

УДК 550.34

О ВЛИЯНИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА АТМОСФЕРНЫЕ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАМЧАТКИ

**В. В. Богданов, А. В. Бузевич, А. В. Виницкий, Г. И. Дружин, А. В. Купцов, И.
Н. Поддельский, С. Э. Смирнов, Н. В. Чернева, Б. М. Шевцов**

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
с. Паратунка, Камчатская обл., Елизовский р-н*

Аннотация. Грозы, электромагнитные поля и излучение, землетрясения и солнечная активность рассматриваются как комплекс геофизических процессов, взаимодействующих в специфических условиях Камчатки. Обсуждаются механизмы передачи энергии гелиосферных возмущений в атмосферу и литосферу Земли. Показано, какую роль играют эти возмущения в активизации геофизических процессов. Рассматриваются аномалии в геофизических полях при подготовке сейсмических событий.

ABOUT THE INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON ATMOSPHERIC AND SEISMIC PROCESSES OF KAMCHATKA

**V. V. Bogdanov, A. V. Buzevich, A. V. Vinitskii, G. I. Druzhin, A. V. Kuptsov,
I. N. Poddelskii, S. E. Smirnov, N. V. Cherneva, B. M. Shevtsov**

*Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS
Paratunka, Elizovo district, Kamchatka region*

The summary. Thunder-storms, electromagnetic fields and radiation, earthquakes and solar activity are considered as a complex of the geophysical processes interacting in specific conditions of Kamchatka. Mechanisms of transfer of solar spherical energy perturbations to the atmosphere and solid sphere of the Earth are discussed. It is shown, what role is played by these perturbations in activation of geophysical processes. Anomalies in geophysical fields are considered during preparation of a seismic event.

Введение

Влияние солнечной активности на развитие атмосферных и литосферных процессов широко исследуется в различных сейсмоактивных регионах, но нигде она не проявляется так явно, как на Камчатке, что обусловлено тремя хорошо известными факторами. Здесь наблюдается локальный максимум в развитии магнитных бурь на планете [1], и, как следствие, их заметное воздействие на региональную циклоническую деятельность [6]. Этот район выделяется интенсивными тектоническими движениями.

Первое из перечисленных обстоятельств связано с положением геомагнитного полюса и близостью главного ионосферного провала, второе — с характерным поведением сибирских и северотихоокеанских циклонов, а третье — с особенностью сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Уникальное сочетание указанных

геофизических факторов (возможно, не случайное) создает наиболее благоприятные условия для исследования физики солнечно-земных связей.

Цель данной работы в рассмотрении природы механизмов передачи энергии гелиосферных токов в атмосферу и литосферу Земли и возникающей при этом активизации геофизических процессов, характерных для Камчатки. Особое внимание будет уделено аномалиям в суточных вариациях электромагнитных полей и параметров ионосферы при подготовке землетрясений.

Как одно из проявлений солнечно-земных связей следует отметить активизацию сейсмических процессов в дни равноденствия, в марте и октябре [7, 22]. Давно было замечено, что это совпадает с усилением магнитных бурь [21] и перестройкой в системе циклонов [6]. Именно в эти дни положение Земли и ее магнитного диполя создают условия для максимального взаимодействия геомагнитного поля с гелиосферным током, энергия которого передается сначала в магнитосферу и ионосферу [1, 21], а затем в стратосферу и тропосферу за счет объединенных движений [6]. Через поверхностное трение атмосферные возмущения вызывают дополнительные напряжения в литосфере, а через электромагнитные поля и токи – активизацию динамических процессов в ней [16, 23]. Время действия магнитных бурь и передачи энергии по геоболочкам составляет, примерно, неделю.

Характеристикой возмущений в ионосфере является локальный К-индекс. А обобщенной координатой, соответствующей коллективным движениям в атмосфере и литосфере и непосредственно связанной с током в этих элементах глобальной электрической цепи, – вертикальная компонента приземного атмосферного электрического поля. Ниже будут рассмотрены вариации этих величин в связи с активизацией сейсмических процессов.

Основным источником атмосферного электрического поля в средних широтах является грозовая активность. Глобальная электрическая цепь имеет представление в виде эквивалентного электрического контура [8, 15, 24, 25], в котором ток грозового генератора направлен от земли в ионосферу, а в области хорошей погоды – обратно. Солнечная активность меняет характеристики ионосферы и тем самым параметрически воздействует на ток в глобальной электрической цепи, направляя энергию грозовых генераторов (циклонов и ураганов) на активизацию геофизических процессов в земной коре. Возможность такого эффекта показали эксперименты с МГД-генераторами, согласно которым энергия электромагнитных воздействий составляет 10^{-3} - 10^{-5} от суммарной выделившейся энергии землетрясений [16, 23]. При этом в качестве результата воздействий электрического тока рассматривается уменьшение трения в ионосодержащих горных породах и активизация процессов трещинообразования.

Диссипация энергии самого солнечного ветра приводит к генерации в авроральных зонах планетарных и внутренних гравитационных волн в широком диапазоне периодов, распространяющихся во всех направлениях и имеющих линейчатые спектры с различной степенью добротности [5]. Передача импульса солнечного ветра в атмосферу Земли приводит к девиации частоты и прецессии оси ее вращения [20]. Кроме этого, во время солнечной активности в ионосфере и тропосфере наблюдается усиление приливов, имеющих заметную корреляцию с межсуточными вариациями выделившейся сейсмической энергии [3, 9, 20, 22]. Как будет показано ниже, особенно это проявляется на периодах 5–14 суток, что хорошо согласуется с характерным временем прохождения магнитных бурь.

Подводя итог обзору механизмов передачи энергии солнечной активности в атмосферу и литосферу, можно заключить, что они складываются из совокупности электромагнитных, волновых, синоптических и динамических возмущений. Причем, как отмечалось выше, эти процессы сами находятся во взаимодействии. Их общая энергия превосходит энергию солнечной активности. И, что самое важное, их суммарное воздействие сейсмически эффективно только в областях сильных тектонических напряжений.

Проявление солнечной активности в геофизических полях и сейсмичности

Для анализа вариаций геофизических полей рассмотрим данные, полученные обсерваторией «Паратунка» с помощью измерительного комплекса [4]. На рис. 1 представлены среднесуточные вариации вертикальной компоненты атмосферного электрического поля E_z на Камчатке (а) в сравнении с аналогичными вариациями над океанами (б) и глобальной грозовой активностью (с) [26]. Среднесуточный ход вариаций E_z по данным обсерватории «Паратунка» соответствует унитарной вариации атмосферного электрического поля и изменениям частоты гроз на земном шаре. Наряду с глобальной грозовой активностью существенный вклад в вариации электрического поля вносят локальные метеопроцессы, особенно если они сопровождаются осадками. В связи с этим при наблюдениях поля и исследовании влияния в нем ионосферных и литосферных эффектов важную роль играют условия хорошей погоды.

Повышение проводимости ионосфера связано с ростом интенсивности космических лучей, а литосфера – со сжатием горных пород. Последнее может привести к вытеснению радиоактивных элементов из почв, ионизации приземного воздуха и, как следствие, к уменьшению его сопротивления и бухтообразному понижению электрического поля [19]. Ионизация приземного воздуха в атмосфере может стать причиной конденсации водяных паров и выделением теплоты парообразования, что усиливает циркуляцию в атмосфере и обеспечивает поступление ионов на большие высоты. В результате чего появляются линейчатые структуры в облаках над разломами, наступает потепление и выпадение осадков перед землетрясениями.

Важным условием одновременного понижения сопротивления в токоподводящих элементах глобальной электрической цепи и начала эффективной передачи энергии грозовых генераторов в литосферу является синхронизация процессов в верхней и нижней атмосферах, изменяющих их проводимость. Рассмотрим примеры такой синхронизации, которая охватывает не только электрические явления, но и весь комплекс геофизических возмущений, связанных с солнечной активностью.

Поведение характеристик солнечной активности, ионосферы и приземной атмосферы в сопоставлении с сейсмичностью приведены на рис. 2. Методом наложения эпох проанализированы временные ряды наблюдений за 14 суток до дня сейсмического события и 12 после. Были рассмотрены 42 события с энергетическим классом $K \geq 13$. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- в выбранном временном интервале происходит заметная синхронизация всех анализируемых параметров,
- к моменту землетрясений электрическое поле E_z и K -индекс принимают минимальные значения,
- вариации E_z и P указывают на то, что землетрясения происходят на фазе синоптических изменений;
- в вариациях всех параметров выделяется примерно недельный временной масштаб.

В связи с последним обстоятельством представляет интерес рассмотреть периодограммы исследуемых величин. Для атмосферного электрического поля E_z и выделившейся сейсмической энергии E_s они представлены на рис. 3 (а и б, соответственно). Результат получен с помощью полугодовой выборки. Две периодограммы существенно различаются по структуре: “а” в области масштабов 5–14 дней имеет провал, а “б” – подъем. Это говорит о том, что в электрическом поле преобладают синоптические и сезонные возмущения, а в сейсмичности – промежуточные вариации. Все возмущения, связанные с солнечной активностью, так или иначе, дают вклад в эту область периодов. Например, временной масштаб 9 суток близок к продолжительности влияния на магнитосферу и ионосферу Земли направления межпланетного магнитного поля [10]. Диапазон 6–9 суток – характерный временной масштаб возникновения активных образований на Солнце, их отклика в ионосфере и передачи возмущений по геоболочкам,

