



УДК 621.371/.372(571.6)

© В. И. Нестеров, 2008

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН СДВ-ДИАПАЗОНА В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ РЕГИОНЕ

Нестеров В. И. – канд. физ. - мат. наук, доц. кафедры «Физика», тел. (4212) 43-58-09, e-mail: vlnestor@mail.kht.ru (ТОГУ)

Рассматриваются вопросы, связанные с распространением сигналов СДВ-диапазона в волноводном канале Земля – ионосфера при приеме сигналов радиостанций на различных трассах как по длине, так и ориентации и на различных частотах. На параметры распространения сигналов данного диапазона оказывают влияние факторы, которые рассматриваются в данной статье: возмущения в авроральной зоне, солнечные затмения, внезапные ионосферные возмущения, сейсмоионосферные взаимодействия. Также представляет интерес слой С, который можно регистрировать только при некоторых дополнительных условиях.

The signal propagation of the VLF range is discussed in the Earth – ionosphere waveguide channel in signal receiving on various paths differing both in length and orientation and on a variety of frequencies. The factors influencing the propagation of radio waves of this range such as perturbations in the auroral zone, solar eclipse, sudden perturbations in the ionosphere, and seismic ionosphere interactions are considered. The C layer is also of interest, which can be recorded only under special conditions.

Ключевые слова: ионосфера, СДВ-диапазон, распространение радиоволн, землетрясение, слой С.

Возмущения характеристик, принимаемых сверхдлинноволновых (СДВ) радиосигналов, связаны с изменением параметров волновода, верхней стенкой которого служит нижняя граница ионосферы (60–90 км), а его естественной нижней отражающей поверхностью является суша или водная среда. Поле СДВ-диапазона сравнительно мало подвержено вариациям, вызванным трудно предсказуемыми гелиофизическими явлениями, так как на формирование поля влияет только нижняя часть ионосферы, структура которой обладает относительно высокой стабильностью. Поэтому данный диапазон представляет большой интерес для исследований нижней ионосферы. С этой точки зрения актуальность задачи состоит в исследовании закономерностей ано-

мального распространения сигналов для прогнозирования и иллюстрации некоторых физических явлений, происходящих в окружающей среде при таких условиях, т.е. проникновение протонов и электронов в авроральной области, рентгеновского излучения в средних и низких широтах.

Основой экспериментальных данных являлись наблюдения за распространением сигналов радиостанций радионавигационной системы «Омега» (шесть станций на трех частотах одновременно) относительно высокостабильного генератора частоты Вторичного эталона времени и частоты на длительном интервале (с 1976 по 1987 гг., т. е. в пределах одного солнечного цикла).

Основная цель данной статьи – показать основные аспекты, приводящие к аномалиям при распространении радиоволн в случае приема сигналов в Хабаровске, создать модель нижней ионосферы при этих условиях. Рассматриваются основные вариации фазы принимаемого сигнала, которые возникали при регистрации в условиях аномального распространения, а именно: внезапные ионосферные возмущения (ВИВ); возмущения типа поглощения в полярной шапке (ППШ); возмущения в авроральной зоне; геомагнитные бури и т. д. Эти возмущения можно классифицировать по характеру проявления, продолжительности во времени, глобальности, возможным причинам возникновения, степени влияния на параметры СДВ-сигнала.

Влияние физических полей в атмосфере изменяет условия приема радиоволн, но при этом одновременно помогает решению диагностических задач. Как показали многолетние измерения сигналов РНС «Омега», возмущения ионосферной среды, наблюдаемые в виде характерных искажений стандартных суточных вариаций фазы СДВ-сигналов, могут генерироваться терминатором и затмениями Солнца, солнечными вспышками, событиями типа поглощения в полярной шапке (ППШ). При таких процессах, имеющих существенно нелокальный характер, соответствующие возмущения фазы могут регистрироваться почти одновременно на многих трассах различных радиосистем. Ниже приводятся результаты исследований проведенных выше аномалий, которые можно было наблюдать в точке приема (г. Хабаровск).

Аномалии СДВ-сигналов в высоких широтах. Основная особенность ионосферы высоких широт – подверженность воздействию корпускулярных потоков. Источником таких потоков является Солнце, от которого происходит непрерывное истечение солнечной плазмы, получившее название солнечного ветра [1]. Солнечный ветер состоит из протонов и электронов, и в меньшей степени в нем присутствуют ионы гелия, так что нейтральность плазмы солнечного ветра сохраняется.

