

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА–АТМОСФЕРА–ИОНОСФЕРА

В.А. Липеровский

PHYSICAL MODELS OF LITOSPHERE–ATMOSPHERE–IONOSPHERE COUPLING

V.A. Liperovsky

Введение

Последствия землетрясений делают актуальным проведение исследований физических процессов, сопровождающих подготовку землетрясений на различных фазах, и разработку на их основе методов и средств прогноза. В настоящее время получены экспериментальные и теоретические результаты, значительно продвинувшие решение такой задачи. К наиболее существенным из них относятся явления в ионосфере и магнитосфере Земли, сопровождающие землетрясения и предшествующие им, которые обнаружены благодаря космическим исследованиям в течение последних двух десятилетий [1, 2, 3, 12]. Это возмущения атмосферного электрического поля, формирование и распад облачных структур, а также радиоаврора над геологическими разломами, метеорологические эффекты в ионосфере.

Наиболее интересные явления в ионосфере в связи с землетрясениями – это «аномальные» всплески электромагнитного излучения в диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц, зарегистрированные на спутниках [4, 5, 6, 7], «аномальные» квазипостоянные электрические поля в ионосфере [8], «аномальные» геомагнитные пульсации [9, 10], «аномальные» возмущения в ионосфере [11].

Проведем анализ существующих экспериментальных результатов и физических моделей литосферно-ионосферной связи на заключительной стадии подготовки землетрясений. Уже из первых наблюдений следовало, что ионосферные возмущения над областью подготовки сильных землетрясений за несколько дней перед ними проявляются как неоднородности со специфической динамикой развития. Отмеченная связь обусловлена дискретной структурой земной коры, она существует и вне заметной сейсмической активности, но становится более существенной перед землетрясениями и сразу после них.

Наблюдения возмущений ряда параметров ионосферы на спутниках перед землетрясениями оказалось принципиально важным для понимания возможной перспективы прогноза землетрясений с использованием спутников и дало толчок развитию исследований сейсмоионосферных предвестников. Приведем несколько примеров.

В работах [4, 5] было обнаружено увеличение интенсивности ОНЧ-шумов и возмущений электронной плотности перед землетрясениями. При анализе высотных распределений электронной концентрации верхней части слоя F_2 , исследовавшихся на спутнике «Интеркосмос-19» [3], было выяснено, что высота максимума

слоя F_2 возросла примерно с 280 до 360 км, а максимальное значение концентрации электронов уменьшилось с 3×10^5 до 10^5 см^{-3} за день до землетрясения.

При регистрации на спутнике ИК-Б1300 вариаций компонент магнитного поля в диапазоне частот 0.1–8 Гц и вертикальной компоненты квазипостоянного электрического поля перед землетрясением 02.01.1982 г. с магнитудой $M = 4.8$ были обнаружены всплески вертикального квазистатического электрического поля $3 \div 7 \text{ мВ/м}$ в двух близких зонах за 15 мин до землетрясения за 2000 км от эпицентра и за 12 мин непосредственно над эпицентром землетрясения. Ширина зон составляла примерно $1 \div 1.5^\circ$ по широте, при этом амплитуда наблюдавшихся магнитных пульсаций на частоте около 1 Гц составила 3 нТл [12].

При регистрации вариаций плотности плазмы и КНЧ/ОНЧ-измерений на борту спутника «Космос-1809» в районе Спитака [12] были обнаружены интенсивные магнитные возмущения в зоне $\pm 6^\circ$ по долготе и $\pm 4^\circ$ по широте относительно эпицентра готовящегося землетрясения. Амплитуда возмущений при этом составляла до 10 нТл на частоте 140 Гц и до 3 нТл на частоте 450 Гц. В этой же зоне отмечены мелкомасштабные ($4 \div 10 \text{ км}$ вдоль орбиты) неоднородности плотности плазмы $\Delta N/N_0 \approx 3 \div 8 \%$, которые возбуждались в тех же областях, что и аномальные КНЧ-возмущения магнитного поля.

Специфические аномальные ионограммы, предшествующие землетрясениям, практически не встречаются. Их долго искали, но не нашли. Поэтому при исследовании ионосферных эффектов в периоды подготовки землетрясений было необходимо пойти по пути выделения на статистическом материале наиболее общих закономерностей временного хода некоторых ионосферных параметров. Предполагалось, что модификации в ионосфере, вызванные процессами подготовки землетрясений, достаточно слабые, и, чтобы не учитывать прямое солнечное влияние, как правило, исследовалась только ночная ионосфера.

При исследовании сейсмоионосферных эффектов, естественно, возникали вопросы об их характерных временах в диапазоне от нескольких минут до нескольких часов и характерных масштабах в диапазоне от нескольких сотен до тысячи километров. До сих пор эти вопросы полностью не решены.

Большая часть статистически достоверных или почти достоверных сейсмоионосферных эффектов выявлена с помощью ионосферного зондирования.

