

<https://doi.org/10.15407/knit2020.03.055>

УДК 551.510.535:551.511.31

Г. В. ЛИЗУНОВ¹

зав. лаб., канд. физ.-мат. наук

E-mail: georgii.lizunov@gmail.com

Т. В. СКОРОХОД²

сотруд. докторантуры кафедры физики, канд. физ.-мат. наук

E-mail: tetianaskorokhod1983@gmail.com

В. Е. КОРЕПАНОВ³

зам. директора, д-р техн. наук

E-mail: vakor@isr.lviv.ua

¹ Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины

Проспект Академика Глушкова 40, корп. 4/1, Киев, Украина, 03187

² Университет Ариэль, Израиль

³ Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины

ул. Наукова 5А, Львов, Украина, 79060

АТМОСФЕРНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В РЯДУ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ СЕЙСМОИОНОСФЕРНОЙ СВЯЗИ

В работе обращается внимание научного сообщества на атмосферные гравитационные волны (ГВ) как наиболее вероятный механизм переноса энергии из приземных слоёв атмосферы на космические высоты и описывается формируемый таким образом канал сейсмоионосферной связи. Обсуждаются несколько основных механизмов воздействия на ионосферу снизу: распространение электромагнитных излучений; замыкание через ионосферу атмосферных токов; проникновение волн нейтральной атмосферы. Анализируются теоретические и экспериментальные данные, касающиеся собственно ГВ. Приведены простые аналитические выражения для расчета параметров ГВ в конкретных экспериментальных условиях. Проанализирована специфика дисперсионных свойств ГВ и особенностей их распространения, исследованы процессы амплитудного усиления и диссипации ГВ с высотой, описан механизм генерации электромагнитных возмущений при пересечении ГВ динамо-слоя и определены количественные характеристики магнитодинамических возмущений ионосферы. В экспериментальной части анализируется распределение ГВ на ионосферных высотах по данным спутника DE-2 и выполнен статистический анализ связи ГВ с землетрясениями. Результаты DE-2 подкреплены сравнением с ранее опубликованными данными миссии DEMETER.

Ключевые слова: атмосферная гравитационная волна, землетрясение, сейсмоионосферная связь, термосфера, ионосфера

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера является специфической областью космического пространства, в состоянии которого отображаются Земные источники энерго-

выделения. Потоки энергии и импульса, поступающие в ионосферу снизу, вносят существенный вклад в формирование теплового баланса и динамической структуры ионосферной плазмы. Интерес к изучению связей между Землёй и

Цитування: Лизунов Г. В., Скороход Т. В., Корепанов В. Е. Атмосферные гравитационные волны в ряду физических механизмов сейсмоионосферной связи. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 3 (184). С. 55—80. <https://doi.org/10.15407/knit2020.03.055>

ионосферой стимулируется работами по ионосферным предвестникам землетрясений, происхождение которых до сих пор не имеет общепринятого объяснения.

Априори можно указать несколько физических агентов, которые могут быть ответственными за перенос энергии от поверхности Земли на космические высоты: 1) радиочастотные электромагнитные излучения; 2) электрические токи; 3) волны нейтральной атмосферы. Следуя работе [63], обратим внимание на то, что плазменные возмущения подчиняются уравнению непрерывности: изменение электронной концентрации = ионизация — рекомбинация \pm перенос. Поэтому эффективность тех или иных механизмов воздействия на ионосферу зависит от их способности влиять на фотохимические реакции и движение заряженных частиц. Общая цель данной работы — привлечь внимание к внутренним атмосферным гравитационным волнам (далее — ГВ) как наиболее вероятному носителю сейсмоионосферного взаимодействия.

Данное исследование развивает идеи наших предыдущих работ [50, 52]. Мы стремимся соединить разрозненные теоретические и экспериментальные сведения, необходимые для понимания ГВ, но разбросанные по многим публикациям и зачастую ускользающие из поля зрения исследователей. В качестве теоретического базиса мы приводим простые формулы, в полезности которых мы убедились на своём опыте. С их помощью читатель сможет сам воспроизвести все теоретические выкладки данной работы. Кроме того, обращение к более строгой теории с целью «точной интерпретации» экспериментальных данных или же абстрактного моделирования зачастую оказывается неоправданным. Это связано с тем, что параметры атмосферы в диапазоне высот от Земли до ионосферы известны лишь приближённо (они, к тому же, берутся из моделей атмосферы), и с тем, что аналитическая теория не учитывает всех факторов, влияющих на распространение ГВ (диссипация, нелинейность, неоднородность атмосферы и пр.).

Физике ГВ посвящены фундаментальные обзоры и монографии [2, 4, 6, 30, 31, 35, 36, 37, 45, 46, 76]. Эти труды, однако, не охватывают ряда

тем, необходимых для понимания ионосферных эффектов ГВ, а именно специфики диссипации ГВ в термосфере, генерации электродинамического отклика ионосферы, картины волнового поля ГВ, установленной по данным наблюдений на низкоорбитальных спутниках. Мы ставим целью восполнить указанные пробелы.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕХАНИЗМАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭНЕРГИИ ОТ ПРИЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ИОНОСФЕРУ

Нас будет интересовать воздействие приземных источников на плотные и магнитоактивные слои ионосферной плазмы, расположенные на высотах E - и F -областей, условно выше 100 км. Область D (по мнению ряда исследователей, связанная с литосферой электростатически) не будет специальным объектом нашего внимания.

Электромагнитное излучение. Радиочастотное электромагнитное излучение (ЭМИ) наблюдается из космоса со времен запуска первых искусственных спутников Земли. Более того, ЭМИ было исторически первым описанным в литературе типом ионосферного предвестника землетрясения (по данным измерений на спутнике «Интеркосмос-19») [3, 7].

Энергетически основным земным источником ЭМИ являются молниевые разряды. Всемирная грозовая активность обуславливает своеобразные черты радиопортрета нашей планеты, и прежде всего, устойчивую структуру шумановских резонансов с центральными частотами 7.8, 14.3, 20.8 Гц и т. д. Хотя роль резонатора в этом случае играет атмосферная полость между Землёй и ионосферой, часть энергии шумановских колебаний просачивается в космос. Наряду с шумановскими резонансами в электромагнитном окружении Земли следует выделить вистлерные волны с частотами от единиц до нескольких десятков кГц, которые также генерируются молниевыми разрядами. Кроме того, в этих же частотных диапазонах регистрируются многочисленные ЭМИ техногенного происхождения — излучения линий электропередач 50/60 Гц и их гармоники, сигналы навигационных передатчиков и радиовещательных станций и т. д., спектры которых демонстрируют при-

знаки нелинейных и резонансных взаимодействий с ионосферной плазмой [24, 27, 58, 59, 66, 67, 68, 69].

Если исключить из рассмотрения активные эксперименты по нагреву ионосферы мощным радиоизлучением, то можно утверждать, что энергетики природных и техногенных ЭМИ, как правило, недостаточно, чтобы модифицировать средние значения ионосферных параметров. (Хотя электромагнитные импульсы от молниевых разрядов и вызывают детектируемый нагрев электронного компонента, область локализации которого, однако, ограничивается высотами D -слоя) [19, 56].

Квазистационарное электрическое поле. Основы теории атмосферного электричества были разработаны в середине XX столетия и обобщены в монографии [18]. Исходными уравнениями являются уравнения токостатики:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = i, \quad \mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad (1)$$

где \mathbf{j} — плотность электрического тока, i — объёмная плотность источников тока, σ — электропроводность, \mathbf{E} — напряжённость электрического поля, ϕ — потенциал; вне источников $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$. Любые выводы относительно квазистационарных эффектов в ионосфере не должны противоречить решениям этих уравнений.