Также в высокие широты вторгаются солнечные космические лучи, скорость которых на порядок выше скорости солнечного ветра. Солнечные космические лучи проникают в атмосферу Земли гораздо глубже, чем авроральные частицы, и создают сильную однородную ионизацию нижней части слоя *D* в областях полярных шапок.



Наиболее типичными возмущениями в ионосфере высоких широт являются авроральное поглощение и поглощение типа полярной шапки.

Аномалии фазы СДВ-сигналов, связанных с авроральным поглощением, вызываются осаждением высокоэнергичных электронов, которые проникают до высот отражения СДВ. Считается, что до ночной высоты отражения СДВ могут проникать электроны с энергиями более 40 кэВ, а до дневной – более 200 кэВ.

Поглощение типа полярной шапки обнаружено в высоких широтах после некоторых, чаще больших, хромосферных вспышек на Солнце и может продолжаться от нескольких часов до нескольких суток. В отличие от аврорального поглощения ППШ обладает однородностью в пространстве и плавностью изменения во времени. Поглощение этого типа вызывается солнечными космическими лучами (в основном протонами с энергиями 1–100 МэВ), выбрасываемыми Солнцем во время хромосферной вспышки. В высоких широтах в летний период, когда ионосфера освещена круглые сутки, суточной вариации поглощения нет и изменения поглощения в это время отражают изменения потока солнечных космических лучей, ионизирующего нижнюю ионосферу полярных шапок.

Вопрос о воздействии на фазу СДВ геофизической активности остается наименее изученным. В работе [2] с достаточной четкостью интерпретируются лишь эффекты типа поглощения в полярной шапке, вызванные дополнительной ионизацией вторгающимися в полярную шапку релятивистскими протонами и электронами. Эффекты, источником которых является авроральный овал, изучены значительно хуже. Это тем более относится к интерпретации наблюдений на среднеширотных и длинных трассах.

Анализировались данные измерений на трассе Омега (Норвегия)–Хабаровск длиной 6340 км, которая захватывает как авроральный овал, так и среднеширотную зону [3]. Задача заключалась в разделении и оценке вклада в вариации фазы авроральных и среднеширотных эффектов.

Анализ гелиогеофизической информации, публикуемой регулярно в ежемесячниках "Космические данные" и "Solar Geophysical Data", позволяет сделать заключение, что одним из наиболее показательных периодов геофизической активности в 21 цикле солнечной деятельности явился февраль 1982 г. Этот период и был выбран для подробного изучения эффектов авроральной активности в поведении фазы СДВ - сигналов.

Так как рассматриваемая радиотрасса проходит и через высокоширотные, и через среднеширотные области, наличие возмущений СДВ должно затруднить идентификацию эффектов большей продолжительности и с временными задержками порядка нескольких суток (как, например, для т. н. послепуревых эффектов) из-за их взаимного наложения.

Заблаговременность прогноза фазы СДВ-поля зависит от временных задержек возмущений фазы относительно геомагнитных и от периодов собственных колебаний фазы. Для короткопериодных вариаций, с учетом необходимой цифровой фильтрации, заблаговременность прогноза возмущений

от aa -индекса может составлять 1–2 суток, а для долгопериодных вариаций может составлять 4–6 суток.