На высотах E-области ионосферы в ночных условиях регулярная плотность ионизации составляет

$10^2\text{--}10^3\text{ см}^{-3}$, что ниже предела работы ионозонда, поэтому обычно исследовались спорадические слои E, плотность которых на 2–3 порядка выше. Образование спорадических слоев обычно связывают с явлением ветрового сдвига. Если в E-области направление горизонтального ветра меняется на обратное с вертикальным градиентом скоростей порядка $0.05\text{--}0.06\text{ с}^{-1}$, то заряженные частицы «сгоняются» в направлении к точке, в которой скорость ветра равна нулю (точнее, равна нулю дивергенция скорости ветра), и в результате образуется E_s-слой. Расплывание слоев происходит в основном благодаря амбиполярной и турбулентной диффузии.

По порядку величины максимальная концентрация в E_s-слоях достигает $10^5\text{--}10^6\text{ см}^{-3}$, при этом их горизонтальный размер варьируется от десяти до ста километров. Вертикальная толщина слоев может изменяться от нескольких сотен метров до нескольких километров. Спорадические слои часто имеют неоднородную структуру по горизонтали – пятна и острова ионизации, а также по вертикали – E_s-рассеяние.

При исследовании динамики спорадических слоев с использованием ионозондовых измерений можно отслеживать изменение максимальной плотности ионизации слоя и характеристики неоднородности, или турбулизации слоя. Крупномасштабная турбулизация (сотни м) проявляется в E-рассеянии – в диффузности следов на ионограммах, мелкомасштабная (десятки метров) характеризуется так называемым коэффициентом полупрозрачности слоя.

При исследовании ионосферных эффектов было выявлено, что за день перед землетрясениями максимальная плотность спорадических слоев уменьшается, а за два дня перед землетрясениями изменчивость плотности с характерным временем 15 мин чаще всего увеличивается, крупномасштабная турбулентность (E-рассеяние) усиливается, а мелкомасштабная уменьшается. Эти эффекты наблюдаются для землетрясений с магнитудой $M > 5$. Пространственные масштабы перечисленных эффектов – до 300–500 км [13, 14].

В E-области были обнаружены также эффекты с пространственными масштабами 500–1000 км. Коэффициент корреляции плотностей спорадических слоев над станциями, расположенными на расстояниях в несколько сотен километров друг от друга, уменьшается за 1–2 дня перед землетрясениями, если эпицентры находятся на расстояниях до 1000 км от станций [15].

Экспериментальные результаты можно интерпретировать, если принять, что в ионосфере конкурируют несколько процессов. Наблюдения показывают, что перед землетрясениями в ионосфере распространяются акустические и акустико-гравитационные волны с периодами от долей минуты до часов, возникают электрические поля и токи и происходит нагрев. Наиболее важные экспериментальные результаты перечислены в табл. 1.

Остановимся теперь на физических механизмах связи в системе литосфера–атмосфера–ионосфера при сейсмической активности, заметив, что до сегодняш-

него дня не существует общепринятой физической модели возмущений в ионосфере перед землетрясениями, хотя нет недостатка в гипотезах.

«Электромагнитные атмосферно-ионосферные» гипотезы

Сначала кратко остановимся на «резонансной» [16] модели электромагнитной связи в системе литосфера–ионосфера, обсуждавшейся лет 10–15 тому назад. В этой модели предполагалось, что передача электромагнитной энергии из литосферы в ионосферу, нагрев и его дальнейшие следствия в E-области происходят при возбуждении гипотетического резонатора в системе литосфера–ионосфера. Учитывая блоковое строение земной коры и полагая, что для не очень крупных землетрясений характерный размер зоны подготовки землетрясений

$$L \approx H,$$

где H – эффективное расстояние от Земли до E-области ионосферы, можно грубо оценить емкость системы литосфера–ионосфера в области подготовки землетрясения как $C \approx \varepsilon_0 H$, а индуктивность $L \approx \mu_0 H$. Отсюда период колебаний в системе можно оценить как $T = 2\pi(LC)^{1/2} \approx 2\pi H(\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2}$, а частоту соответственно как $f \approx 0.5$ кГц при $H = 100$ км. К настоящему времени, однако, пока нет экспериментальных подтверждений, свидетельствующих в пользу резонансной модели, хотя для ряда землетрясений был проведен анализ электромагнитных эффектов в диапазоне ОНЧ [2]. Поэтому, не исключая принципиальной возможности проявления резонансных ионосферных эффектов при подготовке некоторых землетрясений [17], можно полагать, что эти эффекты не являются определяющими в литосферно-ионосферной связи.

В другой модели [1, 11] предполагалось, что связь ионосферных возмущений с литосферными осуществляется посредством серии импульсов электромагнитного поля с характерными временами $\tau_1 = 0.1 \div 1$ с. Приведем грубую оценку, показывающую возможность возникновения возмущений с таким и характерными временами.

В ряде работ отмечалось, что за несколько суток перед землетрясениями в эпицентральной зоне неоднократно наблюдались всплески атмосферного электрического поля $\delta E \leq 10^3$ В/м и амплитуда вариаций магнитного поля $\delta B = 1 \div 10$ нТл [9, 11].

