

УДК 550.510.535

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В НОЧНОЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ *D*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НАД ЗОНОЙ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В. П. Ким, С. А. Пулинец, В. В. Хегай

Представлена теоретическая модель возможных изменений электронной концентрации в ночной среднеширотной *D*-области ионосферы, которые могут предшествовать сильным землетрясениям. Установлено, что перед сильным землетрясением концентрация электронов в ночной *D*-области над эпицентральной зоной землетрясения может существенно возрастать. Характерный горизонтальный размер возмущённой области составляет порядка 300 км. В том случае, когда вблизи эпицентральной зоны готовящегося землетрясения функционирует мощная ОНЧ радиостанция, на высотах ночной верхней мезосферы может сформироваться плотный ионизованный слой типа дневного *D*-слоя, что вызовет сильное поглощение высокочастотных радиоволн на трассах, проходящих над зоной подготовки землетрясения.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] по данным измерений характеристик распространения ОНЧ радиоволн фазовой навигационной системы «Омега» на трассах, проходящих через сейсмоактивные зоны, выявлены возмущения фазы радиосигналов, которые имели бухтообразную форму и не были связаны с эффектами солнечно-магнитосферной активности. На основе статистического анализа показано, что эти возмущения фазы начинали проявляться в ночное время за $10 \div 20$ суток до землетрясений (всего было проанализировано 1300 землетрясений с магнитудами $M = 4,0 \div 7,0$). Доверительная вероятность связи выявленных возмущений фазы сигналов и землетрясений составила около 90 %. Особенно ярко возмущения фазы радиосигналов системы «Омега» проявлялись перед очень сильными землетрясениями: в Спитаке (Армения, $M = 7,1$, 1988 г.) [2], Рудбаре (Иран, $M = 7,5$, 1990 г.) [3] и Кобе (Япония, $M = 7,1$, 1995 г.) [4]. Такие возмущения фазы сигналов могли быть обусловлены заметным повышением электронной концентрации на высотах ночной *D*-области ионосферы, локализованным над очагами готовящихся землетрясений.

В связи с этим возникает вопрос о том, каким образом процессы, протекающие в очаге будущего землетрясения на заключительной стадии его подготовки, могут оказывать воздействие на электронную концентрацию в ночной *D*-области ионосферы. Авторы [4] предположили, что такое воздействие, возможно, объясняется генерацией долгопериодных гравитационных волн типа планетарных волн Россби в результате резонансного взаимодействия сейсмических процессов с нейтральной атмосферой. Однако это объяснение представляется малореалистичным, поскольку какие-либо значительные изменения в приповерхностном слое атмосферы над эпицентральной зоной готовящихся землетрясений до сих пор не наблюдались. А для возбуждения планетарных волн Россби, в том числе и с помощью всевозможных резонансных механизмов, необходимо обеспечить поступление в атмосферу значительной энергии и импульса. Кроме того, поскольку волны Россби имеют планетарный масштаб, возмущения фазы сигналов системы «Омега» наблюдались бы также на трассах, проходящих в тысячах километров от эпицентра землетрясения.

Эволюция концентрации заряженных компонент в *D*-области ионосферы достаточно жёстко определяется условиями ионизационно-рекомбинационного равновесия, поэтому наблюдаемые возмущения электронной концентрации N_e трудно объяснить простым перераспределением плазмы за счёт

дрейфа заряженных частиц, индуцированного электрическим полем, если, конечно, не принимать во внимание случаи экстремально высокой напряжённости электрического поля. В связи с этим в [5] для объяснения сейсмической природы возмущений электронной концентрации в D -области предложен гибридный механизм, согласно которому указанные возмущения концентрации N_e обусловлены вертикальным переносом в D -область заряженных частиц из вышележащего спорадического слоя E_s и изменением концентрации окиси азота за счёт совместного действия электрических полей и инфразвуковых волн, генерируемых в очаге назревающего землетрясения и проникающих на ионосферные высоты. При этом никакие количественные расчёты изменения N_e , подкрепляющие данную гипотезу, в [5] не были проведены.

