помощью ОНЧ-пеленгатора вистлеров с грозовой активностью как по всему миру, так и в магнитно-сопряженной точке, которой для Камчатки является Канберра (Австралия).

Вероятно, антропогенное воздействие на ионосферу, такое как нагрева-

ние ионосферы антеннами HAARP, так же может вызвать рост числа вистлеров – влияние на ионосферу может повлечь за собой рост грозовой активности, что, в свою очередь, приведет к увеличению числа вистлеров. Динамика изменения числа вистлеров во время работы HAARP подтверждает это предположение, однако сделать вывод о явной связи пока нельзя ввиду малого числа данных для анализа.

Ведение статистики свистящих атмосфериков делает необходимым разработку комплекса автоматического детектирования вистлеров. Однако своеобразии исследуемого сигнала (понижающаяся со временем частота на фоне коротких помех атмосферного происхождения) затрудняет решение такой задачи. В связи с этим за основу такого комплекса взяты идеи, используемые международной сетью AWDANet (Automatic Whistler Detector and Analyzer system's network), суть которых заключается в использовании 2D корреляции спектра фрагмента сигнала, содержащего атмосферик, со спектром смоделированного вистлера.

Таким образом, множественность исследований, связанных с естественным излучением очень низкой частоты, подтверждает то, что ОНЧ сигналы являются очень ценным источником информации о состоянии окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вальков С.П., Дружин Г.И., Швецов В.Д. и др. Аппаратура для регистрации ОНЧ излучений // Низкочастотные сигналы во внешней атмосфере. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976. С. 107-116.
2. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 207 с.
3. Дружин Г.И. Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением // Вулканология и сейсмология, 2002, № 6, с. 51-62.
4. Почтарев В.И. Магнетизм Земли и космического пространства. М.: Наука, 1966. 143 с.

5. Ратклифф Дж. А. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. М.: Перевод на русский язык, Мир, 1975. 296 с.
6. Чернева Н.В., Holzworth R.H., Иванов А.В., Дружин Г.И., Мельников А.Н. Перспективы использования всемирной сети локации гроз (WWLLN) для определения пепловых извержений вулканов на Камчатке // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9-15 октября 2011 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. - Обнинск: ГС РАН, 2011. - 486 с. С.415-419.
7. Lichtenberger, J.(2009), A new whistler inversion method, J, Geophys. Res., 114, A07222, doi: 10.1029/2008JA013799.
8. Lichtenberger, J., Automatic Whistler Detector

#### PROSPECTS OF RESEARCH OF NATURAL ELECTROMAGNETIC RADIATION OF VERY LOW FREQUENCY

*Agranat I.V.*

*Institute of Cosmophysical researches and Radio Wave Propagation*

The work is devoted to the lightning generated very low frequency (VLF) waves. These waves propagate in the Earth ionosphere waveguide (such signals are called spherics), propagate through the ionosphere and in the magnetosphere along a magnetic field line (whistlers, tweeks). In the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, there is a VLF measuring complex. It realizes continuous registration of VLF radiation. This complex is included in the World Wide Lightning Location Network. It gives to the Institute a chance to participate in international projects, such as Global Volcanic Lightning Monitor.

Results of researches of whistlers such as whistler`s statistics conducting depending on natural and anthropogenous factors and development of Automatic Whistler Detector and modeling of whistler are stated in the work.