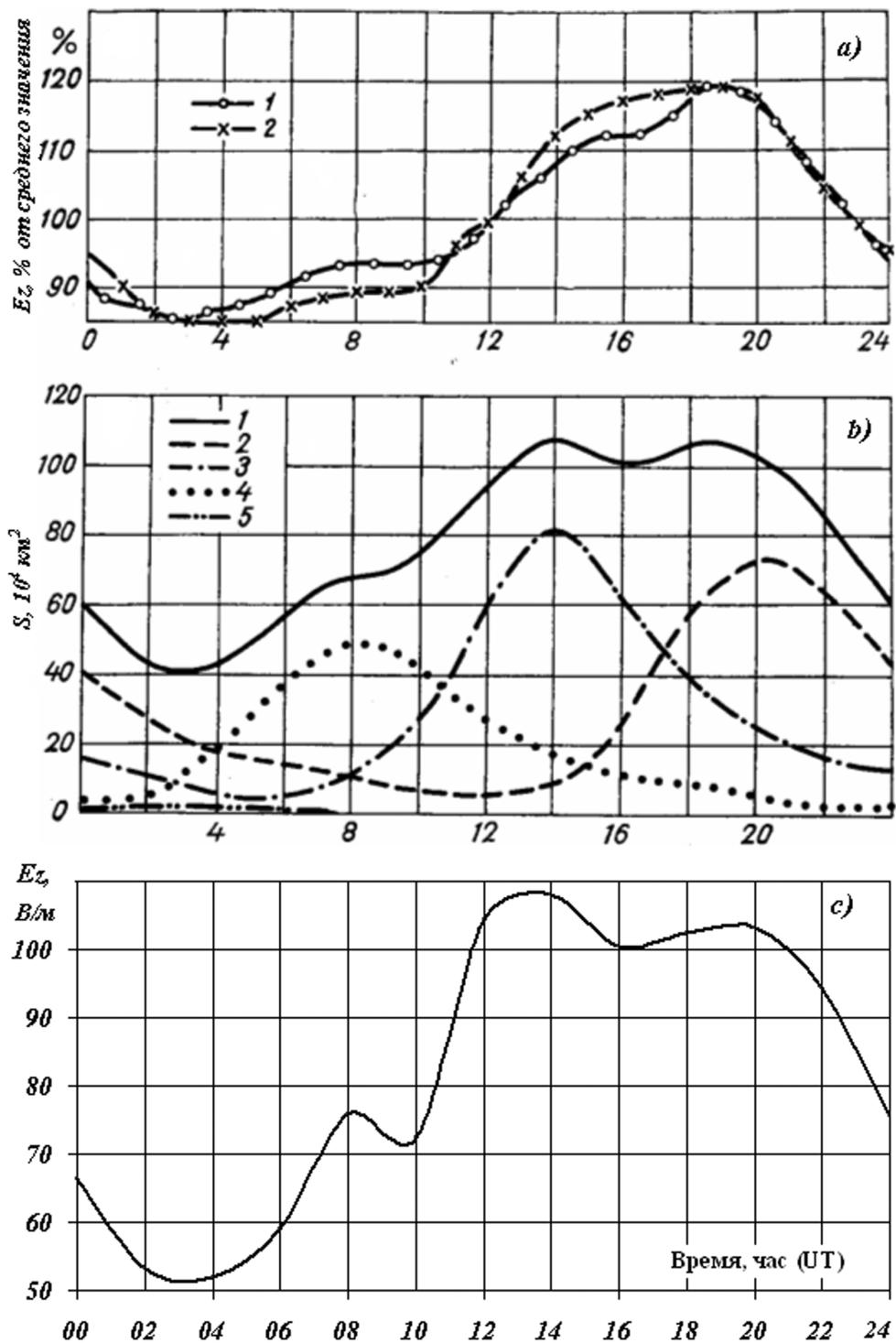


Рис. 1. а) Суточные изменения Ez в невозмущенных условиях: 1 – над Северным Ледовитым океаном, 2 – среднее над всеми океанами.
 б) Суточные UT-вариации площади, занятой грозами: 1 – для планеты в целом, 2 – Америка, 3 – Африка и Европа, 4 – Азия и Австралия, 5 – Новая Зеландия.
 с) Суточные UT-вариации средних значений напряженности электрического поля по данным геофизической обсерватории «Паратунка».

Fig. 1. a) Daily variations of Ez in not indignant conditions: 1 - above Arctic ocean, 2 – mean variations above all the oceans.
 b) Daily UT-variations of the area occupied with thunder-storms: 1 - for the planet as a whole, 2 - America, 3 - Africa and Europe, 4 - Asia and Australia, 5 - New Zealand.
 c) Daily UT-variations of mean values of intensity of electric field according to the data of geophysical observatory “Paratunka”.

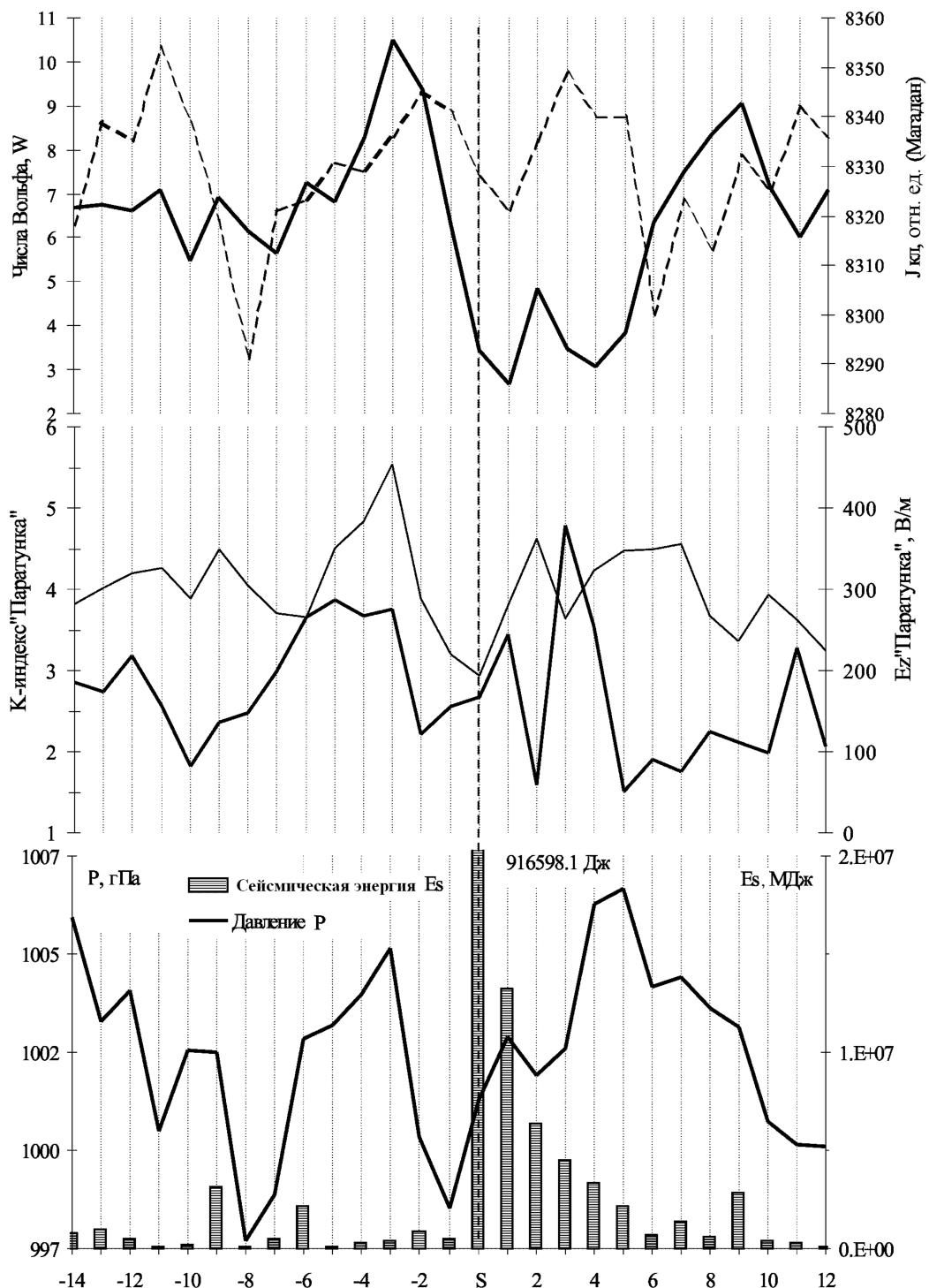


Рис. 2. Вариации магнитной активности К-индекса, атмосферного электрического поля Ez, числа солнечных пятен W, интенсивности космических лучей Jcl, атмосферного давления P, выделившейся сейсмической энергии Es за 14 суток до и после Камчатских землетрясений с $K \geq 13,0$ (1992 - 1999 гг.).

Fig. 2. Variations of the magnetic activity K-index, the atmospheric electrical field Ez, number of sun spots W, intensity of space beams Jcr, atmospheric pressure P, seismic energy isolated during a day Es in the interval of 14 days before and after the Kamchatka earthquakes with $K \geq 13,0$ (1992-1999 yeas).

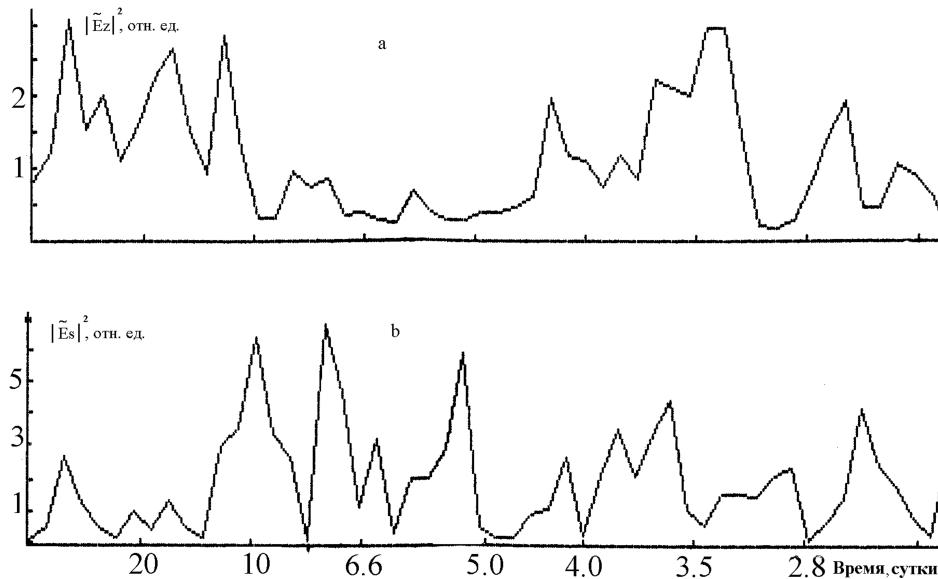


Рис.3. Интегральные спектры временных рядов вертикальной составляющей атмосферного электрического поля $|\tilde{E}_z|^2$ (а) и выделившейся сейсмической энергии $|\tilde{E}_s|^2$ (б) на Камчатском геодинамическом полигоне (выборка 01.06.1996 – 01.01.1997 гг.).