В настоящей работе представлена теоретическая модель, которая объясняет и позволяет рассчитать возможные возмущения электронной концентрации в ночной D -области ионосферы перед сильными землетрясениями над их эпицентральной зоной. Данная модель является органическим продолжением теоретических исследований возможных ионосферных предвестников сильных землетрясений, проводимых авторами в рамках единого подхода на протяжении ряда лет. В основе подхода лежит предположение, что первичным источником ионосферных возмущений, предшествующих сильным землетрясениям, является возмущение вертикального электрического поля на поверхности Земли, инициируемое физико-химическими процессами в очаге землетрясения. Такие возмущения вертикального электрического поля действительно неоднократно наблюдались перед землетрясениями в их эпицентральных зонах [6–8]. В [9] проведён количественный расчёт проникновения электростатического поля сейсмогенного происхождения в ионосферу и показано, что при определённых условиях напряжённость этого поля в ионосфере может достигать существенной величины. Используя результаты работы [9], мы последовательно построили количественные модели предвестников сильных землетрясений на высотах E - и F -областей [10, 11], а также в верхней ионосфере [12] с учётом современного уровня теоретического моделирования ионосферы. Заметим, что непосредственным фактором, определявшим ионосферные возмущения в этих моделях, являлся дрейф заряженных частиц ионосферной плазмы, обусловленный электрическим полем сейсмического источника. Однако, как уже отмечалось, в D -области ионосферы электрический дрейф заряженных частиц не оказывает заметного воздействия на распределение их концентрации, поэтому здесь физический механизм, определяющий возмущение электронной концентрации перед землетрясением, имеет иную природу и будет детально рассмотрен ниже.

1. ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ

Как показано в [12], перед сильными землетрясениями под воздействием электрического поля сейсмического источника в плазмосфере в окрестности геомагнитной силовой линии, проходящей через эпицентр готовящегося землетрясения, образуется плазменная неоднородность, вытянутая вдоль геомагнитного поля из одного полушария в другое. Характерный размер неоднородности поперёк геомагнитного поля на высотах порядка 2 000 км составляет около 300 км. Такая плазменная неоднородность представляет собой дакт для низкочастотных электромагнитных волн как естественного, так и искусственного происхождения. Следует заметить, что аналогичные плазменные неоднородности, вытянутые вдоль геомагнитных силовых линий, могут образовываться и под воздействием электрических полей больших грозных облаков [13]. Когерентные ОНЧ радиоволны, излучаемые мощными наземными радиостанциями, включая и радиопередатчики навигационной системы «Омега», будут эффективно канализоваться в дакт и распространяться вдоль него внутри плазмосферы, проникая в область захваченных высокоэнергичных заряженных частиц радиационного пояса Земли. При распространении ОНЧ волны через популяцию высокоэнергичных электронов радиационного пояса между волной и энергичными электронами может происходить циклотронно-резонансное взаимодействие, кото-

рое вызывает питч-угловое рассеяние захваченных частиц, в результате чего часть энергичных электронов будет попадать в конус потерь и высыпаться в нижнюю атмосферу. Проблеме циклотронно-резонансного взаимодействия ОНЧ волн с энергичными заряженными частицами посвящена обширная литература (см., например, обзоры [14, 15]).

Естественное некогерентное широкополосное ОНЧ излучение, захваченное в дакт, будет вызывать хаотическое изменение питч-угла энергичных электронов. Такое питч-угловое рассеяние математически можно описывать как диффузию в пространстве питч-углов [15]. При этом в дакте может происходить эффективное усиление естественных ОНЧ волн, что, в свою очередь, будет приводить к более интенсивному питч-угловому рассеянию энергичных электронов и усилению их высыпания [16–18]. Когерентные ОНЧ радиоволны оказывают гораздо более эффективное воздействие на питч-угловое распределение энергичных заряженных частиц и их высыпание из радиационного пояса, поскольку изменение питч-угла при этом не являются случайными, а имеет регулярный характер на протяжении баунс-периода. Расчёты питч-углового рассеяния энергичных электронов при их взаимодействии с когерентными ОНЧ радиоволнами проведены для разных случаев в работах [19–21].

Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса на средних и низких широтах многократно наблюдались различными методами [22–26]. В аспекте нашего исследования особо выделим работу [24], где приведены результаты наблюдений локализованного высыпания энергичных электронов, инициируемого излучением наземной ОНЧ радиостанции.