Предположим, что на поверхности Земли под действием каких-то причин происходит разделение зарядов с характерным временем τ_1 и с характерным пространственным масштабом, совпадающим с размером области подготовки землетрясения $L \approx (10 \div 100)$ км для достаточно сильных землетрясений с $M = 5 \div 6$. Тогда величина полного тока $I \approx Q/\tau_1$, а оценка напряженности электрического поля вблизи поверхности Земли, если считать заряды Q равномерно распределенными по площади порядка L^2 , $\delta E \approx Q/2\varepsilon_0 L^2$.

Таблица 1

Ионосферные предвестники землетрясений (эксперимент)					
Высота	Метод	Параметр	Аномалия	Расстояние (км)	Время перед з/т
>F-слоя	спутник	0.11–8 Гц ОНЧ-шум	$\uparrow \times 10 \div 10^3$	1000	часы
–	спутник	140 Гц–15 кГц	$\uparrow \times 10 \div 10^3$	шир: 1000, долг: 6000	часы-сутки
F-слой	ионозонд	F-рассеяние	$\uparrow 10 \%$	500	сутки
–	ионозонд	возмущения плотности	$\uparrow \times 2$ $\tau \approx 2$ ч	500	сутки
–	фотометр	630 нм	$\uparrow 15-40 \%$	1000	сутки
E _s -слой	ионозонд	плотность	$\downarrow 10 \%$	500	часы-сутки
–	ионозонд	резкие возмуще- ния плотности– «отсечки»	$\uparrow 10 \%$	500	сутки
–	ионозонд	E-рассеяние	$\uparrow 20 \%$	300	сутки
–	фотометр	557.7 нм	$\uparrow 7 \%$	200	часы
D-слой	СДВ	возмущения фа- зы сигнала	\uparrow	1000	часы-сутки

Считая ток равномерно распределенным по плоскому листу ширины L , получим оценку вариации магнитного поля $\delta B \approx \mu_0 Q / 2L\tau_1$, откуда оценка характерного времени процесса $\tau_1 \approx \mu_0 \epsilon_0 L \delta E / \delta B$. При указанных выше измеренных значениях δE , δB и L характерное время $\tau_1 \approx 1$ с, а максимальный заряд $Q \approx 200$ Кл. Приведенная оценка показывает возможность существования электромагнитных процессов в интервале характерных времен 0.1–10 с в области подготовки землетрясений при предположении об импульсном разделении зарядов. Некоторые результаты наблюдений всплесков активности электромагнитных процессов с указанными характерными временами перед землетрясениями содержатся в работах [10, 17]. В E-области ионосферы на тех же масштабах $L=100$ км над областью разделения зарядов должны возникнуть такие же по порядку величины индуцированные заряды $Q^* \leq Q$, распределенные на тех же характерных масштабах. Соответствующие им продольные потенциальные электрические поля $\delta E_{\parallel}^{\text{П}}$ могут быть оценены из закона Ома $m v_{\text{en}} V_{\parallel} \approx e \delta E_{\parallel}$ и соотношения

$$Q^* / \tau_1 \approx S_{\text{эф}} n e V_{\parallel},$$

где $S_{\text{эф}} \approx L^2 \cos \alpha$ (α – угол наклона силовых линий геомагнитного поля к вертикали). Оценка максимально возможных продольных электрических полей в ионосфере при $L=10^5$ м, $n=10^3$ см⁻³, $v_{\text{en}}=4 \cdot 10^4$ с⁻¹ и $\cos \alpha = 0.3$ дает $\delta E_{\parallel} \leq Q^* m v_{\text{en}} / \tau_1 L^2 n e^2 \approx 3 \cdot 10^{-4}$ В/м, что соответствует наблюдениям. Оценив ионосферные электрические поля сейсмической природы, обсудим вопрос о нагреве в E-области. Уравнение для джоулева нагрева ионосферной плазмы при протекании продольного тока имеет вид

$$\partial T_e / \partial t \approx m V_{\parallel}^2 v_{\text{en}} - \alpha (T_e - T_n) v_{\text{en}},$$

где δ – доля энергии, передаваемая от электронов к нейтралам при соударениях. При учете неупругих соударений $\delta=1.6 \cdot 10^{-3}$. При временах $\tau_1 \approx 1$ с, пренебрегая нестационарным членом, получим

$$T_e - T_{\text{en}} \approx \Delta T \approx m V_{\parallel}^2 / \delta.$$

Эффекты аномального расплывания спорадического слоя E в ионосфере перед землетрясением могут быть объяснены нагревом с увеличением температуры на $\Delta T_e \approx T_e$. Так, при скорости $V_{\parallel} \approx (T_e \delta m)^{1/2} \approx 3 \cdot 10^3$ м/с и температуре $T_e=0.03$ эВ по закону Ома $m v_{\text{en}} V_{\parallel} = e \delta E_{\parallel}$ получим оценку продольного электрического поля в E-области $\delta E_{\parallel} \approx 7 \cdot 10^{-4}$ В/м.