Распространённым заблуждением является уже представление о промежутке «земля — ионосфера» как о конденсаторе, в котором нижняя пластина (земля) заряжена отрицательно, верхняя пластина (ионосфера) — положительно, а пластины разделены квазинейтральной атмосферой. Возмущения ионосферы в такой модели трактуются как результат изменения заряда пластин конденсатора. На самом деле верхней пластины нет: положительно заряжен сам атмосферный промежуток между землёй и ионосферой, причём положительный объёмный заряд контактирует прямо с земной поверхностью, а высотный уровень с потенциалом 250 кВ, выше которого атмосфера практически эквипотенциальна, находится в подножии D -области, на высоте около 60 км. Вся конфигурация электрического поля Земли при этом заключена в пределах тропосферы и стратосферы, играющих роль

своего рода «клетки Фарадея», которая экранирует ионосферу от электрических наводок снизу [18, 38].

Как известно, в проводящей среде после прекращения действия электродвижущих сил объёмный заряд диссипирует за время $\tau \sim \epsilon_0 / \sigma$, где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная. У поверхности Земли это время составляет около 5 мин, на высоте 40 км — 0.1 с. Выше столкновения частиц становятся настолько редкими, что при расчёте электропроводности необходимо учитывать инерцию электронов; в этом случае формула для оценки времени нейтрализации заряда принимает вид $\tau \sim \sigma / (\epsilon_0 \omega_p^2)$, где ω_p — плазменная частота. На высоте 100 км $\tau \sim 0.01$ с. На больших временах разделение зарядов должно непрерывно поддерживаться. Таким образом, нескомпенсированный электрический заряд в атмосфере и связанное с ним электрическое поле возникают как следствие стационарной циркуляции электрических токов, генерируемых источниками атмосферного электричества и частично замыкающихся через землю внизу и ионосферу вверх [10, 18, 38]. Представление о конденсаторе «земля — ионосфера» (D -область) обретает смысл лишь при рассмотрении ЭМИ с частотами десятки герц и более.

В качестве примера на рис. 1 изображена конфигурация электрической цепи грозового облака. Модель заряда облака (рис. 1, а) представлена в виде элементарного диполя, а электрическое поле над землёй является суммой поля диполя и его электростатического изображения земной поверхностью; внутри земли — полем исходного диполя, но ослабленным пропорционально отношению проводимости земли к проводимости воздуха, т. е. в 10^{10} раз. Над облаком вследствие увеличения атмосферной проводимости с высотой часть линий электрического тока вытягивается по пути наименьшего сопротивления вверх (рис. 1, б). С увеличением высоты облака доля тока, замыкающегося через ионосферу, увеличивается [10]. Но верно и обратное: чем ниже расположен источник ЭДС, тем меньше направленная вверх электроструя. Ничтожно малой является утечка в ионосферу заряда поверхностных источников электричества. В то же время

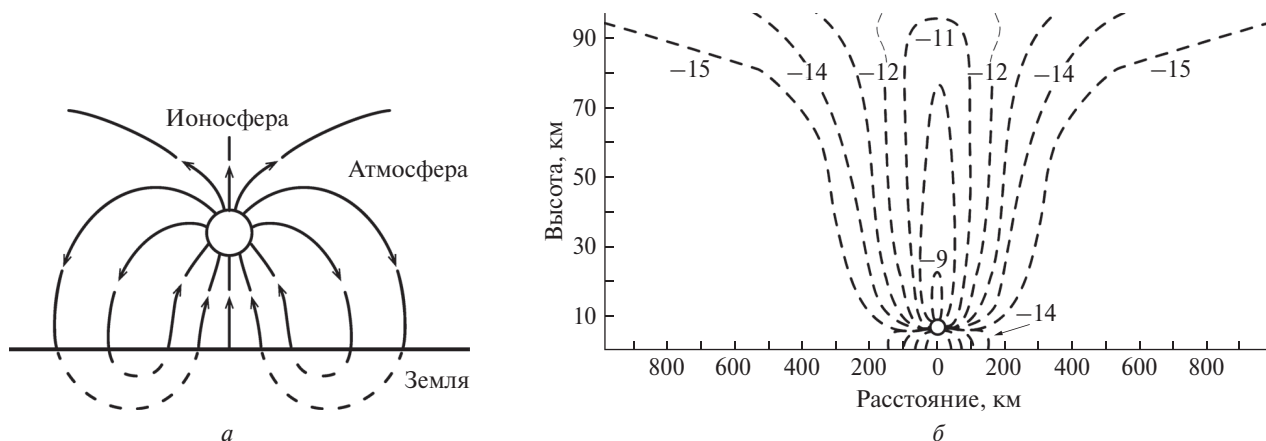


Рис. 1. Электрическая цепь грозового облака: а — конфигурации электрических силовых линий вблизи поверхности Земли, б — изолинии вертикальной составляющей плотности тока $\lg J_z (J_z, \text{A/m}^2)$, рассчитанные для реалистических параметров грозового диполя (см. [38])

часть токов, генерируемых на уровне верхней кромки облаков, достигает E -области, где она вливается в глобальную ионосферно-магнитосферную электрическую цепь. Для нас важна малость абсолютной величины токов, питающих ионосферу снизу ($10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ мкА/м}^2$) [23, 38], — на пять-шесть порядков меньше фоновых электрических токов в E -области.

Не лучше обстоит дело с проникновением в ионосферу электрического поля Земли, хотя у самой поверхности оно достигает значительных величин ($\sim 100 \text{ В/м}$ при ясной погоде и 1 кВ/м под грозовыми облаками). Чтобы разобраться с этим, вообразим векторную трубку, образованную линиями тока над источником ЭДС. Для примера можно рассмотреть пучок векторных линий над облаком на рис. 1, а. В силу уравнения $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ полный ток через поперечное сечение трубки S не зависит от высоты: $j_0 S_0 = j(z) S(z) = \sigma(z) E(z) S(z) = \text{const}$, где индекс «0» относится к нижнему краю токовой трубки. (Следует уточнить, что параметр σ является комбинацией компонентов тензора электропроводности атмосферы

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\parallel} \cos \theta)^2 + (\sigma_p \sin \theta)^2},$$

где σ_p — педерсеновская проводимость, σ_{\parallel} — продольная проводимость, θ — угол между направлением электрического поля и магнитного поля Земли). Пренебрегая изменением сечения

токонесущей трубки с высотой, получим

$$j = j_0 = \sigma(z) E(z) = \sigma_0 E_0 = \text{const}, \quad (2)$$

или

$$E(z) = \frac{\sigma_0}{\sigma(z)} E_0 = \frac{j_0}{\sigma(z)}.$$

Таким образом, возмущения электрического поля, вызванные либо вариациями источника электрического тока, либо вариациями электропроводности атмосферы, передаются вверх с коэффициентом ослабления $\sigma_0 / \sigma(z)$. Вертикальное распределение электропроводности атмосферы представлено на рис. 2. Можно видеть, что параметр $\sigma(z)$ увеличивается между поверхностью Земли и высотой 60 км (D -область) на 5–8 порядков величины, а высотой 120 км (E -область) на 10–13 порядков (в зависимости от взаимного направления электрического и магнитного полей на линии тока). Коэффициенты ослабления электрического поля равны $10^{-5} \dots 10^{-8}$ и $10^{-10} \dots 10^{-13}$ соответственно. Обоснованная оценка электрического поля приземных источников в E -области составляет не более 0.1 мкВ/м [5], что на три порядка меньше фоновых электрических полей на тех же высотах.