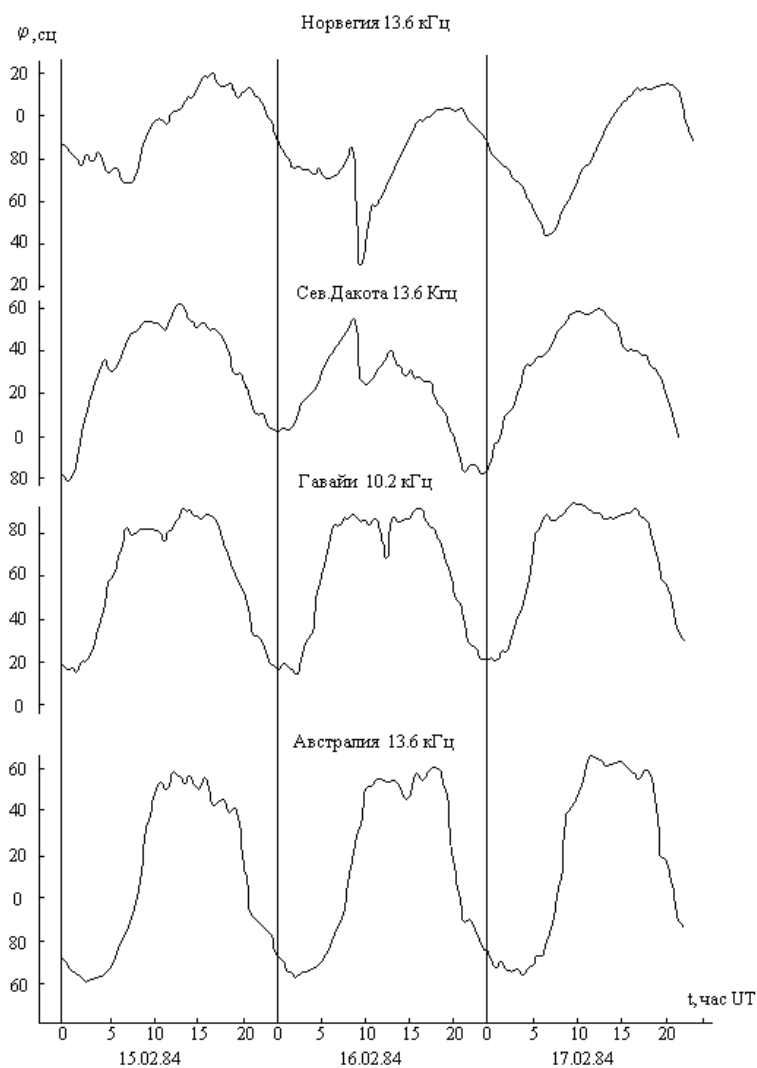


Рис. 1. Поведение фазы принимаемых сигналов за период 15–17.02.1984 г. для различных трасс

Одним из компонентов солнечной вспышки является поток субрелятивистских протонов с энергиями от 1 до 1000 МэВ, движущихся по спирали вдоль силовых линий геомагнитного поля и достигающих полярных областей



за время от 8 мин до 4 час. Именно протоны с такими энергиями являются преобладающим типом солнечных частиц, хотя в ряде случаев зарегистрированы также α -частицы и солнечные электроны высоких энергий. Основное физическое воздействие солнечных частиц заключается в сильной ионизации нижней ионосферы.

Влияние геомагнитного поля обычно препятствует вторжению частиц в ионосферу за пределами зоны полярных сияний. Таким образом, поглощение в полярной шапке характерно лишь для высоких широт (выше $\sim 65^\circ$) и практически однородно во всей области полярной шапки.

Зондирование ионосферы радиоволнами СДВ-диапазона до сих пор остается практически наиболее чувствительным способом обнаружения аномальной ионизации *D*-слоя. В этом смысле представляет интерес на основе СДВ-метода и других геофизических измерений исследовать некоторые изменения в нижней ионосфере, наблюдавшиеся во время солнечной протонной вспышки 16 февраля 1984 г. [4]. Интерес к этой вспышке определяется двумя причинами.

Во-первых, активизация произошла на невидимой с Земли стороне Солнца. По этой причине существенного повышения жесткого рентгеновского излучения не наблюдалось. А во-вторых, было зафиксировано возрастание солнечных космических лучей.

На рис.1 показано поведение фазы СДВ-сигналов за период с 15 по 17 февраля 1984 г. для трасс, как пересекающих авроральную зону (Норвегия–Хабаровск), так и расположенных в средних широтах (Гавайи–Хабаровск, Австралия–Хабаровск). Как видно из рисунка, изменение фазы, вызванное солнечной протонной вспышкой, началось в 09.05 UT (Норвегия–Хабаровск, длина трассы 6290 км) и в 09.10 UT (Сев.Дакота–Хабаровск, 8260 км). Время максимального изменения фазы приходится на 09.55 UT и 10.15 UT соответственно. А максимальное изменение фазы принимаемого сигнала равно 57 сц (205°) для трассы Норвегия–Хабаровск и 35 сц (126°) для трассы Сев.Дакота–Хабаровск. Хотя трасса Норвегия–Хабаровск несколько меньше другой трассы, проходящей также через авроральную зону, изменение фазы СДВ-сигнала значительно больше, хотя интегральное воздействие за счет более длинной трассы должно оказать большее влияние на трассу Сев.Дакота–Хабаровск. Однако это явление объясняется тем, что трасса Норвегия–Хабаровск имеет протяженность в зоне аврорального круга больше, чем трасса Сев.Дакота–Хабаровск. Этим можно объяснить то явление, что суточный ход фазы на трассе Сев.Дакота–Хабаровск имеет одинаковый вид как 15 февраля, так и 17 февраля, т.е. как до вспышки, так и после нее. А для трассы Норвегия–Хабаровск произошло общее понижение фазы принимаемого сигнала как днем (более значительное), так и ночью. Вследствие сильной анизотропии и отсутствия отраженного потока СКЛ в межпланетном пространстве вторжение солнечных частиц в магнитосферу могло происходить только с утренней стороны. Максимумы интенсивности на утренней стороне авроральной зоны, а также в центре полярной шапки обусловлены скорее всего