Генерация таких продольных электрических полей может осуществляться, если на Земле возникнут локальные заряды $Q > 200$ Кл, либо имеют место более резкие (например, $\tau=0.2 \div 0.3$ с) процессы разделения несколько меньших зарядов. Используя для времени расплывания спорадического слоя E формулу

$$\tau_D \approx 1.6 / D \approx 1.6 a^2 M v_{\text{in}} / k (T_e + T_i),$$

где $a=100 \div 1000$ м – толщина E_s-слоя, D – коэффициент амбиполярной диффузии (T_e и T_i – температура в джоулях), получим при толщине спорадических слоев порядка 150 м и коэффициенте амбиполярной диффузии $D=60$ м²/с оценку времени жизни слоя $\tau_D \approx 15$ мин, что соответствует наблюдаемому перед землетрясениями резкому уменьшению плотности слоя E_s – «отсечке» [11, 13].

Таким образом, электрические поля сейсмического происхождения порядка 10^3 В/м вблизи поверхности Земли на горизонтальных масштабах порядка 100 км могут усилить процессы амбиполярной диффузии в ионосфере и уменьшить характерное время расплывания достаточно тонких (толщина $a < 100$ м) слоев E_s. Для более сильного нагрева и расплывания более тол-

стых слоев необходимы электрические поля гораздо интенсивнее, поэтому механизм гипотетического разделения зарядов на поверхности Земли не дает исчерпывающей интерпретации всех наблюдений.

В работе [18] была предложена гипотеза из числа самых простых и естественных, согласно которой при процессах смещения и разрушения блоков земной коры вдоль активных разломов в окрестности очага готовящегося землетрясения генерируется широкополосное электромагнитное излучение. Это излучение проходит через земную среду, атмосферу и ионосферу, трансформируется по спектру в результате взаимодействия с заряженными частицами околоземной плазмы и приводит к возбуждению в плазме верхней атмосферы и магнитосфере альфвеновских волн в диапазоне частот $0.3\div 10$ Гц. Зона возбуждения имеет размер $100\div 150$ км. Гипотеза была выдвинута для того, чтобы объяснить экспериментально обнаруженный эффект возбуждения аномального низкочастотного излучения (ОНЧ) в ионосфере на спутниках над областями землетрясений.

«Акустико-гравитационная» гипотеза

Одна из самых популярных гипотез в настоящее время, согласно которой в области подготовки землетрясений вблизи поверхности Земли генерируются атмосферные акустико-гравитационные волны (АГВ), распространяются через атмосферу и, доходя до ионосферных высот, приводят к возмущению ионосферы, благодаря столкновениям ионов с нейтралами [19, 20].

Эта гипотеза может объяснить предваряющих наблюдения землетрясения ионосферных возмущений, проведенные как при помощи ионозондов, так и с использованием спутников, особенно на расстояниях 1000 км и более от эпицентров. Подчеркнем, что возмущения регистрировались в магнитоспокойные периоды.

Генерация АГВ может быть связана с «поршневым» движением земной коры, имеющей блоковую структуру, с нестабильными тепловыми аномалиями, вызванными выходом парниковых газов в атмосферу в разломных зонах земной коры, а также с нестабильным поступлением массы литосферных газов в атмосферу. Экспериментально процесс генерации АГВ еще не исследован. Изучение эффективности возможных механизмов генерации АГВ показывает, что наиболее эффективна генерация, вызванная нестационарным притоком газов, когда поток энергии $\sim 2 \times 10^{-1}$ эрг/см² с.

Отметим, что влияние процессов подготовки землетрясений на область E ионосферы прослеживается на расстояниях до 1000 км и более от эпицентра [15]. Возможный механизм, который мог бы вызвать образование или расплывание спорадических слоев E на таких больших расстояниях, – это только такой механизм, в котором основную роль играют АГВ.

Обсудим причины возникновения АГВ в приземном слое атмосферы. Известно, что при сейсмологических измерениях устойчиво регистрируется спектр сейсмогравитационных колебаний Земли с периода-

ми от 30 мин до 4 ч [21, 22]. Из наблюдений известно также, что долгопериодные колебания с периодами от одного до пяти часов могут активизироваться за несколько суток перед сильными землетрясениями с магнитудами $M \geq 6.0$ [25]. Интенсификация этих колебаний, в частности, проявляется, по-видимому, в модуляции интенсивности естественного электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне периодов $t=2\div 3$ ч перед сейсмическими событиями [23, 24].

При сейсмогравитационных колебаниях поверхность Земли может действовать на атмосферу как поршень, вызывать вариации температуры, проводимости и давления, приводя к генерации АГВ в атмосфере. Кроме того, эти колебания на фазе сжатия могут приводить к выбросу в атмосферу радона и других газов. Метеорологические наблюдения в Средней Азии позволили выявить краткосрочные метеорологические предвестники землетрясений – аномальные вариации атмосферного давления, относительной влажности, температуры воздуха и скорости ветра [26]. Такие аномальные вариации наблюдались за несколько часов–суток перед рядом сильных землетрясений. Предполагалось, что причиной вариаций давления являлись соответственно вариации температуры поверхности Земли на больших площадях. Можно полагать, что генерация АГВ может быть вызвана и метеорологическими явлениями.

Отметим, что зимой и осенью за сутки-двое перед землетрясениями на ионограммах достаточно часто наблюдается появление и исчезновение следов слабых спорадических слоев с характерным временем 30–60 мин. При этом повышенная изменчивость проявляется обычно на расстояниях до 500 км от эпицентра, что совпадает с эффективным расстоянием распространения АГВ с периодами 30–60 мин.