Fig. 3. Integral spectra of time series of the vertical component of atmospheric electrical field $|\tilde{E}_z|^2$ (a) and isolated seismic energy $|\tilde{E}_s|^2$ (b) at Kamchatka geodynamic region (sample of 01.06.1996 - 01.01.1997 years).

а 13–14 – полумесячная приливная волна, об усилении которой во время солнечной активности говорилось выше, и в то же время это – примерно полупериод вращения Солнца. Активные образования гелиосфера могут существовать в течение нескольких солнечных оборотов и отчетливо проявляются в вариациях геомагнитного поля [2], в которых синоптические процессы представлены слабо, в то время как более длительные колебания на периодах 7, 9, 13 и 27 суток заметно выделяются [2]. Периоды 6-7 и 13-14 суток проявляются и в неравномерности вращения Земли [20], которая на этих масштабах вызывается воздействием солнечного ветра и приливами.

Очень показателен провал на периодограмме “а” рис. 3. Он говорит о том, что вклад в атмосферное электрическое поле процессов, связанных с литосферой, среди прочих составляет не более 30 %, это видно из соотношения амплитуд. Это объясняет то, какую важную роль играют условия хорошей погоды при наблюдениях E_z .

Представляет интерес рассмотреть процесс нарастания внутрисуточных колебаний в атмосфере перед землетрясениями и то, как это проявляется в поведении электрического поля. При исследовании вариаций спектров мощности E_z в суточном ходе при условиях хорошей погоды выделяются возмущения в двух полосах с $T=1\text{--}5$ и $6\text{--}24$ ч. Первая из них включает в себя моды внутренних гравитационных волн в нижней атмосфере, а вторая – планетарные приливные волны. Перед землетрясениями, в течение нескольких суток происходит нарастание амплитуды приливов. Наибольшая вероятность сейсмических событий лежит в пределах полусуточной волны. В период подготовки землетрясения интенсивности полос с периодом 1.8, 2.2 и 3.8 ч вырастали на порядок и более по сравнению с фоновым уровнем. Дополнительно к этому надо отметить еще две составляющие с $T=0.6$ и 1 ч. Все они относятся к сейсмогравитационным колебаниям Земли [14].

С учетом важности процессов с периодами 6-9 суток была выполнена фильтрация в этом диапазоне рядов наблюдений E_z и K -индекса до и после сильных сейсмических событий. Результат для двух землетрясений представлен на рис. 2. По существу это – тренды единичных реализаций рассматриваемых параметров. Как и на рис. 2 видна синхронизация колебаний и минимум их значений в момент события. Нетрудно по-

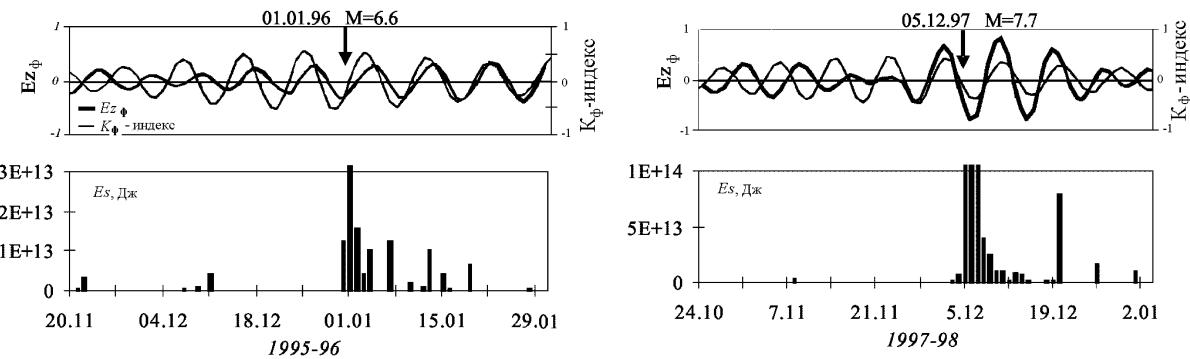


Рис.4. Сопоставление фильтрованных временных рядов (в диапазоне периодов 8-10 суток) вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое $E_{z\phi}$ и локального индекса магнитной активности K_ϕ по данным обсерватории Паратунка с суточными значениями выделившейся сейсмической энергии E_s в Камчатском регионе в периоды сильных землетрясений.

Fig.4. The comparison of filtered time series (in the range of periods 8-10 days) of the electrical field vertical component in the near ground layer $E_{z\phi}$ and the local index of the magnetic activity K_ϕ according to the data of observatory Paratunka with daily magnitudes of the isolated seismic energy in Kamchatka region during strong earthquakes.

нять, что это указывает на эффективную передачу энергии атмосферных возмущений в литосферу. Действительно, понижение этих параметров связано с ростом проводимости в тропосфере и ионосфере, а значит, и с более интенсивным воздействием грозовых генераторов на земную кору в данном районе. О понижении трения в горных породах в результате электромагнитных воздействий говорилось выше. Еще следует добавить, что при этом активизируется процесс трещинообразования.

Согласно рис. 4, можно по поведению E_z и K -индекса спрогнозировать сильное сейсмическое событие примерно в недельном временном интервале. Для уточнения времени прогноза рассматриваются сами реализации процессов, см. рис. 5, в сопоставлении с характером поведения их средних значений, показанных на рис. 2. Район прогноза определяется радиусом влияния очага землетрясения, который для сильных событий составляет сотни километров.

На рис. 5 рост проводимости сопровождается уменьшением электрического поля, но плотность тока (тока грозового генератора) при этом примерно сохраняется. Уменьшение K -индекса сопровождается ростом проводимости в ионосфере, поскольку перестает работать Форбуш-эффект, интенсивность космических лучей восстанавливается и ионизация верхних слоев атмосферы увеличивается. Получается, что при синхронном достижении минимума величинами E_z и K -индекса происходит короткое замыкание одновременно в тропосфере и ионосфере (сопротивлением промежуточных слоев можно пренебречь, поскольку их толщина сравнима с высотой тропосферы, но плотность воздуха значительно ниже), а значит энергия грозового генератора поступает только в литосферу и наиболее эффективно изменяет ее состояние в это время. Именно этот период времени и отмечается повышением сейсмической активности, рис. 4.

Рассмотрено проявление солнечной активности в геофизических полях и то, как это влияет на сейсмичность. Однако хорошо известно, что наблюдаются не только прямые воздействия атмосферных процессов на литосферные, но и обратные. О приземных явлениях было сказано выше. Остановимся на ионосферных эффектах.

Проявление подготовки сейсмических событий в ионосфере

Аномальному поведению параметров ионосферы накануне сейсмического события на фоне солнечной и геомагнитной активности уделяется большое внимание [13, 17, 18]. Однако до сих пор не ясен не только механизм этой связи, но даже и то, какой из

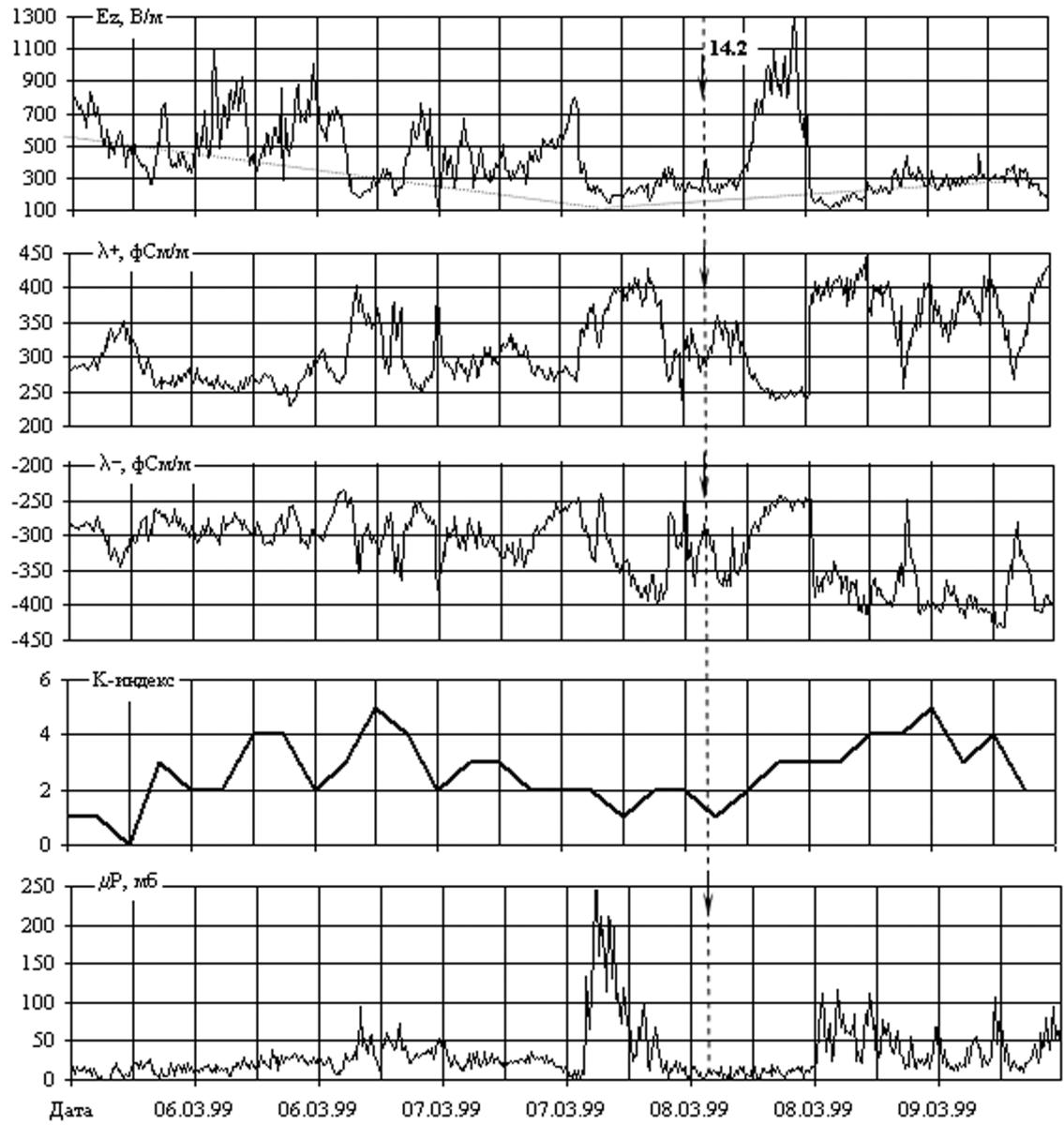


Рис.5. Вариации электрических характеристик приземного слоя атмосферы (вертикальной составляющей электрического поля E_z , электропроводности ионов положительных λ_+ и отрицательных λ_-) и микропульсаций атмосферного давления μP в диапазоне частот $0.001\div 1.0$ Гц, зарегистрированные на магнитной обсерватории “Паратунка” во время землетрясения 08.03.1999 г. ($K=14.2$). Момент события отмечен стрелкой.