прямым проникновением солнечных частиц. Вместе с тем проникновение СКЛ на дневную и вечернюю стороны, а тем более глубоко в область замкнутых силовых линий и значительно южнее геомагнитного порога для вертикально падающих частиц могло происходить только в результате дрейфа с утренней стороны на вечернюю. Таким образом, наиболее вероятным механизмом образования дневного и вечернего авроральных максимумов в событии 16.02.84 г. является высыпание частиц в процессе их дрейфа из области вторжения на утренней стороне магнитосферы.

Как видно из рис. 1, незаметно влияние солнечной протонной вспышки 16 февраля на поведение фазы принимаемых сигналов на трассах, проходящих в средних широтах.

Внезапные ионосферные возмущения. Во время вспышки Солнце представляет собой мощный источник рентгеновского и ультрафиолетового излучений. Увеличение интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового излучений, наблюдаемое во время хромосферных вспышек, немедленно вызывает возрастание электронной концентрации в ионосфере. Эти изменения концентрации различны для разных высот и носят общее название внезапных ионосферных возмущений.

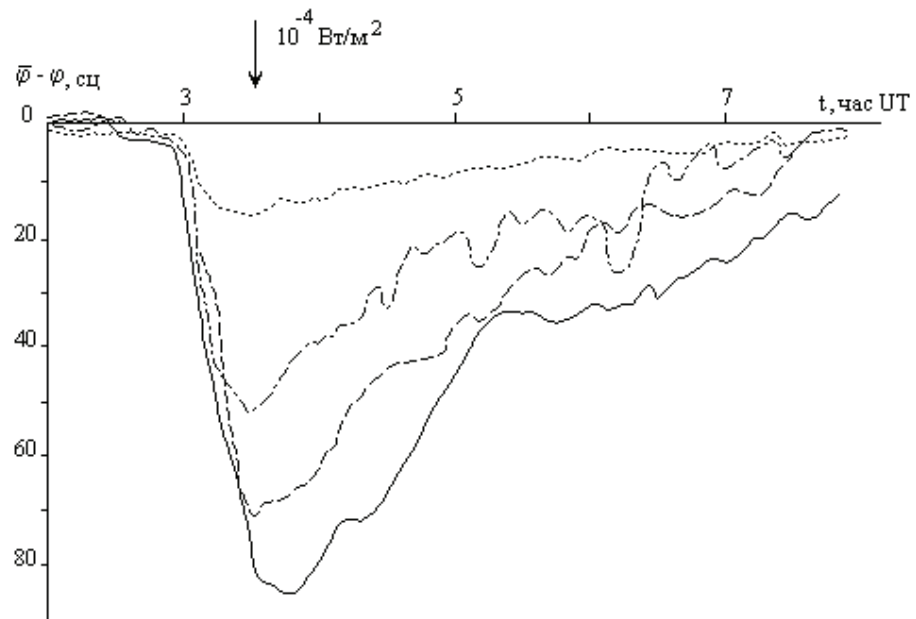


Рис. 2. Аномалии фазы для события 08.05.83 г.

Рентгеновское излучение вспышек целесообразно разделить на два диапазона: низкоэнергичный – мягкое рентгеновское излучение с длинами волн



более 1А и энергиями менее 12 кэВ (этот диапазон представляет основной интерес при изучении ВИБ) и высокоэнергичный – жесткое рентгеновское излучение с $\lambda < 1\text{А}$ и энергиями выше 12 кэВ. Такое изменение спектра во время вспышки позволяет солнечному излучению глубже проникать в ионосферу (поскольку коэффициент поглощения быстро уменьшается с уменьшением длины волны) и вызывать ионизацию на малых высотах.

Ниже рассматриваются эмпирические соотношения между величиной внезапной фазовой аномалии (ВФА), зенитным углом Солнца χ и плотностью потока Γ рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 0,5 - 4А для трасс различной протяженности и ориентации.

На рис. 2 показан пример выделенных аномалий фазы для четырех трасс РНС "Омега" при приеме в г. Хабаровске. В данном случае две трассы (Гавайи–Хабаровск и Ля Реюньон–Хабаровск) охватывают практически всю освещенную полусферу земного шара (от 150° з.д. до 50° в.д.). Начало возмущений на всех трассах характеризуется резким уменьшением фазы (15–30 минут), а период восстановления может продолжаться несколько часов.