Наблюдаемый эффект повышения интенсивности свечения ночного неба (с длиной волны $\lambda=5577$ Å) можно также интерпретировать на основе акустико-гравитационной модели. При диссипации волн на нелинейной фазе их распространения из-за процессов турбулентного перемешивания нейтральной атмосферы по вертикали повышаются концентрация NO, температура в E -области и, как следствие, повышается интенсивность свечения [27].

В работе [19] рассматривались источники АГВ сейсмогенного происхождения мозаичной структуры. Такие источники, сформированные хаотическими неоднородностями, могут быть более эффективными генераторами АГВ по сравнению с источниками, однородно распределенными в пространстве. Область подготовки землетрясения в работе моделировалась как мозаичный источник тепла и массы, модулированный во времени с характерным периодом порядка или больше периода Бранта–Вайсяля в атмосфере. Иными словами, предполагались волны со структурой, причем мозаичность возмущений была важна для объяснения ионосферных эффектов.

Согласно [38], результатом эволюции АГВ являет-

ся Колмогоровская турбулентность в ионосфере, причем время передачи возмущения от поверхности Земли до ионосферы составляет несколько часов и зависит от периода волны.

Можно полагать, что одновременные наблюдения давления и других метеорологических параметров в сейсмоактивных регионах на сети разнесенных пунктов на поверхности Земли и ионосферные наблюдения позволили бы экспериментально подтвердить изложенную здесь гипотезу связи в системе литосфера–атмосфера–ионосфера. Однако такие эксперименты сложны организационно и еще никем не проводились. Основные наблюдения, которые интерпретируются на основе изложенной гипотезы, приведены в табл. 2.

Таблица 2

«Акустико-гравитационная» гипотеза литосферно-атмосферно-ионосферных связей на больших горизонтальных масштабах. Расстояния от эпицентра 500–2000 км

1. Наблюдения всплесков ОНЧ на спутниках, возникающих при возникновении неустойчивости плазмы при диссипации АГВ.		Верхняя ионосфера $H > 700$ км
1. Увеличение турбулизации (F-рассеяние).		F-область ионосферы
1. Изменение системы ветров в E-области, нарушение корреляции плотностей E_s по разным станциям 2. Увеличение температуры в D и E, усиление турбулентного перемешивания, увеличение концентрации NO^+ в D, изменение фазы СДВ-сиг-нала.		D- и E-области ионосферы
Изменение давления, возбуждение АГВ с периодом $T > (10 \div 15)$ мин		Атмосфера
Всплески выхода газов на поверхность.	Изменение температуры поверхности.	
Процессы сдвига и сжатия в земной коре. Возбуждение сейсмогравитационных колебаний.		Земля

Гипотеза литосферно-ионосферной связи, основанная на эффекте увеличения радиоактивности и проводимости, приводящих к «модификации квазипостоянного электрического поля» в приземном слое атмосферы [12, 28, 29]

Известно, что радиоактивность нижних слоев атмосферы обусловлена в основном такими содержащимися в ней радиоактивными элементами, как радон, радий, торий, актиний и продуктами их распада. Радиоактивные элементы попадают в атмосферу вместе с почвенным воздухом. Они переносятся вверх воздушными потоками до высоты в несколько километров. При этом скорость ионообразования составляет величину порядка десяти пар ионов в кубическом сантиметре в секунду. Данные наблюдений свидетельствуют об увеличении уровня атмосферной радиоактивности при подготовке землетрясения, что

приводит к росту скорости ионообразования, а следовательно, проводимости.

Например, измерения концентрации радона на расстоянии в 300 км от эпицентра землетрясения 20.10.1991 г. на севере Индии [30] показали, что интенсивный всплеск концентрации радона произошел примерно за неделю до землетрясения. При этом концентрация радона в газе увеличилась в 2.5 раза, а в воде – более чем в 1.5 раза. В другом примере [31] показано, что в течение пяти дней до землетрясения наблюдалось увеличение концентрации радона примерно в 4 раза. Статистический анализ данных, охватывающих около 300 землетрясений, показал, что примерно в 75 % случаев землетрясениям предшествовали заметные повышения концентрации радона.

В работах [12, 29] была предложена одномерная модель «квазипостоянного электрического поля» в ионосфере, с помощью которой можно качественно интерпретировать увеличение плотности заряженных частиц в областях ионосферы D и E на основе эффекта изменения проводимости в нижней атмосфере на достаточно больших горизонтальных масштабах.

Отметим, что принимая гипотезу о квазипостоянных зарядах и электрических полях, необходимо предположить, что характерное время изменения электрического поля литосферного происхождения τ много больше максвелловского времени релаксации $\tau_0 = \epsilon_0 / \sigma_0 \approx 15$ мин. Такое предположение подразумевает наличие постоянного источника ЭДС, который бы на поверхности Земли обеспечивал добавление такого же количества зарядов, какое уходит в атмосферу. Напомним, что согласно [33, 34] система Земля–ионосфера представляет подобие сферического конденсатора, разность потенциалов между обкладками которого поддерживается грозовой активностью.