Вопреки вышесказанному, в ряде работ, посвящённых численному моделированию проникновения электрического поля Земли в ионосферу, утверждается о много больших полях — вплоть до 1 мВ/м в E -области [48, 49, 62]. Столь

завышенные теоретические оценки, по-видимому, вызваны ошибкой в постановке верхнего граничного условия к дифференциальной задаче (1). Этот вопрос подробно обсуждался в работе [5], где численный эксперимент был поставлен более корректно. На рис. 3 дан пример рассчитанного в этой работе распределения электрического поля поверхностного источника с напряжённостью 100 В/м. Кривые на графике соответствуют разным проводимостям ионосферы.

Волны нейтральной атмосферы. Атмосфера Земли, как и вообще атмосферы планет и звёзд, является гравитационно стратифицированной средой, плотность которой уменьшается с высотой по экспоненциальному барометрическому закону. Благодаря этому даже слабые колебания приземных слоёв воздуха, распространяясь в виде волнового процесса на ионосферные высоты, становятся сильными в масштабах энергий космической среды. Скажем, между поверхностью Земли и высотой 120 км плотность атмосферы уменьшается примерно в 10^7 раз. Во столько же раз увеличивается отношение энергии, переносимой волной, к энергии, заключённой в том же объёме окружающей атмосферы. Это обстоятельство обуславливает увеличение амплитуды атмосферных возмущений с высотой, о чём будет сказано ниже. В тоже время отметим, что для электростатического канала связи «земля — ионосфера» характерно экспоненциальное ослабление электрического поля с высотой.

Другим следствием барометрического закона является экспоненциальное увеличение коэффициентов кинематической вязкости и теплопроводности атмосферы, пропорциональных длине свободного пробега нейтральных частиц. В результате атмосферные волны испытывают диссипацию, которая происходит специфическим образом: энергия волны «высеивается» в некотором высотном слое, расположение которого не зависит от начальной амплитуды волны, а определяется её спектральными характеристиками — волновым числом и направлением распространения; этот вопрос будет детально рассмотрен ниже. Таким образом, волны нейтральной атмосферы не просто пересекают ионосферу, порождая колебания её плазменных

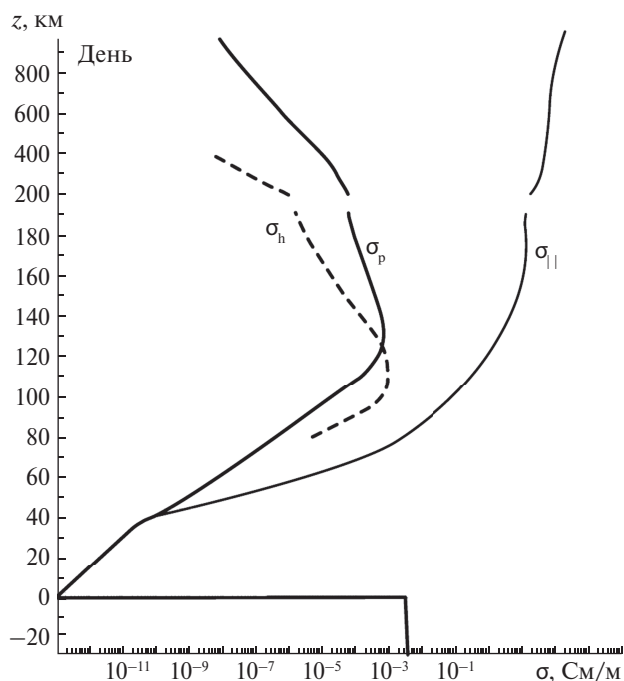


Рис. 2. Вертикальный профиль электропроводности атмосферы (средние широты, средняя солнечная активность, день)

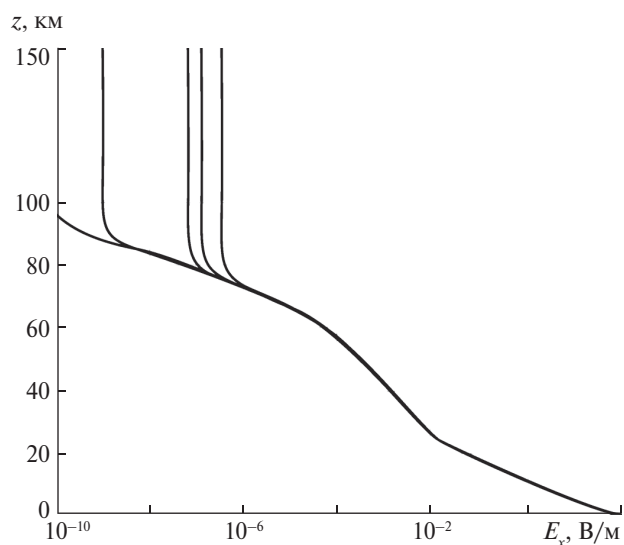


Рис. 3. Вертикальный профиль горизонтальной составляющей электрического поля поверхностного источника, рассчитанный над точкой с горизонтальной координатой, где поле максимально (по данным [5]). Горизонтальный размер источника 100 км, вертикальное электрическое поле на поверхности 100 В/м

параметров, но поглощаются на различных высотных уровнях, нагревая ионосферную плазму.

Мы рассматриваем атмосферные волны как наиболее эффективный механизм передачи энергии в ионосферу снизу. В широком спектре атмосферных волн в первую очередь нас будет интересовать гравитационная мода, распространение которой обусловлено действием сил плавучести — в поле тяготения нагретый газ всплывает, а охлаждённый тонет. Тектонические процессы как раз создают необходимые для генерации таких волн тепловые источники. Согласно данным [12] каскад явлений, происходящих над очагом готовящегося землетрясения, включает: эманацию в атмосферу коровых газов, содержащих парниковые компоненты (CO_2 , CH_4 и др.) и радиоактивный радон; конденсацию атмосферной влаги на ионизируемых радоном молекулах с выделением скрытой теплоты испарения; перемешивание и конвекцию нагретых слоёв воздуха. В конечном итоге формируется квазистационарное динамическое образование — сгусток тепловой энергии от уровня земли до верхней кромки облаков, являющийся, по-видимому, тем недостающим звеном, которое связывает атмосферные возмущения с тектоническими процессами.

Сейсмогенные тепловые аномалии наблюдаются со спутников в дальнем ИК-диапазоне. Характерные параметры тепловых аномалий составляют [70, 71]: нагретая зона соответствует проекции области землетрясения на земную поверхность, достигая размеров в сотни километров; температурный контраст с окружающей сейсмостойкой областью — несколько градусов; время жизни аномалии — от нескольких дней до нескольких недель. Теоретические оценки генерации атмосферных колебаний в таких условиях приведены в пионерских работах [32, 54, 71] и недавней работе [20]. Соответствующие экспериментальные подтверждения даны в работах [55, 75].

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АТМОСФЕРНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛНАХ

Типы атмосферных волн. Спектр волн нейтральной атмосферы включает три разделённых по

частоте моды: внутренние гравитационные волны (ГВ), более высокочастотные акустические волны и низкочастотные планетарные волны. В этом перечне ГВ играют главенствующую роль как по энергетике, так и по частоте регистрации. Дело в том, что гравитационная мода является не очень быстрой, хотя и не слишком медленной. Фазовые скорости ГВ достаточно малы для того, чтобы эти волны генерировались квазистационарными источниками энерговыделения: тепловыми аномалиями земной поверхности, движением погодных фронтов, ячейками грозовой конвекции и т. д. (в отличие от акустических волн, эффективно генерируемых сверхзвуковыми источниками). В то же время групповые скорости ГВ велики: время распространения переднего фронта ГВ от поверхности Земли до E -области составляет около получаса (в отличие от планетарных волн, распространение которых в ионосферу длится недели и месяцы).