Зависимость изменения высоты отражения ионосферы от величины потока рентгеновского излучения Γ и зенитного угла Солнца χ рассчитывалась по формуле [5]:

$$\Delta h = a \cdot \ln(1 + b \cdot \Gamma) \cdot \ln(c + \cos \chi),$$

где $\cos \chi$ – среднее по освещенной части трассы значение. Данные о максимальных потоках Γ взяты из [6]. Для определения параметров a, b, c использовано около 100 событий ВФА. Были получены следующие значения параметров: $a = 1,90$ км, $b = 22,9 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$, $c = 1,08$ [7]. Используя эту формулу с учетом найденных значений параметров a, b, c , было определено пороговое значение плотности потока Γ рентгеновского излучения. Было установлено, что пороговым значением плотности потока рентгеновского излучения является величина $\Gamma_{\text{пор}} = (1 - 2) \cdot 10^{-7} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (для длин волн $0,5 \div 4\text{А}$).

Солнечное затмение. Солнечное затмение представляет уникальную возможность изучения ионосферных процессов в условиях быстрого изменения интенсивности солнечной радиации.

Изменения, происходящие в нижних слоях ионосферы, достаточно четко обнаруживаются при регистрации фазы и амплитуды СДВ-сигналов, распространяющихся на трассах, пересекающих область затмения. В работе [8] наблюдала вариации фазы сигнала на трассе НАА–Харьков ($f = 17,8$ кГц, длина трассы ~ 7000 км). Затмение захватило район, прилегающий к передающему пункту, и совпало с заходом Солнца на трассе. Это позволило оценить длину эффективного затенения трассы во время затмения путем сравнения

фазовых изменений в период затмения с соответствующей фазой на заходном участке суточного изменения фазы ($L_{эфф} \sim 1900$ км). Этот результат подтверждает предположение, что участки трассы с $\Phi < 0,5$ (Φ – линейная фаза затмения, равная относительной величине закрытой части диаметра солнечного диска), слабо влияют на фазу СДВ-сигнала.

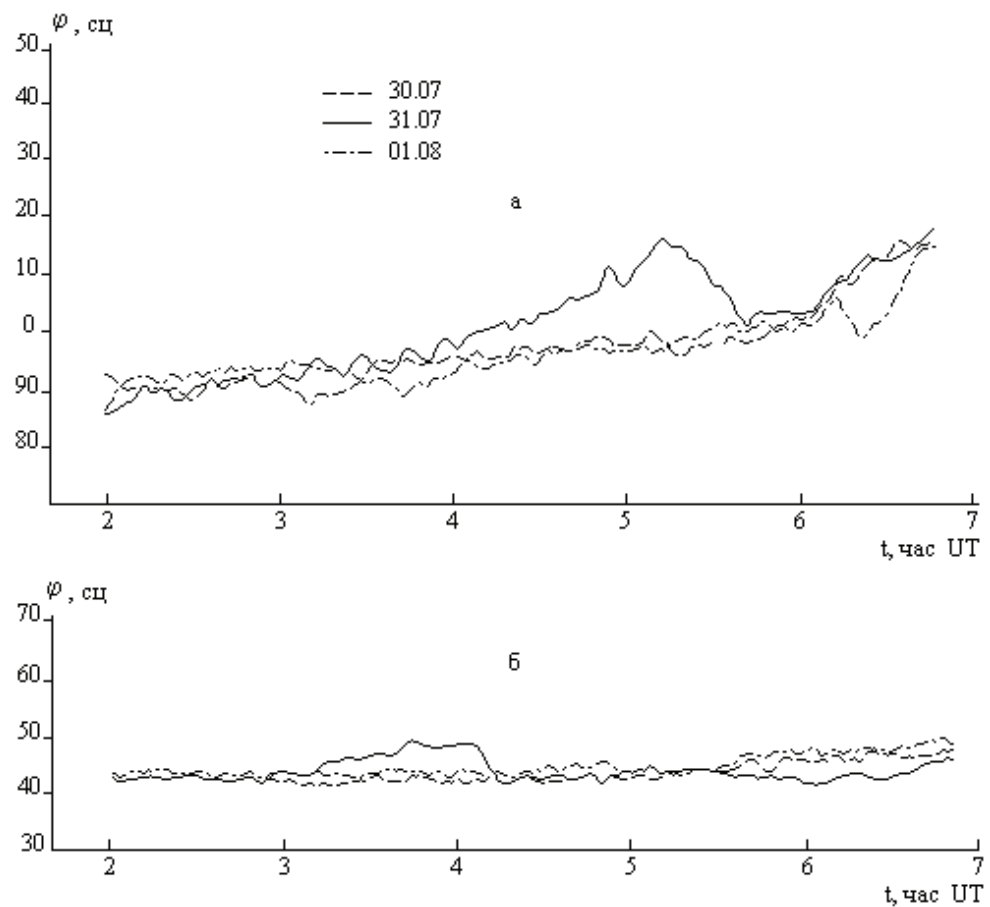


Рис. 3. Изменение фазы сигналов во время солнечного затмения 31.07.81 г.
а – трасса Гавайи–Хабаровск; б – трасса Япония–Хабаровск