Таким образом, образование за счёт сейсмического электрического поля плазменного дакта приведёт к высыпанию энергичных электронов из радиационного пояса, в результате ударной ионизации которыми в ночной среднеширотной D -области ионосферы и будет возрастать электронная концентрация. Для большей наглядности общая схема физического механизма увеличения электронной концентрации в ночной среднеширотной D -области ионосферы перед сильными землетрясениями представлена на рис. 1.

Теперь обратимся к расчётам скорости ионообразования за счёт ударной ионизации нейтральных компонент D -области потоком высыпающихся энергичных электронов.

2. РАСЧЁТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ

Скорость ударной ионизации нейтральных составляющих атмосферы высыпающимися энергичными электронами рассчитывалась в ряде работ [27–29]. Мы воспользуемся методикой расчёта скорости ионизации, развитой в [28], согласно которой скорость q образования ионных пар в единице объёма, нормированная на моноэнергичный поток F электронов с энергией E_0 определяется по формуле

$$q/F = q_e(E_0) = \frac{E_0}{r_0 \Delta E_{\text{ион}}} \lambda(z/R) \frac{n(M)_z}{n(M)_R}, \quad (1)$$

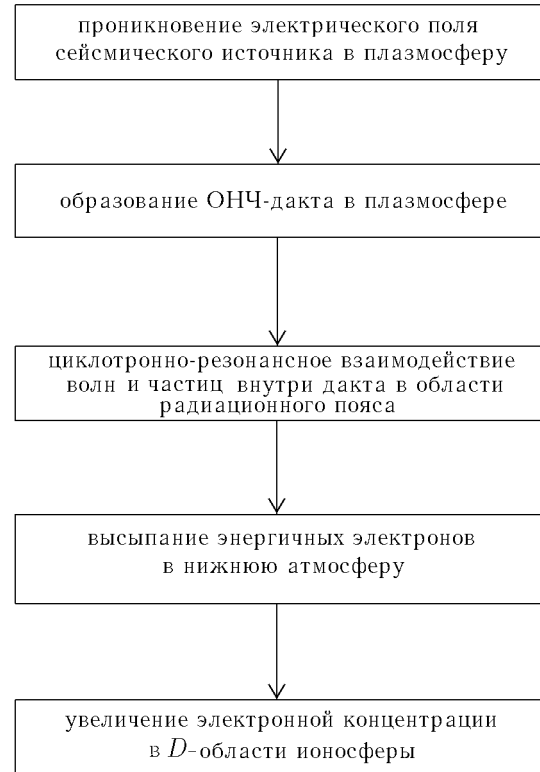


Рис. 1

где $\Delta E_{\text{ion}} = 0,035$ кэВ — энергия ионизации на одну ионную пару, $r_0 = R/\rho$, ρ — плотность воздуха на максимальной глубине проникновения R электронов с заданной энергией, $\lambda(z/R)$ — безразмерная функция распределения потерь энергии, $z = \int_h^{h_{\text{top}}} \rho dh'$, h — высота атмосферы, на которой производится расчёт скорости ионообразования, $h_{\text{top}} = 1000$ км — принятая нами высота верхней границы атмосферы, $n(M)_z$ и $n(M)_R$ — концентрации ионизуемых атомов и молекул на глубинах z и R соответственно. При этом в диапазоне энергий $0,4 \text{ кэВ} \leq E_0 \leq 500 \text{ кэВ}$ связь между максимальной глубиной проникновения в атмосферу и начальной энергией электрона на её верхней границе задаётся соотношением $R[\text{г} \cdot \text{см}^{-2}] = 4,57 \cdot 10^{-6} (E_0[\text{кэВ}])^{1,75}$.