Закон дисперсии гравитационных волн. Дисперсионное уравнение ГВ [35] является не особенно сложным, но всё-таки довольно громоздким. Для проведения аналитических выкладок можно рекомендовать пользоваться приближёнными формулами (тем более что на практике параметры верхней атмосферы известны с небольшой точностью, и это обесценивает применение точного закона дисперсии к анализу экспериментальных данных).

Круговая частота ГВ [6, 8] равна

$$\omega = \frac{c_g k_x}{\sqrt{1 + (k/k_g)^2}} = \omega_g \frac{k_x}{\sqrt{k_g^2 + k^2}}. \quad (3)$$

Это выражение хорошо аппроксимирует точное решение Хайнса [35].

Модельное выражение для декремента затухания ГВ, полученное в приближении слабой диссипации ГВ $\nu \ll \omega$ [8, 31, 74], имеет вид

$$\nu = D(k^2 + k_g^2). \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{k} = \{k_x, 0, k_z\}$ — волновой вектор. Ось OZ декартовой системы координат направлена вертикально вверх, ось OX выбрана так, чтобы волновой вектор лежал в плоскости XOZ ; $\omega_g = \sqrt{(1 - \gamma^{-1})g/H + (dT/dz)(g/T)}$ — частота колебаний Брента — Вайсяля, являющаяся мак-

симальной частотой ГВ; $k_g = (2H)^{-1}$ — характерный для теории ГВ масштаб волновых чисел; $c_g = \omega_g / k_g$ — максимальная горизонтальная скорость ГВ, приблизительно равная скорости звука; $H = RT / \mu g$ — высота однородной атмосферы; D — коэффициент кинематической вязкости атмосферы; R , γ , μ , T , g — газовая постоянная, показатель адиабаты, средняя молекулярная масса и температура атмосферы, и ускорение свободного падения. Численные значения некоторых из этих параметров приведены в табл. 1. На фазовой плоскости $\{k_x, \omega\}$ дисперсионные кривые ГВ заполняют область, показанную на рис. 4.

Из (3) следует выражение

$$\omega / k_x = c_g / \sqrt{1 + (k / k_g)^2},$$

согласно которому горизонтальная фазовая скорость ГВ монотонно уменьшается с увеличением волнового числа и всегда меньше скорости звука ($\omega / k_x < c_g$). Такое свойство ГВ следует признать исключительным, ведь на проекции фазовой скорости волны, казалось бы, не должно возникать ограничений сверху.

Из (3) также следуют выражения для составляющих и направления групповой скорости:

$$\begin{aligned} V_{gx} &= c_g \frac{1 + (k_z / k_g)^2}{[1 + (k / k_g)^2]^{3/2}}, \\ V_{gz} &= -c_g \frac{k_x k_z / k_g^2}{[1 + (k / k_g)^2]^{3/2}}, \\ \operatorname{tg} \psi &= \frac{V_{gz}}{V_{gx}} = -\frac{k_x k_z}{k_g^2 + k_z^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Знак «минус» во втором и третьем выражении означает, что вертикальные компоненты груп-

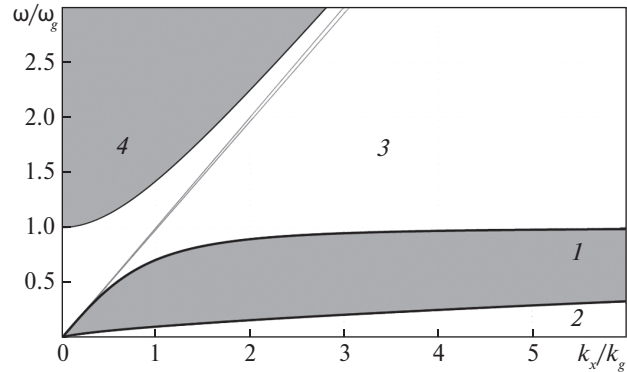


Рис. 4. Дисперсионная плоскость: 1 — область ГВ, 2 — область диссипации, 3 — запрещенная область, 4 — область акустических волн

повой и фазовой скорости ГВ направлены противоположно. Таким образом, энергия ГВ распространяется снизу вверх, если $k_z < 0$.

На рис. 5 вертикальная составляющая групповой скорости представлена как функция периода и горизонтальной длины волны. Распределение V_{gz} имеет вид гребня, который обрывается в сторону сверхзвуковых скоростей $\omega / k_x > c_g$. Вершина распределения достигается в точке

$$k_x = -k_z = k_g, \quad \omega = \omega_g / \sqrt{3},$$

где $V_{gz} = V_{gz \max} = c_g / 3^{3/2}$, $V_{gx} = 2c_g / 3^{3/2}$. Таким образом, максимально быстрый перенос волновых возмущений вверх происходит наклонно, под углом к горизонту $\psi = \operatorname{arctg}(1/2) \approx 30^\circ$.

Мы предполагаем, что область гребня групповой скорости на рис. 5 выделяет спектральное окно, в котором через атмосферу транспортируется снизу-вверх максимальный поток волновой энергии. Параметры окна следующие: периоды ГВ — от десяти до нескольких десятков минут, горизонтальные длины волн — от полусотни до

Таблица 1. Значения параметров теории гравитационных волн

Условия	H , км	$2\pi/k_g$, км	Скорость звука, м/с	c_g , м/с	$2\pi/\omega_g$, мин	$V_{gz \max}$, м/с
Высота 0...150 км	7	100	300	270	5.5	50
Высота более 150 км, высокая солнечная активность	50	700	890	870	12	170
Высота более 150 км, низкая солнечная активность	30	420	720	700	10	135

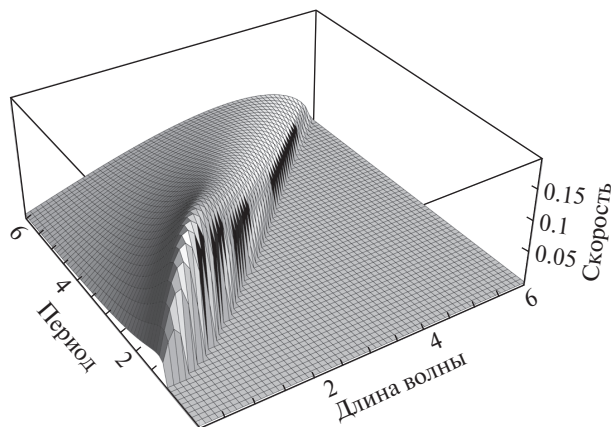


Рис. 5. Нормированная вертикальная групповая скорость ГВ V_{gz}/c_g как функция нормированной горизонтальной длины волны k_g/k_x и нормированного периода ω_g/ω

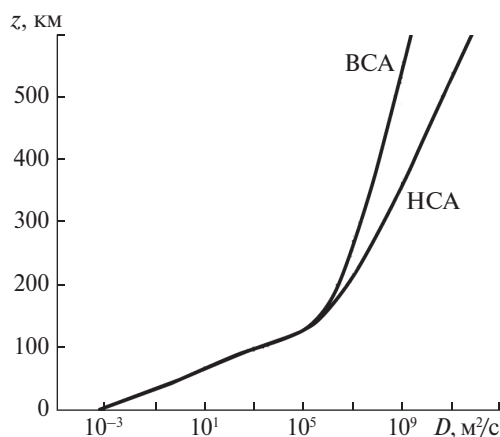


Рис. 6. Вертикальное распределение коэффициента кинематической вязкости D в условиях низкой солнечной активности (HCA), высокой активности (BCA)

нескольких сотен километров, горизонтальные фазовые скорости ГВ — сотни метров в секунду. Указанные значения совпадают с наблюдаемыми параметрами среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений, ассоциируемых с воздействиями снизу [30, 37]. Для генерации столь длинноволновых ГВ, очевидно, требуется, чтобы приземные источники ГВ имели горизонтальные размеры того же порядка, что и длины волн, в данном случае — мезомасштабы. Такие источники известны: это тепло-

вые аномалии над областью подготовки сильных землетрясений, конгломераты грозовых облаков, цунами. В то же время множественные некогерентные квазиточечные источники ГВ — нагретое солнцем вспаханное поле, работа индустриального предприятия, ветер над городской застройкой и т. п. — не должны быть эффективными генераторами ионосферных возмущений.