Fig.5. The variations of electrical characteristics of the atmosphere near ground layer (the electrical field vertical component E_z , electroconductivity of ions, positive λ_+ and negative λ_-) and micropulsations of the atmospheric pressure in the frequencies range $0.001\div 1.0$ Hz registered at “Paratunka” magnetic observatory during the earthquake on 08.03.1999 ($K_s=14.2$). The moment of the event is marked by the pointer.

процессов является определяющим в образовании аномалий. Ответственным за возмущение параметров ионосфера считается аномальное электрическое поле, возникающее в земной коре при подготовке землетрясений и проникающее на ионосферные высоты. Рассматривались различные механизмы генерации этого поля, основанные на механоэлектрических и пьезоэлектрических эффектах в земной коре, но все они в значительной мере уступают атмосферным источникам электрического поля, способного модифицировать параметры ионосферы [18]. В данном случае токоуправляющим элементом в глобальной электрической цепи может быть область литосферы, прилега-

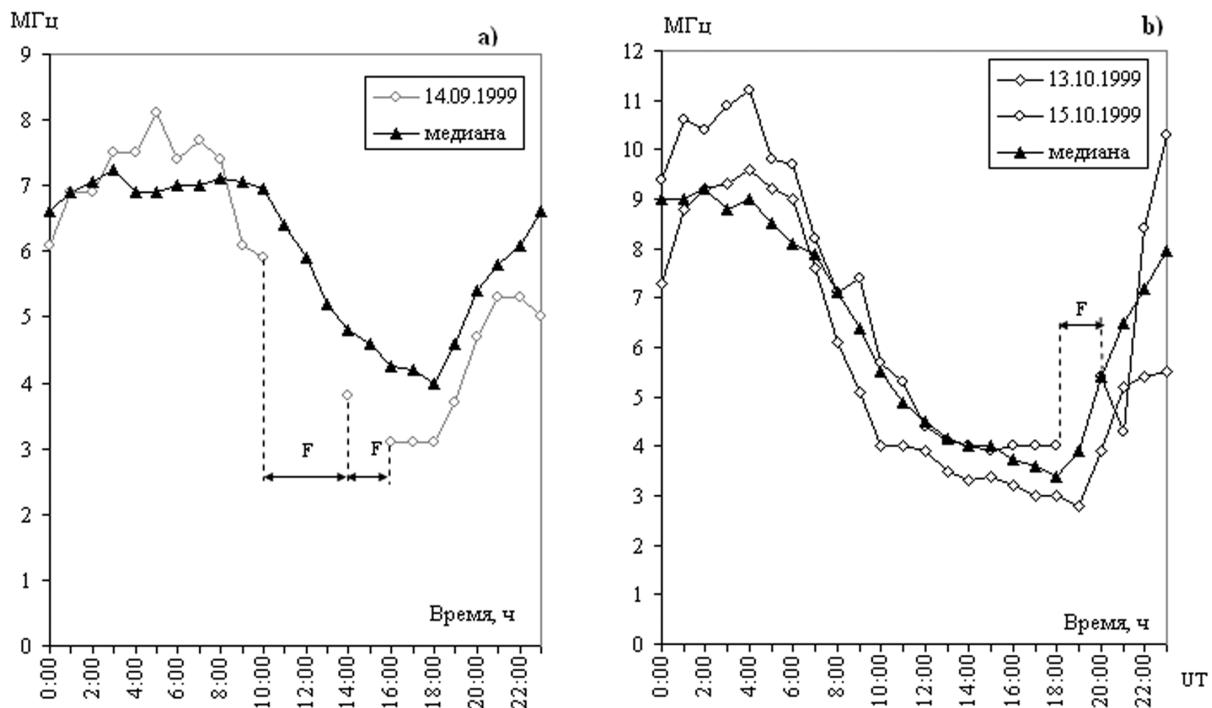


Рис. 6. а – вариации критической частоты $f_0 F_2$ регулярного слоя в течение 14.09.99 г., б – 13.10.99 г. и 15.10.99 г.

Fig. 6. a – variations of critical frequency of a regular layer during 14.09.99, b – 13.10.99 and 15.10.99.

ющая к очагу землетрясений и теряющая свое сопротивление в результате тектонического сжатия. Изменения в ионосфере будут локализованы над этой областью, а энергия на их образование будет черпаться из грозовых источников. Данный механизм аналогичен способу воздействия ионосферы на литосферу во время прохождения магнитных бурь с отличием лишь в местоположении токоуправляющего элемента. Можно сказать, что процессы, протекающие в этих геоболочках, тесно связаны между собой через ток в глобальной электрической цепи и между ними происходит взаимное влияние.

В зависимости от природы сейсмоактивного региона характер аномального поведения параметров ионосферы может быть различен. По результатам вертикального радиозондирования параметров ионосферы было замечено, что для Камчатки наиболее информативной является критическая частота $f_0 F_2$ регулярного слоя F_2 . Рассмотрим изменение параметров ионосферы накануне сейсмических событий, которые произошли 18.09.99 г. и 16.10.99 г. по всемирному времени (UT).

Сентябрь месяца 1999 года характеризовался повышенной солнечной активностью, что привело к длительной депрессии электронной концентрации в слое F_2 и, как результат, к уменьшению текущих и, следовательно, медианных значений критических частот. Однако на фоне возмущений были выделены аномалии в распределении параметров ионосферы, которые можно отождествлять с оперативными предвестниками сейсмического события. Максимальные значения критических частот в период развития магнитосферного возмущения превысили медианные значения 14 сентября более чем на 20%, и пришли на 6 часов утра по UT (рис. 6 а). 13 и 14 сентября суммарный индекс геомагнитной активности K_g равнялся, соответственно, 32 и 24. В остальные дни до и после сейсмического события с энергетическим классом $K \approx 13$, произошедшего 18.09.99 г., текущие значения критических частот, в том числе и максимальные, в результате депрессии электронной концентрации, были, как и положено, ниже медианных на 20-40%. Такое аномальное поведение параметров ионосферы на Камчатке наблюдалось впервые.

Рассмотрим событие 16.10.99 г. и те изменения в параметрах ионосферы, которые имели место накануне и которые также можно отождествлять с оперативными предвестниками сейсмического события. С 10 по 15 октября магнитосфера находилась в возмущенном состоянии (максимальный индекс $K_{\Sigma}=32$ отмечен 13.10.99, а минимальный $K_{\Sigma}=17$ – 11.10.99). С 12 октября зафиксирована перестройка ионосферы, вызванная магнитными бурями. Однако 13 и 15 октября отмечено превышение критической частоты над медианными значениями примерно на 12% и 24%, соответственно, а также смещение максимума f_0F_2 на четыре часа к утренним относительно полуночи часам (см. рис. 6 б). Такое смещение можно трактовать как аномальное, оно произошло на фоне магнитосферного возмущения, и его можно рассматривать как предвестник. Кроме того, следует отметить, что 13.10.99 г. в слое F_2 наблюдалась сильная диффузия (режим F), что обусловлено магнитосферным возмущением ($K_{\Sigma}=32$). На основе этих наблюдений, а также анализа события за 18.09.99 г., был сделан прогноз сейсмического события с энергетическим классом $K \approx 13$ в районе ионосферной обсерватории ИКИР (п. Паратунка) на период с 16 по 18 октября. Землетрясение произошло 16.10.99 с $K=11.8$ на расстоянии от обсерватории в пределах радиуса влияния такого сейсмического события (см. оперативный каталог). Радиус влияния, согласно [17], определяется степенным законом с показателем пропорциональным магнитуде события. Аналогичный характер в поведении параметров ионосферы наблюдался и три года спустя перед сильным землетрясением 16.10.2002 г.

На основе изложенных результатов можно заключить, что накануне сейсмического события в динамике поведения параметров ионосферы возможно проявление следующих аномалий:

- смещение максимума критической частоты f_0F_2 регулярного слоя F_2 на утренние часы относительно полуночи (UT) за 3-5 суток до сейсмического события, что совпадает с результатами других авторов;
- превышение текущих значений f_0F_2 над медианными, которое формируется на фоне возмущенной магнитосферы, что говорит о наличии некоторого дополнительного источника ионизации в слое F_2 , связанного с проникающим на ионосферные высоты электрическим полем и возникающими в результате этого токами;
- сложность наблюдения ионосферных предвестников землетрясений – в трудности выделения литосферных эффектов на фоне магнитосферных возмущений, это удается сделать только для сильных событий.

Ионосферные наблюдения дополняют исследование геофизических полей при поиске предвестниковых аномалий. К этому еще следует добавить методы, основанные на регистрации электромагнитного излучения, естественного или искусственного происхождения, распространяющегося по волноводу земля-ионосфера над районом подготовки землетрясения. Изменения характеристик излучения происходят в зависимости от состояний верхней и нижней границ радиоканала. Например, опускание верхней границы волновода приводит к повышению его критической частоты и отсечке низкочастотной области спектра излучения. А изменения импедансных условий на границах вызывают амплитудно-фазовые вариации сигналов. Преимущество данного метода в сравнении с рассмотренными выше подходами обнаружения предвестников заключается в том, что с его помощью наблюдаются одновременно литосферные и ионосферные эффекты. Радиофизические методы позволяют создавать глобальные системы радиотомографии атмосферы и мониторинга сейсмической обстановки. Рассмотрению этих методов посвящены два следующих раздела.