В случае изотропного по верхней полусфере выпадающего потока электронов с произвольным дифференциальным энергетическим спектром электронов $g(E_0)$, заданным в диапазоне энергий от E_0^{min} до E_0^{max} , скорость ионизации Q в единице объёма с учётом (1) может быть представлена в виде

$$Q = \pi \int_{E_0^{\text{min}}}^{E_0^{\text{max}}} g(E_0) q_e(E_0) dE_0. \quad (2)$$

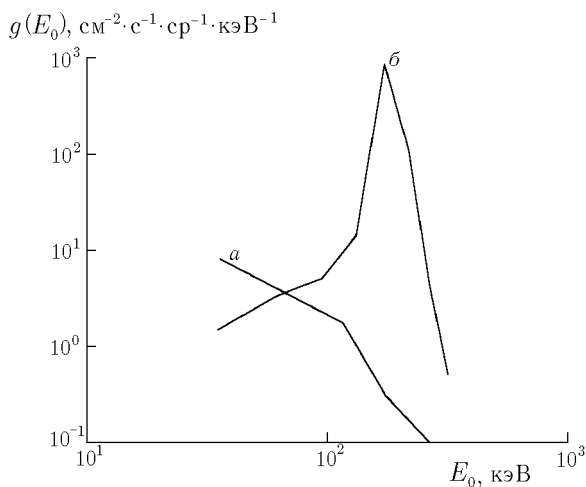


Рис. 2

Согласно [23, 25] в северном полушарии на средних и низких широтах существуют две глобальные зоны, в которых ночные выпадения энергичных электронов наблюдаются регулярно. Одна из них расположена на L -оболочке с индексом приблизительно 2,6, другая — на оболочке с $L \approx 1,4$. В южном полушарии помимо указанных зон существует ещё область южно-атлантической аномалии, где выпадение электронов отличается особой интенсивностью. В [24] наблюдалось сильное узко локализованное выпадение электронов над функционирующей ОНЧ радиостанцией большой мощности в окрестности оболочки с $L = 1,67$ в северном полушарии.

Для наших расчётов мы выберем спектры выпадающих энергичных электронов аналогичные тем, которые наблюдались в глобальной среднеширотной зоне ночных выпадений на спутнике «S3-2» вблизи оболочки с индексом $L = 2,6$ [25] и в области узко локализованного выпадения над мощной ОНЧ радиостанцией в окрестности оболочки с $L = 1,67$ на спутнике «OVI-14» [24]. Аппроксимации выбранных дифференциальных энергетических спектров выпадающих электронов показаны на рис. 2, где приведены спектр частиц, соответствующий глобальному фоновому выпадению на средних широтах (a), и спектр электронов, выпадающих над ОНЧ радиостанцией (b). Результаты расчётов скорости ионизации Q для модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90 представлены в разделе 4.

3. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

D -область земной ионосферы наименее изучена вследствие как большого разнообразия протекающих в ней сложных химических процессов, так и её относительной недоступности для регулярных наблюдений, особенно в ночных условиях, когда типичная концентрация заряженных частиц падает ниже 10^3 см^{-3} . Различные аспекты изучения D -области обсуждаются в детальном обзоре [30]. Современные теоретические модели D -области включают в себя множество различных химических реакций и

основаны на решении системы взаимосвязанных уравнений химической кинетики (см., например, [31, 32]). Рассмотрение тех или иных конкретных вопросов моделирования D -области ионосферы выходит далеко за рамки настоящей работы, и здесь мы не будем их затрагивать. Нашей задачей является количественно показать принципиальную возможность образования локализованных возмущений электронной концентрации на высотах ночной D -области ионосферы перед сильными землетрясениями, а не детальный расчёт распределения N_e в какой-то конкретной ситуации. Для этого мы воспользуемся стационарным уравнением непрерывности для концентрации электронов N_e , которое можно записать в виде [33, 34]

$$\alpha N_e^2 + \ell N_e - q = 0, \quad (3)$$

где $\alpha = 6 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ — коэффициент квадратичной рекомбинации, $\ell = k_1 N(\text{O}_2) + k_2 N(\text{O}_2) \times N(\text{N}_2)$ — коэффициент линейной рекомбинации, $N(\text{O}_2)$ и $N(\text{N}_2)$ — концентрации молекул O_2 и N_2 соответственно, $k_1 = 1,4 \cdot 10^{-29} [300/T_n[K]] \exp[-600/T_n[K]] \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$, $k_2 = 10^{-31} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$, T_n — температура нейтральной атмосферы, $q = Q + q_1$ — суммарная скорость ионообразования за счёт ударной ионизации высыпающимися энергичными электронами (Q) и рассеянного солнечного излучения в линии водорода L_α с длиной волны 1216 \AA (q_1). Скорость ионизации q_1 выбрана согласно [35]. В качестве модели нейтральной атмосферы (как и ранее, при расчётах Q) использована модель MSIS-E-90.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