Амплитудное усиление и диссипация гравитационных волн с высотой. Поглощение энергии ГВ, как и любых макроскопических движений атмосферы, происходит под действием эффектов вязкости и теплопроводности, приближённо характеризующихся единым кинематическим коэффициентом вязкости/теплопроводности/диффузии $D = D(z)$ (рис. 6). Его значение у поверхности Земли мало ($\sim 10^{-3}$ м²/с), но в силу барометрического распределения плотности атмосферы экспоненциально быстро увеличивается с увеличением высоты. Поэтому атмосфера для одних и тех же длин волн возмущений ведёт себя как почти идеальная жидкость у поверхности Земли, и как чрезвычайно вязкая и теплопроводящая жидкость — на больших высотах.

Теория диссипации ГВ при распространении снизу вверх [1, 8, 72] обнаруживает глубокую аналогию с теорией Чепмена, описывающей поглощение атмосферой солнечного коротковолнового излучения при распространении сверху вниз. Уравнение вертикального переноса энергии ГВ имеет вид

$$\frac{dS_z}{dz} = -2\kappa S_z = -Q, \quad (6)$$

где $S_z = V_{gz}\rho\tilde{V}^2/2$ — плотность вертикального потока энергии, ρ — плотность атмосферы, \tilde{V} — амплитуда скорости атмосферных частиц, Q — темп нагрева единицы объёма атмосферы, κ — пространственный декремент затухания ГВ (коэффициент поглощения), который выражается через временной декремент затухания (4) по формуле $\kappa = v/V_{gz}$.

В модели изотермической и химически однородной атмосферы групповая скорость волны не изменяется с высотой, а такие параметры, как плотность и коэффициент кинематической вязкости атмосферы и декремент затухания вол-

ны, зависят от высоты по простым экспоненциальным законам: $\rho \propto \exp(-z/H)$, $\kappa \propto D \propto \exp(+z/H)$. В этом случае уравнение (6) имеет аналитическое решение:

$$Q = Q_m \exp \left\{ 1 + \frac{z - z_m}{H} - \exp \left(\frac{z - z_m}{H} \right) \right\}, \quad (7)$$

где максимум поглощения энергии волны $Q = Q_m$ достигается на высоте z_m , определяемой условием

$$\kappa(z) \Big|_{z=z_m} = 1/(2H). \quad (8)$$

Интуитивно кажется, что высота поглощения волны должна зависеть от её интенсивности — слабые волны должны затухать ближе к источнику, сильные — достигать больших высот. Соотношение (8) показывает, что это не так — параметр z_m зависит от высоты однородной атмосферы H и, через декремент затухания k , — от спектральных параметров волны, но не от её начальной амплитуды. Отсюда вытекает, что даже слабые приземные источники ГВ создают накачку энергии на ионосферные высоты, причём каждой монохроматической составляющей волны соответствует своя высота поглощения.

Чтобы пояснить этот вывод, рассмотрим процесс изменения амплитуды атмосферной волны с высотой. Решая уравнение (6) относительно скорости частиц, находим:

$$\begin{aligned} \tilde{V}(z) &= \tilde{V}_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho(z)}} \exp \left\{ - \int_0^z \kappa(z) dz \right\} = \\ &= \tilde{V}_0 \exp \left\{ \int_0^z \left(\frac{1}{2H} - \kappa(z) \right) dz \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где \tilde{V}_0 — скорость у поверхности Земли. Таким образом, эволюция волны происходит под действием двух конкурирующих факторов — амплитудного усиления с инкрементом $1/(2H)$, обусловленным барометрическим распределением плотности атмосферы, и затухания с декрементом $\kappa = \kappa(z)$, обусловленным вязкостью и теплопроводностью. На малых высотах, где диссипация мала, превалирует фактор усиления, на больших высотах — затухания. При этом максимальная амплитуда ГВ достигается при условии $\kappa = 1/(2H)$, что как раз совпадает с условием (8). Эти выкладки иллюстрирует рис. 7, на котором вертикальное распределение (9) по-

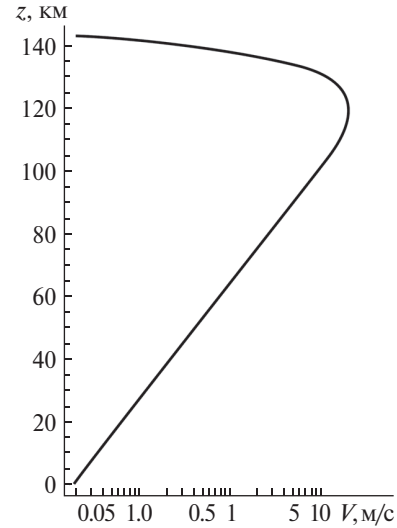


Рис. 7. Вертикальное распределение амплитуды ГВ

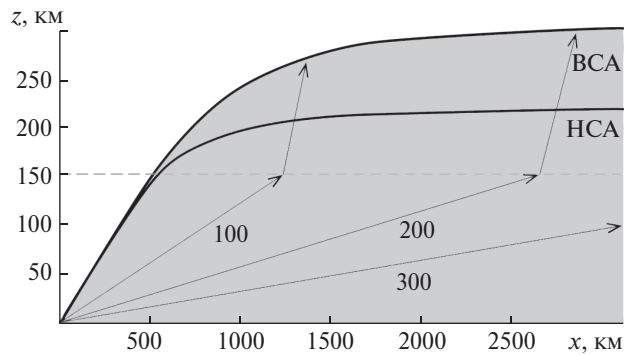


Рис. 8. Поле ГВ, генерируемое точечным поверхностным источником. Показана зависимость максимальной высоты распространения ГВ в условиях высокой (BCA) и низкой (HCA) солнечной активности. Цифры у кривых — горизонтальная длина волны ГВ в км

строено при следующих параметрах ГВ: горизонтальная длина волны 15 км, период 11 мин, скорость колебаний у поверхности земли $\tilde{V}_0 = 2$ см/с. Отметим, что фактор усиления амплитуды волны на высоте 120 км составляет 10^3 .

На рис. 8 представлена зависимость высоты максимального энергопоглощения ГВ от направления распространения (направления групповой скорости) $z_m = z_m(\psi)$, рассчитанная по приведенным выше формулам для модели двухслойной атмосферы. Параметры слоёв указаны в табл. 1. Слои «сшиты» на высоте 150 км

при значении коэффициента кинематической вязкости $D = 10^5 \text{ м}^2/\text{с}$. Несмотря на относительную простоту, такая модель описывает ключевые особенности волнового поля, генерируемого поверхностным источником ГВ.