Анализ данных наблюдений послужил основой проведения теоретических исследований, позволивших сформулировать гипотезу литосферно-ионосферной связи [12, 29, 32] при модификации квазипостоянного электрического поля, обусловленной увеличением локальной радиоактивности.

Согласно модели, имеет место модификация высотного распределения проводимости и электрического поля в слое Земля–ионосфера. С увеличением уровня радиоактивности у поверхности Земли возрастает проводимость приземного слоя атмосферы высотой несколько километров, модифицируется вертикальное электрическое поле. Вблизи поверхности Земли электрическое поле уменьшается из-за роста проводимости, а на больших высотах увеличивается по сравнению с невозмущенным состоянием. Электрическое поле вблизи нижней границы ионосферы может возрасти в несколько раз. Таким образом, поскольку перед землетрясением происходит дополнительная ионизация нижней атмосферы, усиливается и модифицируется локальное электрическое поле в ионосфере.

Под действием электрического поля в атмосфере создается направленный к земной поверхности ток проводимости. В области подготовки землетрясе-

ний на фазе сжатия сейсмогравитационных колебаний, возбуждаемых перед землетрясением [21, 22], может происходить выброс радона в атмосферу. Характерное время такого процесса может быть от одного до нескольких часов. Концентрация радона может увеличиться в несколько раз, что приводит к увеличению ионизации и проводимости приземной атмосферы, к росту вертикального тока между земной поверхностью и ионосферой. Повышенный электрический ток, в свою очередь, увеличит локальное ионосферное электрическое поле, джоулев нагрев и температуру электронов в слое E. Следствием этого будут локальные движения плазмы в ионосфере и образование ионосферных неоднородностей, чем и объясняются, соответственно, УНЧ/КНЧ магнитные вариации.

Отметим, что повышение температуры области E приведет к уменьшению коэффициента рекомбинации. Таким образом можно интерпретировать увеличение плотности заряженных частиц в этой области ионосферы.

Другими следствиями возмущений электрического поля в проводящей области нижней ионосферы являются диссипативная неустойчивость АГВ на частоте с периодом, близким к периоду Бранта–Вяйясяля (БВ) [35], образование горизонтальных периодических неоднородностей проводимости ионосферы, формирование перемещающихся слоев продольного тока и плотности плазмы. При пересечении спутником этих слоев регистрируются флуктуации плотности плазмы, УНЧ/КНЧ-колебания магнитного поля и области повышенной температуры.

Физический механизм этой неустойчивости связан с дополнительным выделением джоулева тепла возмущенными токами при изменении в волне ионосферной проводимости.

Горизонтальные вариации проводимости с масштабом

$$l = \lambda/2 = \pi V_g / \omega_g = \pi a / \omega_g n(\omega_g),$$

где λ – длина волны, изменяют ионосферные электрические поля. Высокая проводимость вдоль магнитных силовых линий приводит к распространению возмущений электрического поля в верхние слои ионосферы и в магнитосферу. Возникающая при этом электрическая цепь включает в себя продольные токи, переносящие электрическое поле вдоль магнитных силовых линий, и замкнутые на них поперечные токи, обусловленные проводимостью Педерсена. При этом продольные токи переносятся электронами, а носителями поперечных токов являются ионы. Появление токов замыкания сопровождается локальными изменениями концентрации плазмы. Таким образом, появление горизонтальной пространственной структуры проводимости ионосферы приводит к образованию токов вдоль геомагнитного поля. Поперечные пространственные размеры этих слоев совпадают с масштабами горизонтальной пространственной структуры проводимости. При пересечении спутником,

имеющим скорость V_s , плазменных неоднородностей с горизонтальным масштабом l регистрируются вариации плотности плазмы и магнитного поля с характерным временем l/V_s . На пролетающем в ионосфере спутнике наблюдаются вариации магнитного поля, и их пространственный масштаб соответствует масштабу времени порядка 10^{-5} с. Численные оценки показали, что относительное изменение концентрации плазмы $\Delta N/N_0 \approx 1.6 \div 16\%$, амплитуда колебания магнитного поля $\Delta B \approx 5$ нТл, интервал времени, за который спутник пересекает продольный ток и плазменную неоднородность, составляет $\Delta t \approx 0.3 \div 3$ с [6, 12, 35]. Основные процессы, соответствующие гипотезе, отражены в табл. 3.

Таблица 3

Гипотеза литосферно-ионосферной связи, основанная на учете увеличения радиоактивности, проводимости и модификации квазипостоянного электрического поля в приземном слое атмосферы

Распространение акустико-гравитационных волн, передача возмущений электромагнитного поля вдоль магнитных силовых линий, возникновение ОНЧ-колебаний магнитного поля.	Верхняя ионосфера и F-область
Увеличение вертикального тока, джоулев нагрев, развитие диссипативной неустойчивости, образование горизонтальных периодических неоднородностей плотности, генерация акустико-гравитационных колебаний с периодами, близкими к периодам БВ (~5 мин), возникновение продольных токов.	E-область ионосферы
Выделение радона, увеличение атмосферной проводимости и увеличение вертикального тока.	Атмосфера
Процессы сдвига и сжатия в земной коре.	Земля

Перейдем к гипотезам, объясняющим мелкомасштабные и кратковременные электрические процессы на расстояниях, достаточно близких к эпицентрам будущих землетрясений.