Предвестники в естественном электромагнитном излучении

Естественное электромагнитное излучение в атмосфере на средних широтах создается в основном грозовыми источниками, регулярное передвижение которых по планете в течение суток позволяет регистрировать сигналы с различных направлений. Интенсив-

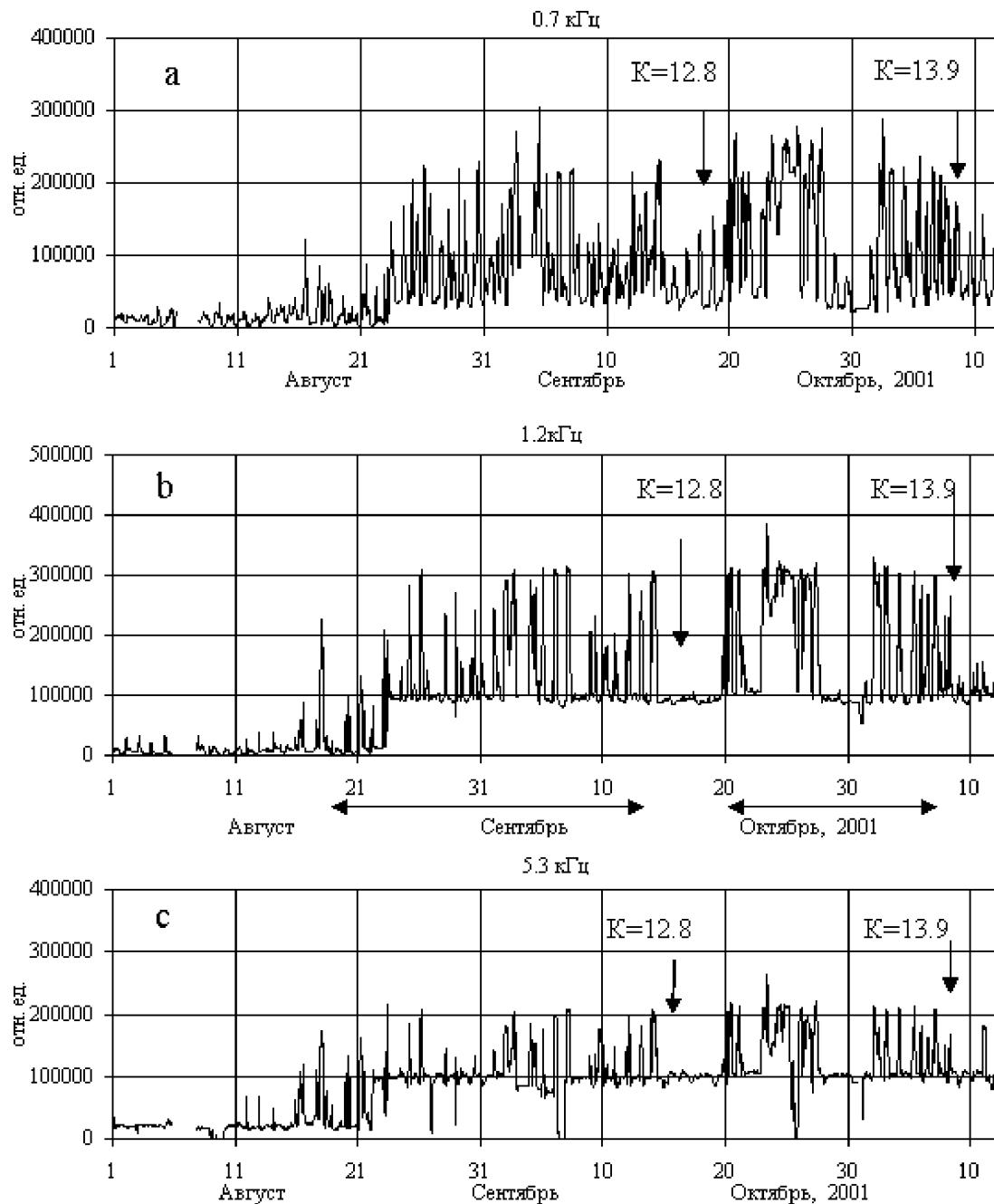


Рис.7. Вариации средней амплитуды ОНЧ сигнала на частотах 0.72, 1.2 и 5.3 кГц (а, б, с) во время землетрясения на Камчатке 17 сентября 2001 г. с энергетическим классом $K=12.9$ и координатами $\varphi=52.81^\circ$, $\lambda=159.97^\circ$, и землетрясения 8 октября 2001 с $K=13.9$ и координатами $\varphi=52.65^\circ$, $\lambda=160.42$.

Fig. 7. Variations of the mean amplitude of the VLF signal at the frequencies 0.72, 1.2 and 5.3 kHz (a, b, c) during the earthquake on Kamchatka on 17 of September, 2001 with energetic class $K_s=12.9$ and coordinates $\varphi=52.81^\circ$, $\lambda=159.97^\circ$, and the earthquake on 8 of October, 2001 with $K=13.9$ and coordinates $\varphi=52.65^\circ$, $\lambda=160.42$.

ность атмосферных шумов модулируется суточными и сезонными вариациями параметров ионосфера, которая определяет условия волноводного распространения сигналов. На низких закритических частотах волновода на небольших расстояниях от места подготовки сейсмического события можно наблюдать излучение, возникающее в земной коре в результате механоэлектрических эффектов. На основе данных регистрации излучений за период наблюдений 1997 – 2003 гг. были определены признаки в харак-

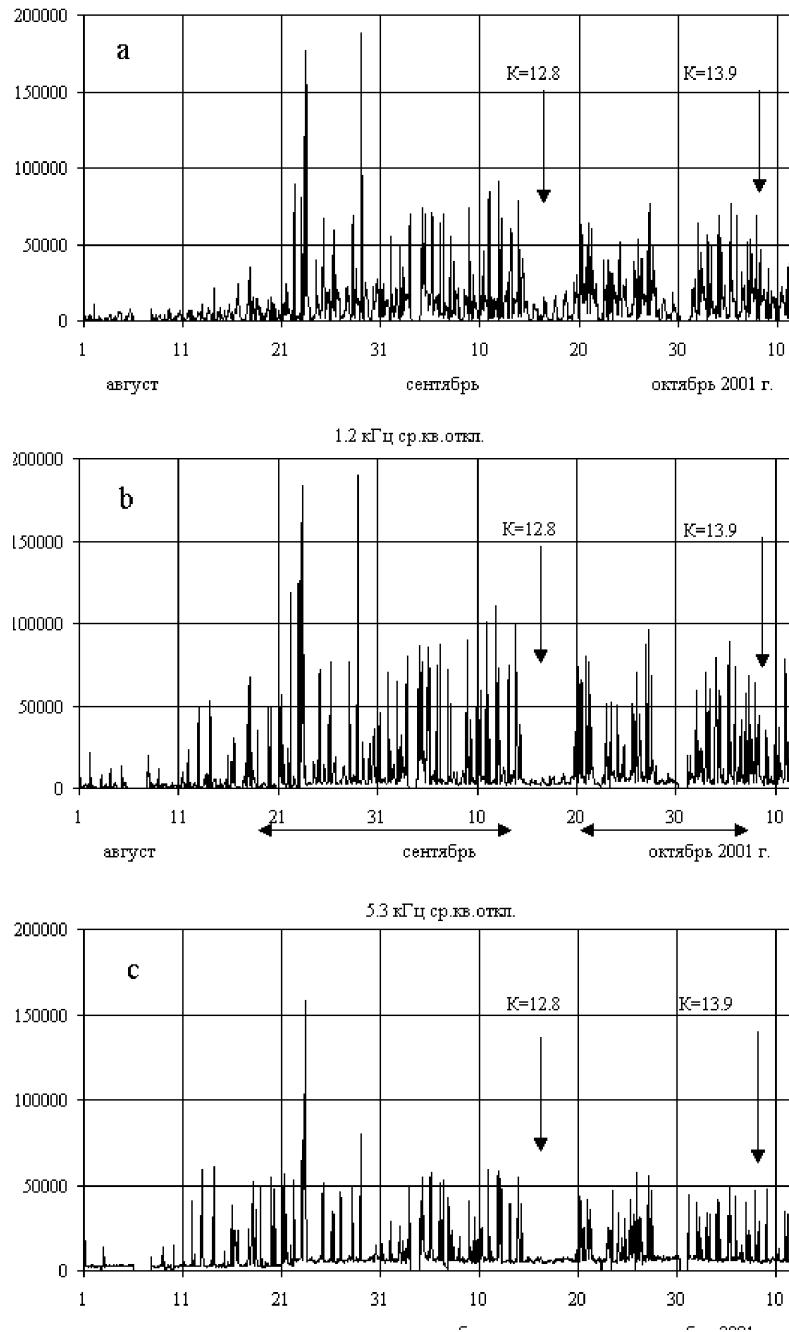


Рис.8. Среднеквадратические отклонения амплитуды ОНЧ сигнала на частотах 0,72, 1.2 и 5,3 кГц (а, б, с) во время землетрясения на Камчатке 17 сентября 2001 г. с энергетическим классом $K=12.9$ и координатами $\varphi=52.81^\circ$, $\lambda=159.97^\circ$, и землетрясения 8 октября 2001 с $K=13.9$ и координатами $\varphi=52.65^\circ$, $\lambda=160.42$.

Fig. 8. Mean-square deviations of the amplitude of VLF signal at the frequencies 0.72, 1.2 and 5.3 kHz (a, b, c) during the earthquake on Kamchatka on 17 of September, 2001 with energetic class $K_s=12.9$ and coordinates $\varphi=52.81^\circ$, $\lambda=159.97^\circ$, and the earthquake on 8 of October, 2001 with $K=13.9$ and coordinates $\varphi=52.65^\circ$, $\lambda=160.42$.

теристиках сигнала, по которым можно прогнозировать сейсмическое событие [11, 12]. Анализ аномалий, появляющихся в электромагнитных шумах перед достаточно сильными землетрясениями (энергетического класса $K \geq 13$), показал, что в большинстве случаев, за несколько суток до землетрясения, появляются сигналы с повышенными вариациями амплитуды. Такие изменения нельзя объяснить суточным или сезонным ходом интенсивности излучения атмосферных источников. При выявлении аномалий

в излучении наиболее эффективным оказался анализ вариаций среднеквадратических отклонений амплитуды сигнала.