Как показывает рис. 8, диаграмма направленности излучения квазиточечного источника ГВ имеет воронкообразную форму (что кардинально отличает её от сферически изотропной диаграммы направленности излучения акустических волн [30]). Непосредственно над источником ГВ отсутствуют в силу быстрого затухания гармоник, распространяющихся под большими углами к горизонту. Верхняя кромка поля ГВ достигает высот 200...300 км на удалении более 1500 км от источника. Уточним, что на рис. 8 приведен график параметра z_m , хотя часть энергии ГВ просачивается несколько выше, в пределах примерно ещё одного масштаба высоты однородной атмосферы H . С другой стороны, указанных максимальных высот достигает малая часть спектральной мощности источника — в окрестности гребня групповой скорости на рис. 5. Большинство же гармоник поглощается ниже, в области пространства, показанной на рис. 8 серым цветом.

Распространяясь от поверхности Земли в ионосферу, ГВ испытывают огромное амплитудное усиление. Естественно ожидать, что в таких условиях волны могут достигать уровня опрокидывания $\tilde{V} \sim \omega/k$ и далее балансировать вблизи этого уровня, сбрасывая избыточную энергию и импульс в атмосферу. В этом случае амплитуда ГВ становится независимой от мощности своего источника внизу. Это обстоятельство позволяет пояснить экспериментальный факт, обнаруженный ранее в работе [51] по данным спутника DEMETER. А именно, зарегистрированные амплитуды вариаций плотности ионосферной плазмы, вызванных землетрясениями, были приблизительно одинаковыми в широком диапазоне магнитуд землетрясений $M = 4.8...8.0$ (см. рис. 2 в работе [51]).

Теоретические и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в области высот 70...150 км, где атмосферная среда уже достаточно разрежена, но поток энергии ГВ ещё велик,

диссипация ГВ вызывает нагрев атмосферы на десятки градусов кельвин. Таким образом, посредством ГВ происходит своего рода трансляция сейсмогенных тепловых аномалий на ионосферные высоты. Тем самым тектонические процессы выступают фактором, влияющим на энергетический баланс ионосферы (уступая в иерархии источников и стоков тепла прямому поглощению солнечного КВ-излучения, но наряду с притоком энергии из верхней термосферы за счёт молекулярной теплопроводности и охлаждением за счёт ИК-излучения) [11, 31, 46].

Влияние ветра на распространение гравитационных волн. Атмосфера Земли обладает сложной ветровой структурой. В нижней атмосфере преобладают мелкомасштабные и нерегулярные ветры. На ионосферных высотах циркуляция воздушных масс принимает более упорядоченный характер [11, 29, 64]. Вплоть до высоты 100 км скорость ветра не превышает десятков м/с, но значительно увеличивается в диапазоне высот 100...300 км. Так, скорость движения атмосферы под действием солнечного прилива достигает 200...300 м/с, причём вследствие возрастающей с высотой вязкости толща атмосферы выше примерно 300 км движется как единый слой [13]. В полярных широтах дополнительным источником движения нейтральной атмосферы выступает плазменная конвекция, под действием которой скорость ветра может увеличиваться до 400...500 м/с (при пиковой магнитной активности). Таким образом, в зависимости от времени суток, широты, солнечной и геомагнитной активности верхняя атмосфера движется со скоростями, соизмеримыми или превышающими фазовые скорости ГВ, что существенным образом сказывается на распространении и поглощении ГВ.

При пересечении ветровых структур лучи ГВ преломляются таким образом, что на попутном ветре волновое число и декремент затухания ГВ увеличиваются, а на встречном ветре — уменьшаются. Это легко понять из следующих соображений. Дисперсионное соотношение (3) записано для покоящейся атмосферы. При наличии ветра со скоростью $u = u(z)$ это соотношение справедливо в системе отсчёта ветра, а параметры волнового процесса в покоящейся систе-

ме отсчёта ω , ω/k_x и в системе отсчёта ветра $\omega_{\text{int}}(z)$, $\omega_{\text{int}}(z)/k_x$ связаны преобразованиями

$$\begin{aligned}\omega_{\text{int}}(z) &= \omega - k_x u_x(z), \\ \omega_{\text{int}}(z)/k_x &= \omega/k_x - u_x(z).\end{aligned}\quad (10)$$

При пересечении встречного ветра, когда $u_x < 0$, параметры ω_{int} и ω_{int}/k_x увеличиваются. Обращаясь к выражению (3), легко видеть, что в этом случае волновое число k уменьшается. При пересечении попутного ветра происходит наоборот. Но изменение волнового числа приводит к изменению декремента затухания ГВ $\kappa = \nu/V_{gz} \sim (k^2 + k_g^2)^{5/2}$ (см. выражения (4), (5)). Таким образом, на встречном ветре поглощение ГВ уменьшается, а на попутном — возрастает. В силу этих причин следует ожидать, что ГВ от приземных источников достигают верхней ионосферы нерегулярно, в зависимости от величины скорости и направления циркуляции верхней атмосферы относительно направления распространения ГВ. Эти выводы подтверждаются данными о том, что в спектрах термосферных ГВ преобладают гармоники, распространяющиеся против ветра [17, 25, 57, 73].

Генерация электромагнитных возмущений. В силу конечной электропроводности атмосферы и наличия у Земли магнитного поля любые атмосферные движения — ветер, приливы, волны — сопровождаются генерацией электрического тока. Его плотность равна

$$\mathbf{j} = \sigma \cdot (\mathbf{E} + \tilde{\mathbf{V}} \times \mathbf{B}), \quad (11)$$

где σ — тензор электропроводности атмосферы, $\tilde{\mathbf{V}}$ — скорость нейтральных частиц, \mathbf{B} — магнитное поле Земли, \mathbf{E} — электрическое поле. В этом выражении второе слагаемое в правой части описывает источник ЭДС, создаваемый движением нейтральной атмосферы (динамо-ток), а первое слагаемое — ток проводимости. Основы теории генерации электромагнитных возмущений при распространении ГВ разработаны в работах [21, 60].

Благодаря тому что в уравнении (11) фигурирует векторное произведение $\tilde{\mathbf{V}} \times \mathbf{B}$, генерация тока происходит под действием поперечной к магнитному полю компоненты движения атмосферы. А составляющая тока, параллельная

указанному поперечному движению, возникает под действием «дважды поперечной» холловской проводимости. Объясним это, приняв, что магнитное поле Земли направлено вертикально вдоль оси OZ ; в этом случае тензор электропроводности имеет вид

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_p & \sigma_h & 0 \\ -\sigma_h & \sigma_p & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\parallel} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где σ_p , σ_h , и σ_{\parallel} — педерсеновская, холловская и продольная проводимости соответственно. Направим ось OX таким образом, чтобы волновой вектор и вектор скорости нейтральных частиц лежали в плоскости XOZ : $\mathbf{k} = \{k_x, 0, k_z\}$, $\tilde{\mathbf{V}} = \{\tilde{V}_x, 0, \tilde{V}_z\}$. Тогда динамо-ток имеет холловскую составляющую $j_x^{\text{dyn}} = -\sigma_h \tilde{V}_x B$, параллельную движению нейтральных частиц, и перпендикулярную к нему педерсеновскую составляющую $j_y^{\text{dyn}} = \sigma_p \tilde{V}_x B$. Поскольку $\nabla \cdot \mathbf{j}^{\text{dyn}} \sim k_x j_x^{\text{dyn}}$, педерсеновская составляющая не вызывает разделение электрического заряда.