«Акустико-электрическая» гипотеза возбуждения E_s-генераторов и мини-токовых систем в ночной E-области ионосферы под действием акустических импульсов

«Акустико-электрическая» гипотеза возбуждения E_s-генераторов и мини-токовых систем в ночной E-области ионосферы под действием акустических импульсов, идущих от Земли, – одна из последних гипотез, пока еще не подкрепленная наблюдениями. Согласно этой гипотезе, объясняющей ионосферные эффекты на достаточно близких расстояниях в несколько сотен километров от будущих эпицентров, предполагается наличие акустических импульсов, распространяющихся от области подготов-

ки землетрясений до ионосферных высот и генерирующих электрические токи в спорадических слоях.

В работах [11, 36] было показано, что при воздействии на спорадический слой порыва нейтрального ветра ночной спорадический слой конечных горизонтальных размеров работает как нестационарный генератор тока, образуется трехмерная система электрических полей и токов, которые при выполнении некоторых условий далее могут быть причиной плазменных неустойчивостей и плазменной турбулентности. В указанных работах были представлены модели таких систем для высот между 95 и 130 км. При этом предполагалось, что спорадические слои расположены в окружающей плазме меньшей плотности. Заметим, что распространяющиеся вверх от поверхности Земли акустические возмущения могут достигать ионосферных высот и приводить к эффектам в ионосфере, только если их периоды лежат в интервале 1–5 мин [37]. С диссипацией инфразвука, излучаемого, согласно гипотезе, из эпицентра землетрясения за несколько часов перед ним, связаны, по-видимому вариации свечения [27].

Поскольку имеются экспериментальные свидетельства того, что система двух плоских горизонтальных спорадических слоев, находящихся один над другим, – обычное явление в среднеширотной ионосфере, оказалось целесообразным рассмотреть трехмерную модель двух слоев, ограниченных в горизонтальном направлении, один из которых был «генератором» тока, а другой («нагрузкой»). Предполагалось, что первый слой – «генератор» подвержен воздействию нейтрального ветра, обусловленного акустической волной, а второй слой («нагрузка»), находящийся ниже первого, не подвержен. В такой системе токов в двух различных по плотности горизонтальных спорадических слоях E_s и токов вдоль линий магнитного поля, связывающих границы двух слоев, как показал анализ, возможно возбуждение Фарлей-Бунемановской турбулентности. Кроме того, если спорадические слои достаточно толсты и плотны, то в продольных токах, протекающих вдоль геомагнитного поля, во внешней цепи могут возникать ионно-акустическая неустойчивость и турбулентность и интенсивный нагрев ионосферной плазмы.

Таким образом, если до или во время землетрясения в приземной атмосфере вблизи эпицентральной зоны имеет место достаточно сильная низкочастотная шумовая акустическая активность, то может действовать описанный механизм сейсмоионосферной связи. Подчеркнем, что модель предполагает пространственную локализацию – горизонтальный масштаб локальных токов может быть порядка нескольких километров. Такого рода нагрев также может быть причиной локального возрастания атмосферной оптической эмиссии с характерным горизонтальным размером источника порядка нескольких десятков километров.

«Гравитационно-электростатическая» гипотеза

«Гравитационно-электростатическая» гипотеза – одна из последних гипотез [39]. Согласно этой гипотезе литосферно-ионосферной связи при землетрясениях принимается во внимание, что в области подготовки достаточно часто происходит импульсное выделение радона. При наличии аэрозолей возникают локальные электрогравитационные френкелевские генераторы и мини-токовые системы с временами жизни порядка нескольких минут и горизонтальными размерами до нескольких десятков метров. Нестационарное разделение зарядов и создание мини-токовых систем в отдельных элементах приводят, с одной стороны, к всплескам инфракрасного излучения и, с другой стороны, к передаче соответствующих возмущений вверх, в ионосферу.

Реально в природе, по-видимому, работает совокупность ряда физических механизмов, некоторые из них мы здесь обсудили.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
2. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 173 с.
3. Pulnits S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin; Heidelberg; New-York.. 2004. 315 p.
4. Липеровский В.А., Мигулин В.В., Ларкина В.И. и др. Обнаружение эффектов воздействия землетрясений на ОНЧ-КНЧ-шумы во внешней ионосфере / Препр. № 25 ИЗМИРАН АН СССР. 1982. 28 с.
5. Ларкина В.И., Наливайко А.В., Гершензон Н.И. и др. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрoномия. 1983. Т. 23, № 5. С. 842–846.
6. Serebryakova O.N., Bilichenko S.V., Chmyrev V.M. et al. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellite // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. P. 91–94.
7. Parrot M. Statistical study of ELF-VLF emissions recorded by a low-altitude satellite during seismic events // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N A12. P. 23339–23347.
8. Tate J., Daily W. Evidence of electro-seismic phenomena // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989. V. 57. P. 1–10.
9. Гогатишвили Ю.М. Геомагнитные предвестники интенсивных землетрясений в спектре геомагнитных пульсаций с частотами 1-0.002 Гц // Геомагнетизм и аэрoномия. 1984. Т. 24, № 4. С. 687–700.
10. Fraser-Smith A.C., Bernardi A. Mc Gill P.G., Bowen M.M., et al. Ladd M.E., Helliwell R.A., Villard O.G. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the $M \geq 7.1$ Loma Prieta earthquake // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P. 1465–1468.
11. Колоколов Л.Е., Липеровская Е.В., Липеровский В.А. и др. Резкие расплывания спорадических слоев E среднеширотной ионосферы в периоды подготовки землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1992. № 7. С. 101–109.
12. Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью ра-