На примере оправдавшегося прогноза для сейсмического события 17 сентября 2001 г. на Камчатке покажем сопровождавшие его изменения характеристик электромагнитного излучения. В логарифмическом масштабе на рис. 7 (а, б, с) даны вариации средней амплитуды сигнала на трех частотах, а на рис. 8 (а, б, с) – ее среднеквадратические отклонения. Повышенные уровни излучения перед землетрясениями отмечены горизонтальными стрелками. На рис. 7 хорошо видны отличия в поведении низкочастотных 0.7 кГц и высокочастотных 1.2 и 5.3 кГц излучений. Низкая критическая частота подавлена. Чем ниже частота, тем сильнее суточные вариации, что объясняется усилением влияния суточных изменений критической частоты. Сбои в суточных вариациях излучения говорят об аномалиях в изменении параметров волновода (ионосфера), а усиление амплитуды сигнала – о появлении мощных дополнительных источников. Эти источники ярче проявляются на низких частотах, а значит, они близко расположены и не грозового происхождения. Флуктуационные процессы в излучении сильны на низких и средних частотах, см. рис. 8, но они имеют разную структуру, а значит, и разную природу. Сигналы на частоте 0.7 кГц связаны с процессами на нижней границе волновода, а на частоте 1.2 кГц – на верхней.

Флуктуационные эффекты в сигналах были выбраны в качестве прогностического признака. По недельному периоду их наблюдений давался прогноз в течение 1999–2001 гг., или 156 недель. За это время произошло 33 события энергетического класса $K \geq 12.6$, при подготовке столь сильных землетрясениях флуктуационные эффекты уверенно наблюдаются. Радиус влияния таких событий составляет сотни километров, поэтому в район наблюдений попадала значительная часть зоны субдукции, что обеспечивало достаточную частоту исследуемых сильных событий, которая равнялась 0.9 события в месяц.

Если в месяц происходит примерно одно событие, а понедельный прогноз дается четыре раза, то вероятность случайного угадывания составляет $1/4=0.25$. За весь период наблюдений было дано 22 положительных прогноза. Из них 10 оправдались, а 12 оказались ложными. Оправдавшиеся прогнозы относятся к общему числу событий как $10/33 \approx 0.3$, это – оценка вероятности удачного прогноза, которая незначительно превышает вероятность случайного угадывания, что говорит о невысокой надежности выбранного признака. Эффективность прогноза определяется как $0.3/0.25 \approx 1.2$, но эта величина непоказательна. Более того, она зависит от интервала наблюдения. Например, если его увеличить до месяца, то вероятность случайного угадывания станет равной 1, а эффективность – заведомо меньше 1. И она совсем будет мала, если мы захотим пронаблюдать много событий, а затем еще одно предсказать. Вероятность случайного угадывания, стоящая в знаменателе, будет линейно растущей величиной, вычисляемой через поток вероятности, равный в данном случае 0.9 события в месяц. Понятно, что при сколь угодно длительных наблюдениях их эффективность можно свести к нулю, поскольку знаменатель при этом все равно не может стать больше единицы.

Основной характеристикой прогноза является вероятность удачного его результата, которая определяется через коэффициент корреляции двух рядов: наблюдений и прогноза. Эта величина меняется от 0 до 1. Если 1, то прогноз абсолютно надежный, а если 0, то прогностический признак настолько плох, что позволяет избежать угадывания абсолютно всех событий. Точность оценки вероятности определяется длительностью рядов.

Конечно, можно улучшать схемы прогноза и повышать вероятности удачного результата, но надо не забывать о том, что речь идет о наблюдениях за сложным нелинейным и многомасштабным процессом, предсказать поведение которого достоверно невозможно, тем более с помощью простых прогностических признаков. В подтверждение этому следует добавить, что вероятность удачного прогноза методов, рассмотренных в двух предыдущих разделах, не выше. Вероятность 0.3 или чуть больше –

это, по-видимому, все, на что следует рассчитывать в данных геофизических наблюдениях. В такой ситуации лучше говорить о методах слежения за развитием сейсмического процесса, а не о его прогнозе. При комплексировании малоэффективных методов прогноза все равно будет получаться малая эффективность, поскольку вероятности в этом случае не складываются, а усредняются. И дело не в том, что выбран плохой прогностический признак, а в сложности сейсмического процесса. Например, признак может и пройти, а событие при этом может быть отложенным, как на рис. 7 и 8, см. второе землетрясение. Такому явлению, конечно, можно найти объяснение, но это приведет к усложнению схемы прогноза.

Предвестники в когерентном электромагнитном излучении

Для выявления предвестниковых аномалий проводились исследования условий распространения радиоволн диапазона сверх длинных волн (СДВ) на меридиональных трассах в канале земля-ионосфера, в ходе которых наблюдалась вариации амплитуды и фазы излучения радионавигационных станций "ОМЕГА" [27]. Прием сигналов осуществлялся в поселке Стекольный (60° с.ш., 151° в.д.) в 1993-1997 гг. Наблюдения показали, что сохраняются стабильные суточные вариации амплитуды и фазы излучения, на фоне которых возникают аномалии, связанные с сильными атмосферными и литосферными возмущениями. Схемы трех трасс (с их областями чувствительности к возмущениям) и сейсмических событий с магнитудой $M>6$, пронумерованных ци-

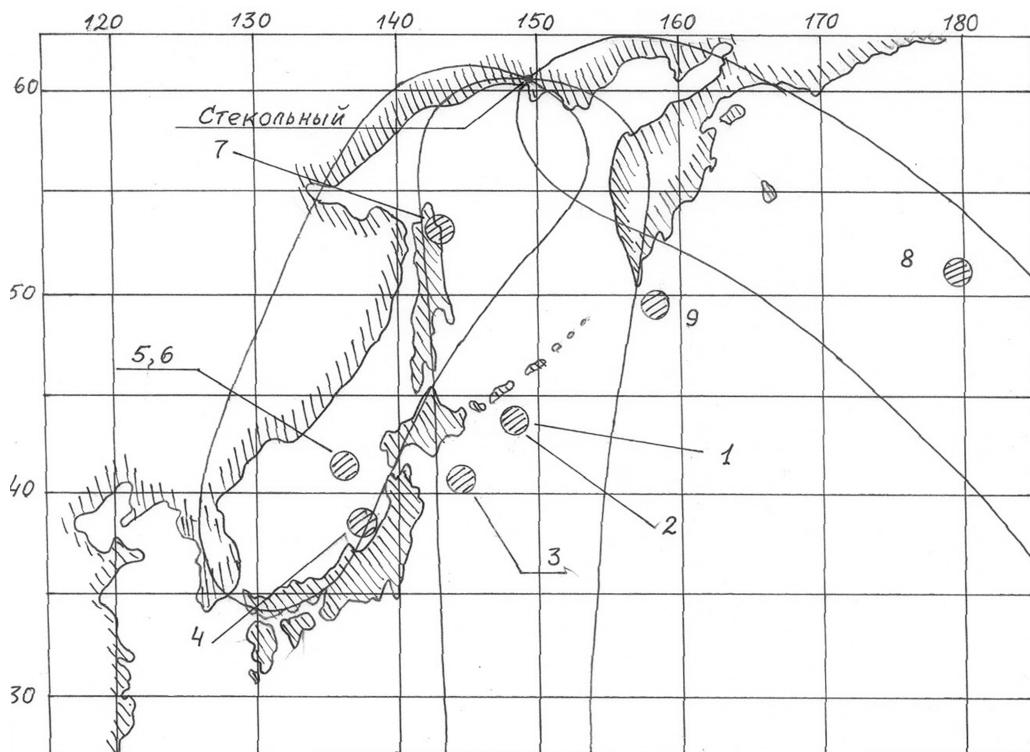


Рис. 9. Карта некоторых землетрясений, обозначенных заштрихованными кружками 1-9, и геометрия трасс СДВ с областями влияния.

1 – октябрь 1994 г. 2 – 28÷30.04.95, 7÷8.05.95, 16÷17.05.95, 03÷07.07.95 г.г. 3 – 25.05.95 г. 4 – 08.07.95 г. 5 – 23, 24 октября 1995 г. 6 – 02.07.95 г. 7 – 27 мая 1995 г. 8 – 23.04.95, 06.07.95, 11.07.95 г.г. 9 – 14÷15.05.95, 03÷07.07.95 г.г.

Fig. 9. Map of some earthquakes marked by shaded circles 1-9, and geometry of SLW lines with areas of influence.

1 – October 1994, 2 – 28÷30.04.95, 7÷8.05.95, 16÷17.05.95, 03÷07.07.95, 3 – 25.05.95, 4 – 08.07.95, 5 – 23, 24 October 1995, 6 – 02.07.95, 7 – 27 May 1995, 8 – 23.04.95, 06.07.95, 11.07.95, 9 – 14÷15.05.95, 03÷07.07.95.