Как видно из распределения электропроводности атмосферы по высоте (рис. 2), холловская составляющая σ_h имеет на высотах $z_d = 90 \dots 130$ км выраженный максимум (динамо-слой), в котором и сосредотачивается струя динамо-тока. Вследствие относительно небольшой толщины динамо-слоя по сравнению с вертикальной длиной волны ГВ интегральную величину динамо-тока можно оценить как

$$I_x^{\text{dyn}} = \int_0^{\infty} j_x^{\text{dyn}} dz = \tilde{V}_{xd}^n B \int_0^{\infty} \sigma_h dz = \Sigma_h \tilde{V}_{xd}^n B, \quad (13)$$

где Σ_h — интегральная холловская проводимость, \tilde{V}_{xd}^n — скорость нейтральных частиц в динамо-слое.

Токовый источник (13) частично шунтируется током проводимости с плотностью $j_{cx} = \sigma_p E_x$, а частично замыкается посредством продольного тока j_z , инжектируемого в магнитосферу. Эквивалентная схема возникающей таким образом электрической цепи показана на рис. 9. Расчёт электрических параметров цепи производим стандартным для задач ионосферной электродинамики образом [47].

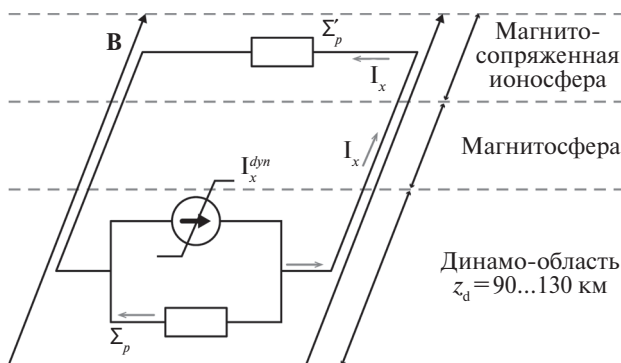


Рис. 9. Электрическая схема космической токовой цепи, генерируемой ГВ

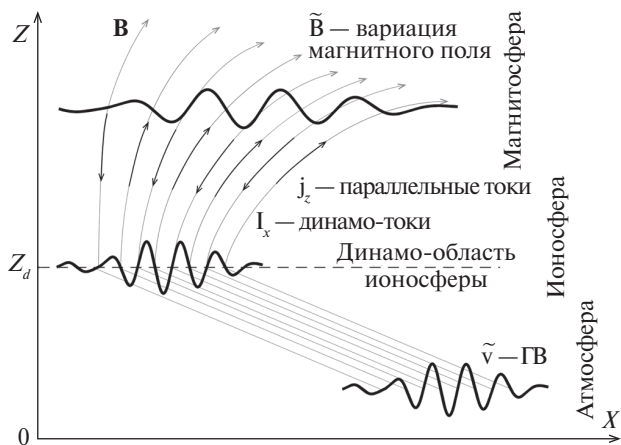


Рис. 10. Общий вид геокосмического возмущения при распространении ГВ

Таблица 2. Квазистационарные электромагнитные возмущения, генерируемых в E-области земными и космическими источниками

Источник	j , мкА/м ²	B , нТл	E , мВ/м
Поле магнитосферной конвекции (полярные шапки)	10	100	10
Атмосферный прилив (низкие широты)	1	10	1
Гравитационные волны (дневная полусфера)	1	10	1
Электрическое поле погодных систем	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}

Интегральная плотность поперечного тока (динамо-ток минус ток проводимости) составляет

$$I_x = I_x^{\text{dyn}} - I_x^c = \frac{\Sigma'_p \Sigma_h}{\Sigma_p + \Sigma'_p} \tilde{V}_{xd}^n B. \quad (14)$$

Поперечное электрическое поле —

$$E_x = \frac{\Sigma_h}{\Sigma_p + \Sigma'_p} \tilde{V}_{x0}^n B. \quad (15)$$

Генерируемая в динамо-слое магнитная вариация (в модели плоского токового слоя) —

$$\tilde{B}_y = 0.5 \mu_0 I_x. \quad (16)$$

Плотность продольного тока, инжектируемого в магнитосферу, —

$$j_z = -\frac{\partial}{\partial x} I_x \Rightarrow |j_z| = k_x I_x. \quad (17)$$

В этих формулах k_x — горизонтальное волновое число ГВ, Σ_p и Σ'_p — интегральная педерсеновская проводимость ионосферы в области возбуждения динамо-тока и в магнитосопряжённой области (сумму $\Sigma_p + \Sigma'_p$ следует трактовать как интегральную проводимость всей токонесущей трубки магнитного поля Земли), μ_0 — магнитная постоянная.

Таким образом, величина электромагнитного эффекта ГВ зависит от интегральной холловской проводимости ионосферы Σ_h , определяющей эффективность генерации электрического тока, и от условий замыкания электрической цепи в сопряжённой ионосфере. В случае $\Sigma'_p = 0$ (режим холостого хода) магнитная вариация отсутствует, а электрическая вариация максимальна. В случае $\Sigma'_p \rightarrow \infty$ (короткое замыкание) — наоборот. При реалистических параметрах ионосферы и ГВ: $\Sigma_h \sim \Sigma_p \sim \Sigma'_p = 20$ См (день), $B = 5 \cdot 10^{-4}$ Тл (средние широты), $\tilde{V}_{xd} = 20$ м/с (умеренная амплитуда ГВ), $k_x = 2\pi / (6 \cdot 10^4)$ м⁻¹ находим $E_x = 1$ мВ/м, $\tilde{B}_y = 6.5$ нТл, $j_z = 1$ мкА/м².

Теоретические оценки (14)–(17) являются приближёнными. Строгий расчёт должен учитывать наклонение магнитного поля Земли, взаимотносительное направление распространения ГВ и магнитного поля, распределение электропроводности в токонесущей магнитной трубке и ряд других факторов. Разработка численной модели взаимодействия ГВ с динамо-областью является целью наших дальнейших исследований.

Рис. 10 создаёт представление о совокупности процессов, сопровождающих распространение ГВ. Между поверхностью Земли и динамо-слоем ГВ представляет собой обычную волну нейтральной атмосферы (на рисунке её изображает волновой пакет справа внизу). В динамо-слое волновой процесс расщепляется. Атмосферная волна продолжает распространяться влево вверх (за пределы рисунка) на фоне усиливающейся с высотой диссипации и в конечном итоге поглощается на высотах 200...300 км (в зависимости от уровня солнечной активности, силы ветра и спектрального состава ГВ). Кроме того, часть энергии ГВ тратится на генерацию электрического тока, горизонтальная структура которого воспроизводит профиль ГВ в динамо-слое. Ток-овое возмущение транслируется в магнитосферу посредством продольного тока и связанных с ним вариаций магнитного поля. Возникающая таким образом электродинамическая структура испытывает геометрическую трансформацию, связанную с расхождением силовых линий магнитного поля Земли.

В F -области ионосферы (выше 150 км) электрическое поле (15) продуцирует плазменный дрейф со скоростью

$$\tilde{V}_y^p = -\frac{E_x}{B} = -\frac{\Sigma_h}{\Sigma_p + \Sigma'_p} \tilde{V}_{xd}^n. \quad (18)$$

Это соотношение указывает на новый, не описанный ранее механизм генерации перемещающегося ионосферного возмущения (ПИВ). Теория трактует ПИВ как результат столкновительного увлечения ионов движением нейтральных частиц [39—42, 76], откуда следует, что где нет ГВ, там нет и ПИВ — в стороне от волнового пакета ГВ или выше уровня диссипации ГВ. Но такой вывод противоречит наблюдениям ПИВ во всём диапазоне ионосферных высот, в том числе и на экзосферных высотах (выше 400...500 км), где распространение ГВ невозможно из-за малости столкновений нейтральных частиц между собой. Выражение (18) показывает, что при пересечении динамо-слоя волновой пакет ГВ порождает вынужденные колебания всей опирающейся на него силовой трубки магнитного поля Земли. При этом выражение (18) пра-

вильно объясняет амплитуды ПИВ — скорости заряженных и нейтральных частиц соизмеримы между собой, и нелокальный характер связи ГВ и ПИВ.