На рис. 3 показано рассчитанное высотное распределение скорости ионообразования за счёт ударной ионизации высыпающимися энергичными электронами на высотах верхней мезосферы для двух случаев. Кривая 1 соответствует ситуации, которая может реализоваться на заключительной стадии подготовки крупного землетрясения, очаг которого расположен вдали от действующих искусственных источников ОНЧ радиоизлучения. Кривая 2 даёт возможную скорость ионизации над эпицентральной зоной будущего землетрясения, если вблизи неё функционирует мощная ОНЧ радиостанция. Из рис. 3 следует, что во втором случае скорость ионизации в D -области гораздо выше, чем в первом, причём эта разница существенно увеличивается с уменьшением высоты.

Высотные распределения скорости ионообразования 1 и 2 (рис. 3) были использованы для расчёта возмущения электронной концентрации в ночной D -области ионосферы перед сильным землетрясением. Соответствующие высотные профили N_e (кривые 1 и 2) показаны на рис. 4, где для сравнения приведён также фоновый высотный профиль электронной концентрации для случая, когда высыпаний энергичных электронов нет и ионизация обеспечивается только рассеянным излучением в линии водорода L_α (кривая 3). Видно, что перед сильным землетрясением электронная концентрация в ночной D -области ионосферы может существенно возрасти. Особенно значительно эффект увеличения N_e проявляется, если вблизи эпицентральной зоны готовящегося землетрясения функционирует мощная ОНЧ радиостанция. В этом случае в ночной верхней мезосфере формируется достаточно выраженный плотный ионизированный слой с максимальным значением электронной концентрации порядка $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, расположенный на высоте приблизительно 85 км, т. е. параметры образованного слоя близки к параметрам распределения N_e в дневной D -области для средних и низких широт. Возмущённая электронная концентрация превышает фоновые значения N_e в интервале высот $85 \div 90$ км больше чем на порядок величины, а на высотах 75 и 85 км это превышение составляет соответственно 2 и 3 порядка. При этом важно отметить, что при $h > 73$ км электронная концентрация превышает 10^3 см^{-3} . В регионах, удалённых от действующих ОНЧ радиостанций, предвестники землетрясений в ночной D -области ионосферы выражены не столь ярко, однако и здесь изменения N_e достаточно существенны. На высотах $80 \div 85$ км электронная концентрация возрастает по сравнению с фоновыми значениями

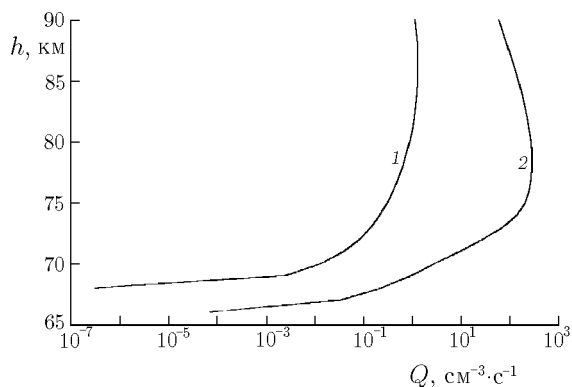


Рис. 3

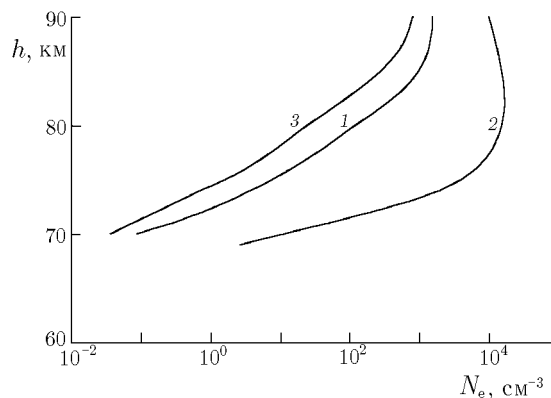


Рис. 4

приблизительно в восемь раз, а ниже 80 км относительное увеличение N_e превышает порядок величины. Хотя электронная концентрация достигает своего максимума на верхней границе D -области, на высоте около 87 км, где $N_e \sim 2,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, тем не менее вплоть до $h \approx 82 \text{ км}$ N_e превышает 10^3 см^{-3} .