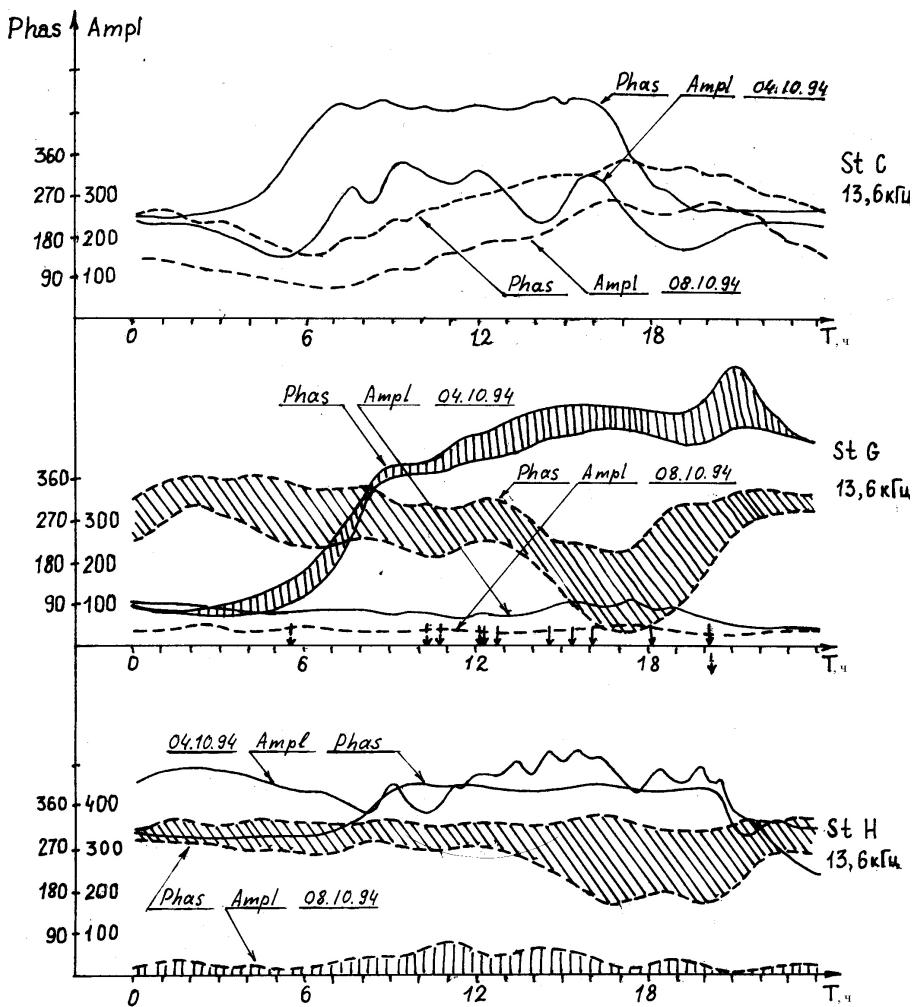


Рис. 10. Амплитудно-фазовые характеристики сигнала радионавигационной станции «Омега» на частоте 13.6 кГц в сейсмически активный период 4 (сплошная линия) и 8 (пунктирная линия) октября 1994 г., подземные толчки обозначены стрелками, быстрые флюктуации амплитуд и фаз обозначены заштрихованными областями. Ampl – амплитуда сигнала СДВ, Phas – фаза сигнала СДВ, St C – станция СДВ на Гавайях, St G – станция СДВ в Австралии, St H – станция СДВ в Японии (Цусима).

Fig. 10. Amplitude-phase characteristics of the signal of radio navigation station “Omega” at frequency 13.6 kHz during seismically active period on 4 (a continuous line) and 8 (dashed line) of October, 1994, tremors are designated by arrows, fast fluctuations of amplitudes and phases are designated by the shaded areas. Ampl - amplitude of SLW signal, Phas - phase of SLW signal, St C - SLW station on Hawaii, St G - SLW station in Australia, St H - SLW station in Japan (Tsushima).

фрами 1-9, представлены на рис. 9. Примеры вариаций амплитуды и фазы излучения на частоте 13.6 кГц для трех трасс (радиостанций) в дни сейсмической активности 4 и 8 октября 1994 г. приведены на рис. 10, где быстрые флюктуации наблюдаемых величин обозначены заштрихованными областями. Местоположение сейсмических событий в эти дни отмечено на рис. 9 цифрой 1.

Рис. 10 (*St G*) показывает, как радиосигналы на австралийской трассе отреагировали на события в районе Курильских островов. Для сравнения здесь же приведены характеристики излучения на гавайской (*St C*) и японской (*St H*) трассах, не связанных с событиями. Видно, что наиболее чувствительна фаза сигнала, ее поведение зависит от характеристик, как самой трассы, так и наблюданного сейсмического события. Примечательно, что землетрясения расположены под дном океана, а значит, морская вода, обладающая хорошей электропроводностью, не препятствует прохождению тока

грозовых генераторов и формированию возмущений в ионосфере. Если бы электрическое поле создавалось в самой литосфере, то оно экранировалось бы проводящей средой. Это еще раз указывает на важную роль тока грозовых генераторов в формировании взаимодействия между земной корой и ионосферой. Морская поверхность является идеально отражающей для электромагнитных волн, в результате этого наблюдаются только ионосферные эффекты. Возникающие часто быстрые амплитудно-фазовые флюктуации в излучении говорят о том, насколько эти эффекты динамичны.

Предвестники в геоакустических шумах

В предыдущих разделах рассматривались атмосферные явления и их связь с сейсмичностью, а ниже в этом же контексте будут обсуждаться динамические, акустические и электромагнитные процессы в земной коре, одной из характеристик состояния которой являются геоакустические шумы. Их интенсивность определяется тектоническими сжатиями, приливными деформациями, метеорологическими и электромагнитными воздействиями. В этом разделе будет уделено внимание только двум факторам: первому в связи с наблюдением предвестников сейсмических событий и последнему в связи с влиянием солнечной активности на литосферные процессы через усиление процессов трещинообразования под воздействием грозовых электрических полей. Рассмотрим влияние тектонических деформаций на интенсивность геоакустических шумов.

При помощи двух систем направленных гидрофонов, размещенных в искусственном водоеме и озере, на Камчатке выполнены многолетние наблюдения за геоакустической эмиссией в частотном диапазоне 0...10 кГц в целях изучения ее характеристик на заключительной стадии подготовки сейсмических событий. Показано, что геоакустические шумы анизотропные, их интенсивность возрастает в направлении зоны субдукции и в примерно суточном временном интервале перед сильными землетрясениями в течение нескольких часов уровень шумов, как правило, увеличивается многократно по амплитуде, а пеленги сигналов совпадают с направлениями на сейсмические события.

Согласно существующим представлениям о механизмах подготовки сейсмических событий, медленное и продолжительное сжатие горных пород перед землетрясениями сменяется быстрым ростом упругих напряжений, приводящих к лавинообразному трещинообразованию.

Акустическая энергия трещинообразования выделяется в очень широком диапазоне частот, но возможность регистрации высокочастотных геоакустических сигналов на расстоянии ограничена их сильным ослаблением, которое линейно возрастает в зависимости от частоты. В то же время деформации из будущих очагов землетрясений распространяются на десятки и сотни километров, дальность определяется размером очага, в результате чего области трещинообразования могут находиться в непосредственной близости от точки наблюдения. Условия распространения волн деформации определяют пространственное распределение сейсмических событий, которые сопровождаются геоакустическими сигналами повышенной интенсивности. В связи с существенным влиянием этих условий получается невысокий коэффициент корреляции между геоакустическими аномалиями и сильными сейсмическими событиями, равный 0.3.

На рис. 11 приведены примеры повышения уровня геоакустической эмиссии в высокочастотной части спектра, наблюдавшиеся за 9–30 часов до завершающей стадии сейсмических событий, имеющих магнитуду и эпицентр, расположенный не далее 250 км от пункта регистрации.

На рис. 12 показаны сигналы с гидрофонов, расположенных в восточном, северном и южном направлениях, и гидрофона, направленного вертикально вниз. Из соотношения амплитуд колебаний в приемниках с различной ориентацией определяется при-

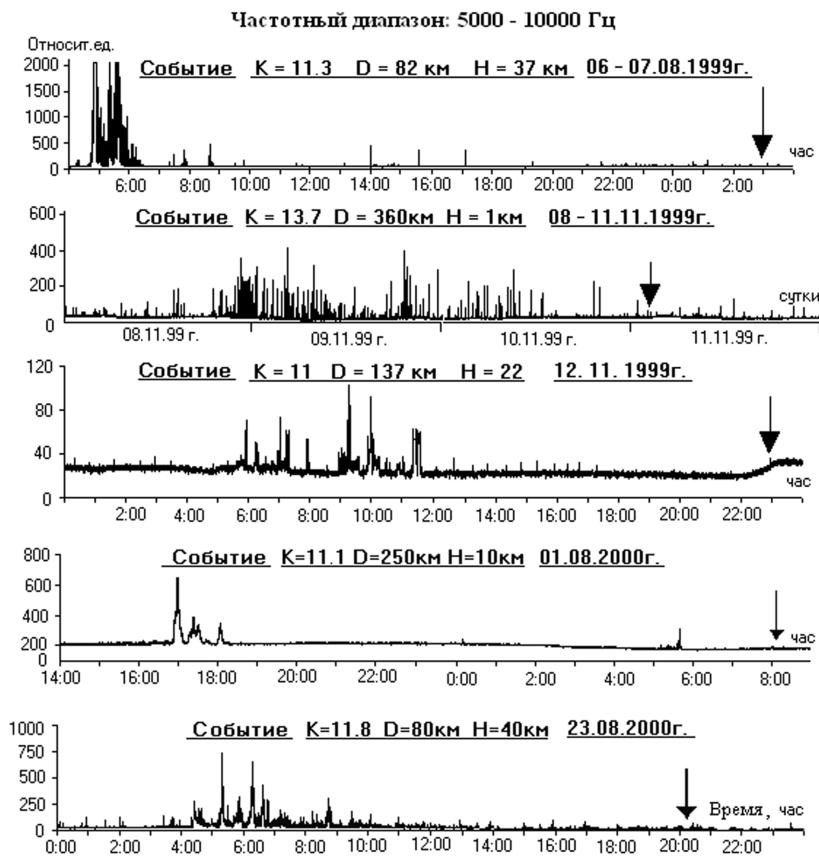


Рис. 11. Примеры повышения уровня геоакустической эмиссии в высокочастотной части спектра.

Fig. 11. Examples of increase of the level of geoacoustic emission at a high-frequency part of the spectrum.

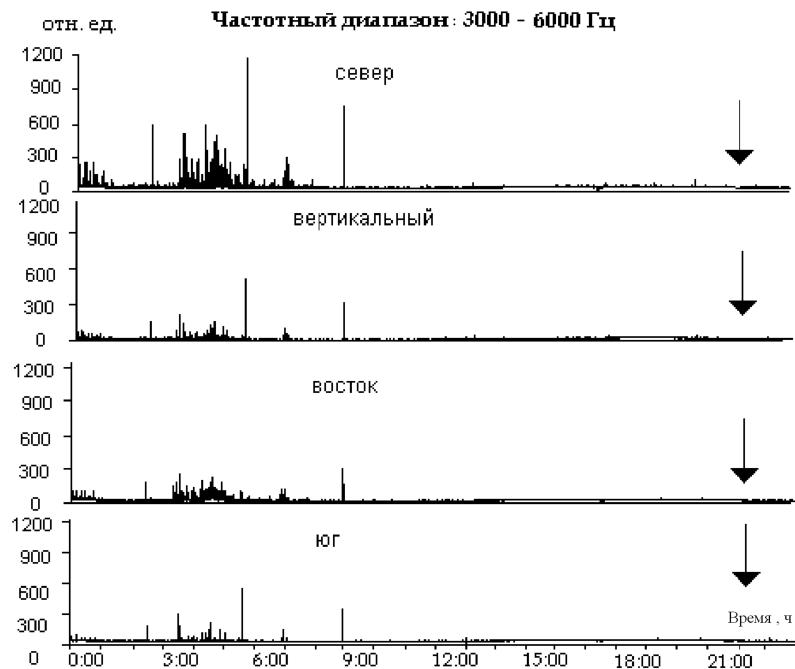


Рис. 12. Анизотропия высокочастотной геоакустической эмиссии. Событие от 12.05.2002 г. 22:15:29 (указано стрелкой), расстояние – 205 км, глубина – 26 км, азимут – 63°, энергетический класс – 11,6.