В работе [9] по результатам измерений амплитуды и фазы отмечено нарушение во время затмения поведения суточных вариаций сигналов для регистрируемых трасс, где также отмечено, что измерение фазы является наи-



более эффективным методом наблюдений за изменением параметров трасс распространения.

Рассмотрим подробнее обстоятельства полного солнечного затмения, состоявшегося 31 июля 1981 г. Это затмение началось в 2.17 UT в восточной акватории Черного моря и закончилось в 5.13 UT в центральной части Тихого океана. Наибольшая фаза затмения в точке приема (г. Хабаровск) равна 0,90.

Результаты измерений представлены на рис. 3, где сплошная линия – изменение фазы 31 июля, пунктирная линия – изменение фазы, предшествующее полному солнечному затмению, штрихпунктирная – изменение фазы после события 31 июля. Изменения фазы представлены для трасс Гавайи–Хабаровск и Япония–Хабаровск на частоте 10,2 кГц. Видно, что в изменении фазы в день затмения с 3.50 UT до 5.40 UT наблюдаются вариации, отсутствующие до и после этого события [10].

Изменение фазы в день затмения в 5.13 UT соответствует максимальному отклонению, равному 19 сд для трассы Гавайи–Хабаровск, а для трассы Япония–Хабаровск максимальное отклонение фазы приходится на 3.55 UT и составляет ~ 7 сд. При этом изменение фазы, связанное с затмением Солнца для трассы Япония–Хабаровск, началось в 3.13 UT и закончилось в 4.10 UT. Необходимо также отметить, что время наибольшего отклонения фазы соответствует времени наибольшей фазы затмения в точке приема (3.52 UT).

Об эффектах землетрясений в D – слое нижней ионосферы. На борту ИСЗ "Интеркосмос-19" проводились исследования ОНЧ-КНЧ волновых явлений в диапазоне 0,1–16 кГц магнитной и электрической компонент с выхода спектроанализатора при пролетах спутника над эпицентрными областями до и после землетрясений [11, 12]. Отмечается влияние глубины землетрясения и местонахождения землетрясения (под континентом или под океаном) на результаты наблюдения ОНЧ-излучения на борту ИСЗ. При землетрясениях на глубинах меньше 40 км (коровые) всплески ОНЧ-излучения имеют заметную амплитуду, при землетрясениях на больших глубинах всплески по амплитуде меньше. При очаге землетрясения, находящемся под океаном, преемники практически не наблюдаются.

В последние годы был проявлен интерес к возможностям прогнозирования землетрясений с использованием распространения сигналов СДВ-диапазона. При исследованиях сейсмоионосферных взаимодействий наибольший интерес представляет исследование возбуждения D-слоя. Одним из наиболее информативных способов контроля состояния нижней ионосферы

является метод радиопросвечивания волновода Земля–ионосфера сверхдлинными волнами. Существенной особенностью метода является возможность оценки в одной точке приема гелиогеофизической обстановки на большой части земного шара и выделение локальных ионосферных возмущений сейсмического происхождения от глобальных возмущений, связанных с космическими факторами.

Процессы сейсмоионосферного взаимодействия носят локальный характер. Так как возмущения характеристик, принимаемых СДВ-сигналов, связаны с изменением действующей высоты отражения верхней стенки волновода Земля – ионосфера, необходимо оценить параметры участков, на которых должны произойти эти изменения. Они должны быть сравнимы с размерами зоны Френеля:

$$\Phi = \sqrt{D \cdot \lambda},$$

где D – расстояние между участком возмущения и приемником;

λ – длина волны передатчика.

Так как землетрясения происходят на любых расстояниях между точкой передачи и приема, то при $D = 10000$ км и $\lambda = 30$ км, $\Phi = 550$ км, т.е. если эпицентры землетрясений будут находиться на расстоянии < 500 км от трассы, то условия выделения возмущений будут наиболее благоприятными. Однако практически можно ожидать выделение возмущений и при больших расстояниях эпицентров от трассы, но не более $(2 - 3) \cdot \Phi$ ($\sim 1000 - 1500$ км).