Таким образом, перед сильными землетрясениями над их эпицентрными зонами в ночной среднеширотной D -области ионосферы может иметь место эффект значительного увеличения электронной концентрации, который будет проявляться особенно заметно в тех районах, где расположены действующие мощные источники ОНЧ радиоизлучения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена теоретическая модель, описывающая изменения электронной концентрации в ночной среднеширотной D -области ионосферы, которые могут быть предвестниками сильных землетрясений. Установлено, что перед сильным землетрясением электронная концентрация в ночной D -области ионосферы над его эпицентральной зоной может существенно возрасти. Согласно модели непосредственной причиной возмущения электронной концентрации является ударная ионизация выпадающими из радиационного пояса Земли энергичными электронами. Высыпание происходит вследствие их циклотронно-резонансного взаимодействия с когерентными и некогерентными электромагнитными ОНЧ волнами, захваченными в вытянутый вдоль геомагнитного поля (из одного полушария в другое) плазмосферный ОНЧ-дакт, который образуется в окрестности геомагнитной силовой линии, проходящей через эпицентр назревающего землетрясения, под воздействием сейсмогенного электрического поля.

Характерный горизонтальный размер возмущённой области составляет около 300 км. Степень увеличения электронной концентрации по сравнению с фоновыми значениями резко нарастает с уменьшением высоты и может достигать на высотах 75 ÷ 85 км 2–3 порядков величины. В том случае, когда вблизи эпицентральной зоны готовящегося землетрясения функционирует мощная ОНЧ радиостанция, на высотах ночной верхней мезосферы может образоваться плотный слой ионизации типа дневного D -слоя с электронной концентрацией в максимуме порядка $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. Вследствие образования такого слоя ВЧ радиоволны при распространении над зоной подготовки землетрясения будут испытывать сильное поглощение.

В регионах, удалённых от действующих ОНЧ радиостанций, эффект увеличения электронной концентрации в D -области над очагом готовящегося землетрясения выражен в меньшей степени, однако его абсолютная величина довольно значительна.