Fig. 12. Anisotropy of high-frequency geoacoustic emission. Event on 12.05.2002, 22:15:29 (marked by an arrow), distance - 205 km, depth - 26 km, an azimuth - 63°, a power class - 11,6.

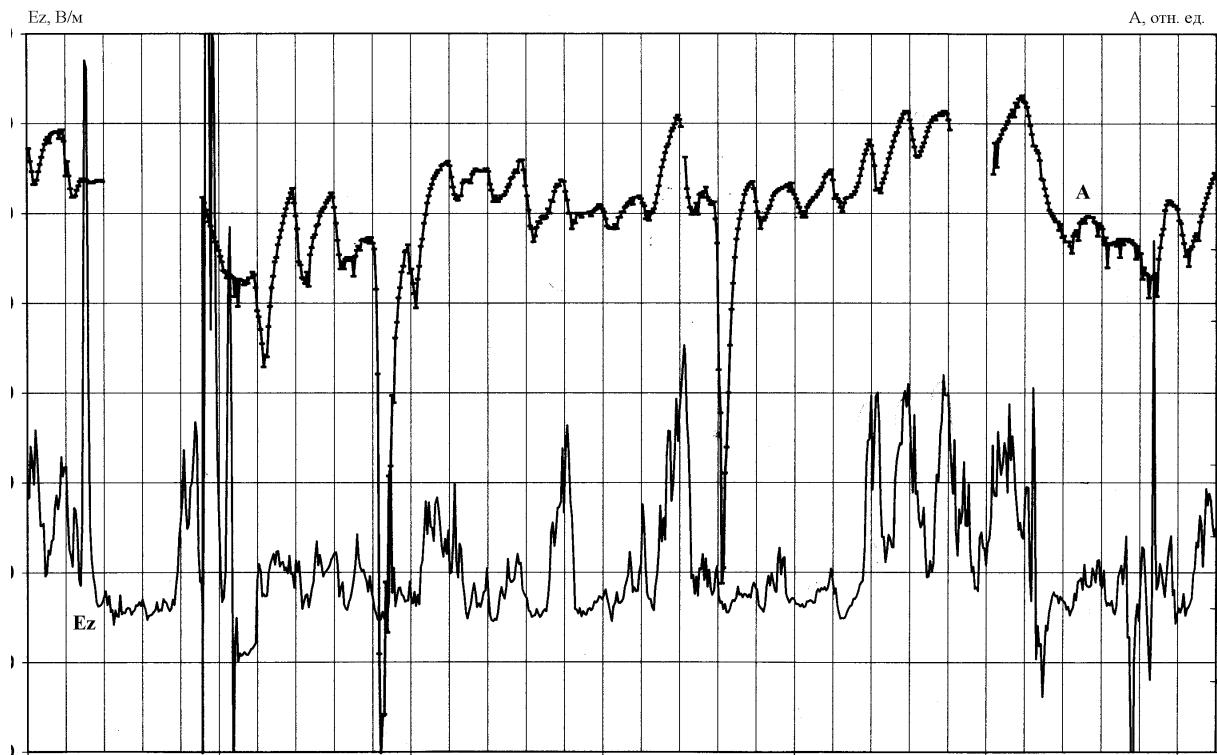


Рис. 13. Сопоставление вариаций амплитуды А высокочастотной геоакустической эмиссии на частоте 4.5 кГц с атмосферным электрическим полем E_z .

Fig. 13. Comparison of variations of amplitude A of high-frequency geoacoustic emission at frequency 4.5 kHz with atmospheric electrical field E_z .

ближеннное значение пеленга сигнала, который примерно совпадает с направлением на сейсмическое событие. Как в этом случае, так для других событий несовпадение лежит в пределах ширины диаграммы направленности приемника.

При рассмотрении фоновых характеристик геоакустических шумов обычно отмечается большое разнообразие влияющих на них факторов, среди которых выделяются постоянно действующие, такие как приливные и электромагнитные. Первые из них хорошо проявляются на временных масштабах порядка месяца и более, а вторые — на суточных и недельных. Последнее обстоятельство обусловлено существенным влиянием на этих периодах солнечной и грозовой активности на формирование геоакустических шумов. В подтверждение этому на рис. 13 показаны вариации амплитуды высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля. Видно, что наблюдается очень хорошая корреляция. Незначительные отклонения вполне могут быть отнесены на счет влияния метеофакторов.

Заключение

О роли гелиосферных возмущений в активизации геофизических процессов давно ведется широкая дискуссия, и выполняются многочисленные исследования. Это стимулируется наличием богатого статистического материала, подтверждающего такие проявления. Однако гелиосферные возмущения на Земле при сравнении по энергиям с тепловыми, сейсмическими и приливными процессами занимают последнее место, что всегда вызывало сомнения в эффективности столь слабых воздействий. В связи с этим разрабатывались концепции, отводившие солнечной активности роль управления геофизическими процессами. На основе одной из таких концепций и построен данный обзор. Этот подход и позволил проанализировать взаимодействие рассмотренных геофизических полей и установить их связи с сейсмической активностью.

Работа выполнена при поддержке проектов ДВО РАН № 04-1-02-008 и РФФИ № 03-05-65302.

Список литературы

1. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 2. М.: Мир. 1975. 512 с.
2. Бреус Т. К., Конрадов А. А. Эффекты ритмов солнечной активности // В кн.: Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Янус - К. 2002. Т.3. С.516-524.
3. Бузевич А. В., Смирнов С. Э. Метод прогноза Камчатский землетрясений по вариациям геомагнитного и атмосферного электрического полей Земли на фоне гелиомагнитосферных процессов // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. Хабаровск. 2001. С. 179-186.
4. Бузевич А. В., Смирнов С. Э., Филимонов В. И., Фирстов П. П. Специализированный программно-аппаратный комплекс обработки геофизической информации // Сб. I межд. совещ. «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники». П.-Камчатский. 1998. С. 36-39.
5. Вергасова Г. В., Казимировский Э. С. Относительный вклад энергетических источников в квазипериодические вариации ветра в нижней термосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т.33. №6. С.112.
6. Виницкий А. В., Казанцева В. В. Взаимосвязь параметров нижней атмосферы, характеристик ионосферы и геомагнитного поля на Севере-Востоке России. Оптика атмосферы и океана, 2001, том 14, номер 10, с. 970-974.
7. Виницкий А. В., Казанцева В. В., Соколов В. И. Исследование связи сейсмической активности на Востоке России с характеристиками атмосферы, с солнечной и геомагнитной активностью. Солнечная активность и солнечно-земные связи. Владивосток. ДВО АН СССР. 1991. с. 71.
8. Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. Солнце, погода и климат / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
9. Гордиенко Г. И., Калиев М. З. Связь межсуточных вариаций ионосферы с изменением солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. № 4. 1997.
10. Дворников В. М. Сдобнов В. Е. Связь геоэффективных процессов на солнце со структурой и динамикой полей гелиосферы. – Геомагнетизм и аэрономия т. 35, 1995.
11. Дружин Г. И. Электромагнитные предвестники землетрясений в ОНЧ излучении // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. «Наука – для Камчатки» С.85-90.
12. Дружин Г. И. Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 51–62.
13. Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических и наземно-космических методов. Сб. докладов конференции, Москва, 2-3 октября 1997, РАН ОИФЗ им. О. Ю. Шмидта.
14. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В., Бузевич А. В., Смирнов С. Э. Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 3. С. 422-428.
15. Морозов В. И., Шварц Я. М., Щукин Г. Г. Глобальная электрическая цепь: физико-математическое моделирование и регулярные измерения в нижней атмосфере // Сб. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. – М.: ОИФЗ РАН. 2000. С. 55.
16. Николаев А. В. Как управлять землетрясениями? // Земля и вселенная: Космонавтика, астрономия, геофизика. №3. 1999.

17. Пулинец С. А., Лю Й. Я., Сафонова И.А. Интерпретация результатов статистического анализа вариаций критической частоты f_0F2 перед землетрясениями по данным ионосферной станции ЧУНГ-ЛИ (Тайвань) // Геомагнетизм и астрономия, 44, №3, с.113-118, 2004.
18. Пулинец С. Д., Хегай В. В., Боярчук К. А., Ломоносов А. М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы. УФН, 168, № 5, с. 582-589, 1998.
19. Руленко О. П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. N.4. С.57-68. 2000.
20. Сидоренков Н. С. Атмосферные процессы и вращение Земли. - С.-Пбг.: Гидрометеоиздат, 2002. С. 292-296.
21. Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов. Под ред. Бруцека А. и Дюрана Ш. М: Мир. 1980. ст. 167.
22. Сытинский А. Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. - Л. Гидрометеоиздат, 1987.-98с.
23. Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А.А., Зайгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность средней Азии и Казахстана. // Вулканология и сейсмология. N.4-5. С.152-160. 1999.
24. Volland H. Handbook for MAP, USA, 1981, V.1, 85.
25. Volland H. Quasielectrostatic field at the atmosphere. Handbook of Atmospheric. CRC Press, USA, 1981.
26. Roble B. G., Hays P. B. Solar-terrestrial coupling through atmospheric electricity. - Middle Atmosphere Electrodynamics, NASA, USA, 1979, 89.
27. Poddelskiy I. N. The variation of VLF-signals characteristics during the earthquakes. Abstracts of the reports of VIII Joint International Symposium “Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics”, Irkutsk, June 25 – 29, 2001.