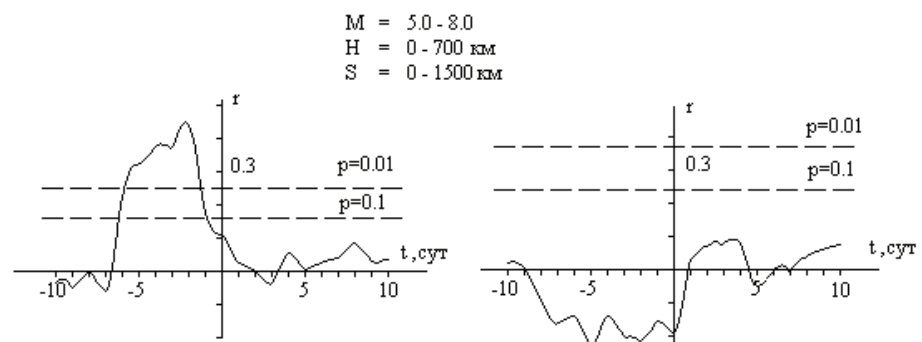


Рис. 4. Функция корреляции для различных магнитуд и расстояния от трассы
 а – трасса Австралия–Хабаровск; б – Гавайи–Хабаровск

Основной анализ принимаемых сигналов ФРНС "Омега" проводился на трех сейсмоактивных трассах: Ля Реюньон–Хабаровск, Австралия–Хабаровск и



Гавайи–Хабаровск. Контрольными трассами являлись: Норвегия–Хабаровск, Сев.Дакота–Хабаровск и Япония–Хабаровск. Контрольной могла быть и одна из выбранных сейсмоактивных трасс, т.е. предполагалось, что возмущения фазы принимаемого сигнала могли быть связаны с сеймотектоническими процессами только в районе этой трассы, если аномальный ход фазы присутствовал только на этой трассе.

Рассмотрим отклонения фазы сигнала от среднедекадного для землетрясений с магнитудой больше 6 для трассы Гавайи–Хабаровск (94% трассы проходит над морской поверхностью). На контролируемой сейсмоактивной трассе одиночные землетрясения с интервалом больше 5–10 суток происходили крайне редко. Для рассматриваемой трассы за приведенный период исследований землетрясения происходили в районе Курило–Японских островов. Необходимо проверить значимость связи возмущений нижней ионосферы с сейсмическими процессами, отличающимися магнитудами, глубиной и расстоянием эпицентров от трассы, а также необходимо выделить существенную длительность возмущения фазы и преимущественный интервал времени проявления возмущений относительно актов землетрясения [13].

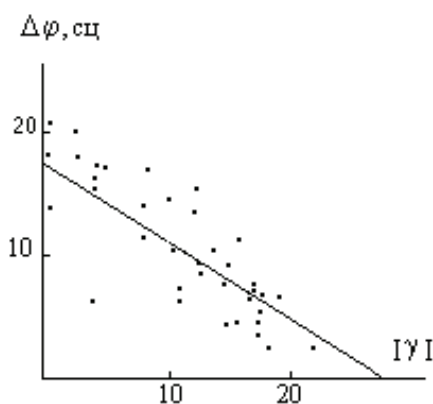


Рис. 5. Зависимость изменения фазы от угла трасса–терминатор

В работе [14] отмечается, что максимальное количество возмущений группируется в пределах от 1 до 3 суток до момента землетрясения, причем имеются существенные отличия характера возмущений в дневных и ночных условиях распространения сигналов.

Слой С. В качестве примера рассмотрим усредненные на декадном интервале времени суточные хода фазы для различных трасс и различных месяцев года. В случае трассы Австралия–Хабаровск направление распространения близко к линии перехода день - ночь (линия терминатора) и это характеризуется наименьшей длительностью переходного периода во время восхода и захода Солнца. При движении терминатора на трассе наблюдаются глубокие интерференционные минимумы поля, которые сопровождаются резкими вариациями фазы, а иногда потерей фазового цикла. Минимумы вызваны интерференцией первой и второй мод при прохождении терминатора вдоль трассы [15]. Потеря фазового цикла может быть вызвана равенством амплитуд мод первого и второго порядка.

При приеме сигналов радиостанции G (Австралия) РНС "Омега" в Хабаровске распространение происходит по трансэкваториальной трассе в направлении с юга на север и часть трассы проходит над морем. Протяженность трассы 9700 км, азимут 353° . Из-за такого азимута (близкого к меридиану) на трассе происходит смена порядка освещенности передающего и приемного пунктов в различное время года. Трасса пересекает экватор и геомагнитный экватор, который оказывает влияние на фазу принимаемого сигнала в переходный период.