Естественно возникающий вопрос об однозначной идентификации сейсмогенных возмущений электронной концентрации в ночной D -области ионосферы среди возмущений, вызванных другими причинами, представляет собой сложную, но вполне разрешимую задачу, которая требует отдельного рассмотрения. Здесь только заметим, что для практического решения данного вопроса необходимо учитывать метеорологическую обстановку, уровень геомагнитной и солнечной активности, а также знать, насколько часто в региональной ночной D -области наблюдаются сильные локализованные увеличения электронной концентрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуфельд И. Л., Маренко В. Ф. // Доклады РАН. 1992. Т. 323, № 6. С. 1 064.
2. Воинов В. В., Гуфельд И. Л., Кругликов В. В. и др. // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 3. С. 96.
3. Гуфельд И. Л., Рожной А. А., Тюменцев С. Н. и др. // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 3. С. 102.
4. Molchanov O. A., Hayakawa M. // J. Geophys. Res. A. 1998. V. 103, No. 8. P. 17 489.
5. Гусев Г. А., Гуфельд И. Л., Похотелов О. А. // Доклады РАН. 1992. Т. 327, № 1. С. 65.
6. Бончковский В. Ф. // Труды Геофиз. инст. АН СССР. 1954. № 25(152). С. 192.
7. Kondo G. // Mem. Kakioka magnetic observatory. 1968. V. 13, No. 1. P. 11.
8. Нао J. // Acta seismol. Sin. 1988. V. 10, No. 2. P. 207.
9. Ким В. П., Хегай В. В., Иллич-Свитыч П. В. // Физика Земли. 1994. № 3. С. 37.
10. Ким В. П., Хегай В. В., Иллич-Свитыч П. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33, № 5. С. 114.
11. Kim V. P., Hegai V. V. // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. by M. Hayakawa. Tokyo: Terrapub, 1999. P. 619.
12. Kim V. P., Hegai V. V. // J. Earthquake Prediction Res. 1997. No. 6. P. 275.
13. Park C. G., Helliwell R. A. // Radio Sci. 1971. V. 6, No. 2. P. 299.
14. Dungey J. W. // Space Sci. Rev. 1964. V. 4, No. 1. P. 199.
15. Roberts C. S. // Rev. Geophys. Space Phys. 1969. V. 7, No. 1. P. 305.
16. Brice N. // J. Geophys. Res. 1964. V. 69, No. 21. P. 4 515.
17. Ashour-Abdalla M. // Planet. Space Sci. 1972. V. 20, No. 5. P. 639.
18. Nunn D. // Planet. Space Sci. 1971. V. 19, No. 9. P. 1 141.
19. Dysthe K. B. // J. Geophys. Res. 1971. V. 76, No. 28. P. 6 915.
20. Gendrin R. // Astrophys. Space Sci. 1974. V. 28, No. 1. P. 245.
21. Inan U. S., Bell T. F., Helliwell R. A. // J. Geophys. Res. A. 1978. V. 83, No. 7. P. 3 235.
22. Тулинов В. Ф. // Космич. исслед. 1967. Т. 5, № 2. С. 241.
23. Paulikas G. A. // Rev. Geophys. Space. Phys. 1975. V. 13, No. 5. P. 709.
24. Vampola A. L., Kuck G. A. // J. Geophys. Res. A. 1978. V. 83, No. 6. P. 2 543.
25. Vampola A. L., Gorney D. J. // J. Geophys. Res. A. 1983. V. 88, No. 8. P. 6 267.
26. Voss H. D., Smith L. G. // J. Atmos. Terr. Phys. 1980. V. 42, No. 3. P. 227.
27. Тулинов В. Ф., Яковлев С. Г. // Космич. исслед. 1969. Т. 7, № 1. С. 122.
28. Rees M. H. // Planet. Space Sci. 1963. V. 11, No. 10. P. 1 209.
29. Luhmann L. G. // J. Atmos. Terr. Phys. 1976. V. 38, No. 6. P. 605.
30. Данилов А. Д. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 10. С. 1 171.
31. Козлов С. И., Власков В. А., Смирнова Н. В. // Космич. исслед. 1988. Т. 26, № 5. С. 738.
32. Turunen E., Matveinen H., Tolvanen J., Ranta H. // Solar-Terrestrial energy program: Handbook of ionospheric models / Ed. by R. W. Schunk. 1996. P. 1.
33. Swider W., Narcisi R. S., Keneshea J., Ulwick J. C. // J. Geophys. Res. A. 1971. V. 76, No. 19. P. 4 691.

34. Swider W. // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 127, No. 2–3. P. 403.
35. Ogawa T., Tohmatsu T. // Rep. Ionosph. Space Res. 1966. V. 20, No. 4. P. 395.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн РАН,
г. Троицк, Россия

Поступила в редакцию
9 июня 2001 г.

**THEORETICAL MODEL OF POSSIBLE PERTURBATIONS IN THE NIGHTTIME MID-LATITUDE IONOSPHERIC
D REGION OVER AN AREA OF MAJOR-EARTHQUAKE PREPARATION**

V. P. Kim, S. A. Pulinets, and V. V. Hegai

We present a theoretical model of possible electron-density perturbations in the nighttime mid-latitude ionospheric *D* region, preceding major earthquakes. It is found that The electron density in the nighttime *D* region over an earthquake epicentral zone can considerably increase before severe earthquakes. The horizontal size of the area of perturbed electron density is about 300 km. The perturbation effect is expected to be more pronounced if a powerful VLF transmitter operates in the vicinity of an imminent earthquake epicentral zone. In this case, a very dense ionization layer of daytime *D*-layer type can be formed at altitudes of the upper nighttime mesosphere and give rise to the effect of strong absorption of HF radio waves propagating over the earthquake preparation area.