- диофизических наземно-космических методов. М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 64-87.
13. Алимов О.А., Гохберг М.Б., Липеровская Е.В. и др. Эффект резких уменьшений плотности спорадического слоя E_s ионосферы – предвестник землетрясений // Докл. АН СССР. 1989. Т. 305, № 6. С. 1335–1339.
14. Липеровская Е.В., Похотелов О.А., Олейник М.А. и др. Некоторые эффекты в спорадическом слое E -ионосферы перед землетрясениями // Физика Земли. 1994. № 11. С. 86–88.
15. Липеровская Е.В., Христинис Н., Липеровский В.А., Олейник М.А. Эффекты сейсмической и антропогенной активности в ночном спорадическом E -слое ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1994. Т. 34, № 3. С. 56–59.
16. Гохберг М.Б., Булошников А.М., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А. Резонансные явления при сейсмоионосферном взаимодействии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 6. С. 5–8.
17. Tate J.B. Radio-Earth: The Radio-seismic connection // *Whole Earth Rev.* 1990. N 68. P. 101–104.
18. Молчанов О.А. Прохождение электромагнитных полей от сейсмических источников в верхнюю ионосферу Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1991. Т. 31, № 1. С. 111–119.
19. Mareev E.A., Iudin D.I., Molchanov O.A. Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity // *Seismo-Electromagnetics (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling)*. TERRUPUB, 2002. P. 335–342.
20. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу / Российская Академия Наук, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта. М., 2004. 222 с.
21. Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.С. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313, № 3. С. 239–258.
22. Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Зуровили Д.Д. Сейсмогравитационные колебания Земли и связанные с ними возмущения атмосферы // Докл. АН СССР. 1989. Т. 306, № 2. С. 315–317.
23. Белла Ф., Биаджи П.Ф., Дела Моника Дж. и др. Наблюдения естественного электромагнитного излучения при землетрясениях в центральной Италии // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 1. С. 112–119.
24. Popov K.V., Liperovsky V.A., Meister C.-V., et al. On ionospheric precursors of earthquakes in scales of 2–3 hours // *Phys. and Chem. Earth.* 2004. V. 29. P. 529–535.
25. Гармаш С.В. Линьков Е.Н., Петрова Л.Н., Швед Г.Н. Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 35, № 12. С. 1290–1299.
26. Милькис М.Р. Метеорологические предвестники землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 3. С. 36–47.
27. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 272 с.
28. Pulnits S.A., Alekseev V.A., Legen'ka A.D., Hegai V.V. Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification // *Adv. Space Res.* 1997. V. 20, № 11. P. 2173–2176.
29. Sorokin V.M., Chmyrev V.M. Modification of the Ionosphere by Seismic Related Electric Field // *Seismo-Electromagnetics*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1998. P. 805–818.
30. Virk H.S., Singh B. Radon recording of Uttarkashi earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 737–742.
31. Heincke J., Koch U., Martinelli G. CO₂ and Radon measurements in the Vogtland area (Germany) – a contribution to earthquake prediction research // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 774–779.
32. Сорокин В.М., Чмырев В.М. Физико-химическое воздействие очага землетрясения на околоземное космическое пространство // *Химическая физика*. 1997. Т. 16, № 6. С. 136–144.
33. Chalmers J.A. Atmospheric Electricity: 2-nd ed. New-York: Pergamon Press, 1967. 450 p.
34. Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // *УФН*. 1962. Т. 76, вып. 4. С. 593–642.
35. Chmyrev V.M., Sorokin V.M., Pokhotelov O.A. Theory of small scale plasma density inhomogeneities and ULF/ELF magnetic field oscillations excited in the ionosphere prior to earthquakes // *Seismo-Electromagnetics*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1998.
36. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Schlegel K., Haldoupis Ch. Currents and turbulence in and near mid-latitude sporadic E -layers caused by strong acoustic impulses // *Ann. Geophys.* 1997. V. 15. P. 767–773.
37. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources. A summary // *Ann. Geophys.* 1985. V. 3. P. 673–679.
38. Molchanov O.A. On the origin of low- and middle-latitude ionospheric turbulence // *Phys. and Chem. Earth.* 2004. V. 29. P. 559–567.
39. Liperovsky, V.A., Meister, C.-V., Liperovskaya E.V., et al. On E_s -spread effects in the ionosphere before earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2005. V. 5. P. 1–4.