Следующей особенностью распространения на данной трассе являются наблюдаемые сезонные изменения амплитуды послевосходного фазового "всплеска" [16]. Фазовый "всплеск" наблюдается при углах трасса - терминатор, близких к нулю, и при зенитном угле Солнца $\chi = 75^{\circ}$. В этот момент трасса полностью освещена. На рис. 5 показана зависимость величины изменения фазы после восхода Солнца от угла γ (частота 13,6 кГц).

С помощью регрессионного анализа рассчитана зависимость изменения фазы от угла γ (на рисунке сплошная линия). Полученное уравнение имеет вид

$$\Delta\varphi = 17,3 - 0,7|\gamma|,$$

среднеквадратическое отклонение этих значений относительно аппроксимирующей линии составляет $\sim 3,5$ сц.

Это явление послевосходного фазового "всплеска" связывают с образованием дополнительного слоя С в ионосфере [17, 18].

С точки зрения автора, наиболее перспективными являются дальнейшие исследования, связанные внезапными ионосферными возмущениями, сейс-



моионосферными взаимодействиями, с образованием слоя С, которые позволили усовершенствовать модель нижней ионосферы.

Библиографические ссылки

1. *Федякина Н. И.* Распространение сверхдлинных радиоволн на трансполярных и субполярных трассах. Новосибирск, 1980.
2. *Белоглазов М. И., Ременец Г. Ф.* Распространение сверхдлинных радиоволн в высоких широтах. Л., 1982.
3. *Зависимость фазы СДВ-поля от авроральной активности в феврале 1982 г.* / Э. Г. Мирмович, Н. С. Овсянников, В. И. Нестеров, Г. Д. Апрышкин. Хабаровск, 1983.
4. *The ionospheric effects in D-layer and solar proton precipitation zones during the 16 february 1984 event.* / Beloglazov M. I., Beloglazova G. P., Vashenyuk E. V., Petrova G. A., Shumilov O. I., Shishaev V. A., Zabavina I. N., Nesterov V. I. // Planet. Space Sci. 1990. V. 38.
5. *Никитин А. А.* Эмпирические соотношения для внезапной фазовой аномалии СДВ. Омск, 1982.
6. *Solar geophysical data, part II.* Boulder, Colo, USA.
7. *Нестеров В. И., Латицкая Г. П.* Эмпирические соотношения при внезапных ионосферных возмущениях по СДВ-сигналам. Харьков, 1990.
8. *Шубова Р. С.* Вариации фазы сигнала станции NAA, $f=17,8$ кГц в период полного солнечного затмения 10 июля 1972 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 1974. № 1.
9. *Каримов Р.Р., Козлов В.И., Муллаяров В.А.* Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006г. // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. № 2.
10. *Нестеров В. И.* Результаты солнечного затмения 31 июля 1981 г. // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. Хабаровск, 2005.
11. *Нестеров В. И.* Влияние подстилающей поверхности при распространении СДВ радиоволн на прогноз землетрясений // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. Хабаровск, 2001.
12. *Нестеров В. И.* Возмущения фазы СДВ-поля и крупные землетрясения вблизи радиотрасс «Омега» // Физика и технические приложения волновых процессов». Казань, 2007.
13. *Наблюдения на спутнике "Интеркосмос-19" ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью* / В. И. Ларкина, А. В.Наливайко, Н. И. Гершензон, М. Б. Гохберг, В. А. Липеровский, С. Л. Шалимов // Геомагнетизм и аэрномия. 1983. № 5.
14. *Гуфельд И. Л., Маренко В. Ф.* Вариации фазы СДВ сигналов на сейсмоактивных трассах за период с 1983 по 1986 гг. // Тезисы докл. Межведомственного семинара по распространению радиоволн. Красноярск, 1986.



15. *Crombie D. D.* Radio Sci., 1964. V. 68D. 27.

16. *Нестеров В. И., Щавелев А. И.* Измерения на меридиональных ОНЧ трассах как индикатор восходного слоя в нижней ионосфере // VIII Межведомственный семинар по распространению километровых и более длинных радиоволн. Омск, 1982.

17. *Нестеров В. И., Апрышкин Г. Д.* Результаты двухлетних наблюдений распространения СДВ-сигналов на трансэкваториальной трассе // Распространение радиоволн километрового диапазона. Апатиты, 1987.

18. *Нестеров В. И.* Возможность регистрации С-слоя ионосферы. Тезисы докл. VII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Самара, 2008.