Итак, можно выделить три большие группы источников электрических токов в ионосфере: электрическое поле Земли, рассмотренное в разделе 1, динамо-эффект, и электрические поля магнитосферного происхождения (табл. 2).

3. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Распространение ГВ из нижних слоёв атмосферы на ионосферные высоты является установленным экспериментальным фактом, подтвержденным множеством наблюдений ионосферных эффектов ГВ в ситуациях, когда приземные источники ГВ были доподлинно известны (ядерные взрывы, катастрофические землетрясения и т. д.) [30, 37].

В качестве дополнительного примера укажем на результаты многолетних наземных метеорологических и магнитометрических наблюдений, которые ведутся на Украинской антарктической станции Академик Вернадский (о. Галиндез) и в магнитосопряжённом пункте Северного полушария (окрестность г. Бостон, США) [21]. На статистическом материале большого объема установлено, что волновые формы ГВ, регистрируемые в вариациях метеопараметров на Украинской антарктической станции, с некоторой задержкой воспроизводятся в вариациях магнитного поля Земли и далее транслируются в магнитосопряжённую ионосферу. На основе этих данных была разработана логическая схема генерации ионосферно-магнитосферных токовых систем, описанная в разд. 2.

Но особенно убедительным и наглядным примером, свидетельствующим об эффективности ГВ как агента переноса возмущений из нижней атмосферы на ионосферные высоты, являются эксперименты с регистрацией движения цунами в вариациях полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) [22, 65]. Цунами в открытом океане представляет собой плавное и невысокое вздутие водной поверхности, происходящее со скоростью долей сантиметра в секунду — это очень непроизводительный генератор ГВ (по

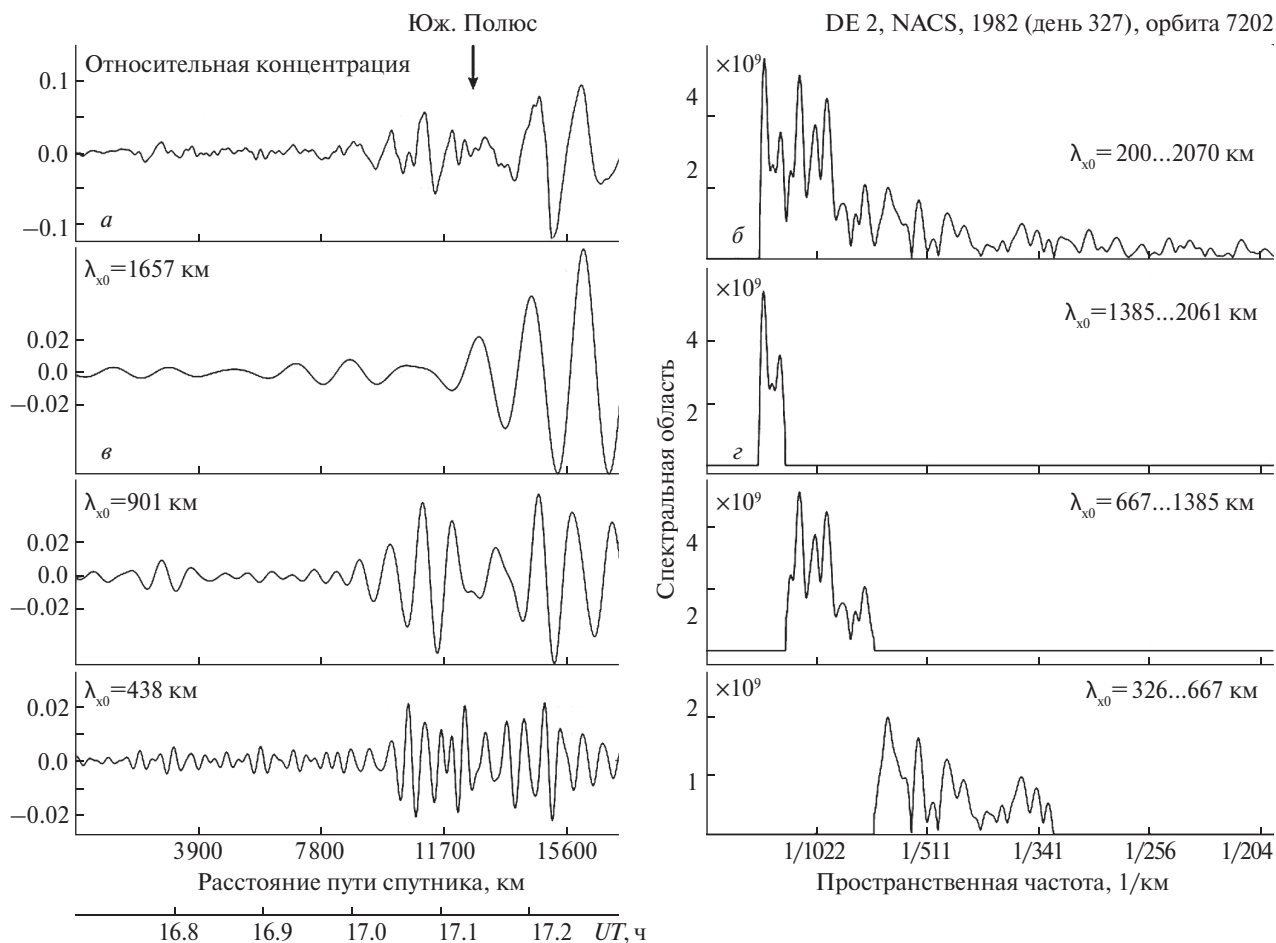


Рис. 11. Фильтрация ГВ в данных DE-2: а — волновая форма, б — амплитудный спектр, в — составляющие волновые пакеты, г — амплитудные спектры

сравнению, например, с тепловыми аномалиями). А величина ПЭС определяется главным образом концентрацией электронов на высоте около 250 км, куда проникает лишь малая часть спектральной мощности ГВ. Таким образом, даже столь неэффективный источник ГВ, как цунами, воздействуя на столь неподходящий для регистрации этих волн параметр как ПЭС, порождает отчетливо детектируемый ионосферный эффект.

Анализ данных спутника DE-2. В течение 1970-х и в начале 1980-х гг. была реализована серия проектов с регистрацией параметров верхней нейтральной атмосферы *in situ* на борту низкоорбитальных спутников. Наибольший объем данных получен со спутника DE-2, полет кото-

рого состоялся в период 1981—1983 гг. в условиях высокой солнечной активности. Длительные сеансы включений аппаратуры DE-2 обеспечили накопление значительного объема данных о состоянии атмосферы в высотном слое 250...500 км. Установленные на этом спутнике приборные комплексы NACS и WATS производили регистрацию всего набора газодинамических параметров атмосферы — концентрации, температуры и скорости нейтральных частиц. Это обстоятельство открыло возможность изучения полного спектрального состава атмосферных возмущений. Так, по величине осцилляций вертикальной скорости частиц \tilde{V}_z (непосредственно измеряемой прибором WATS) и вертикального смещения частиц δz (рассчитывается по

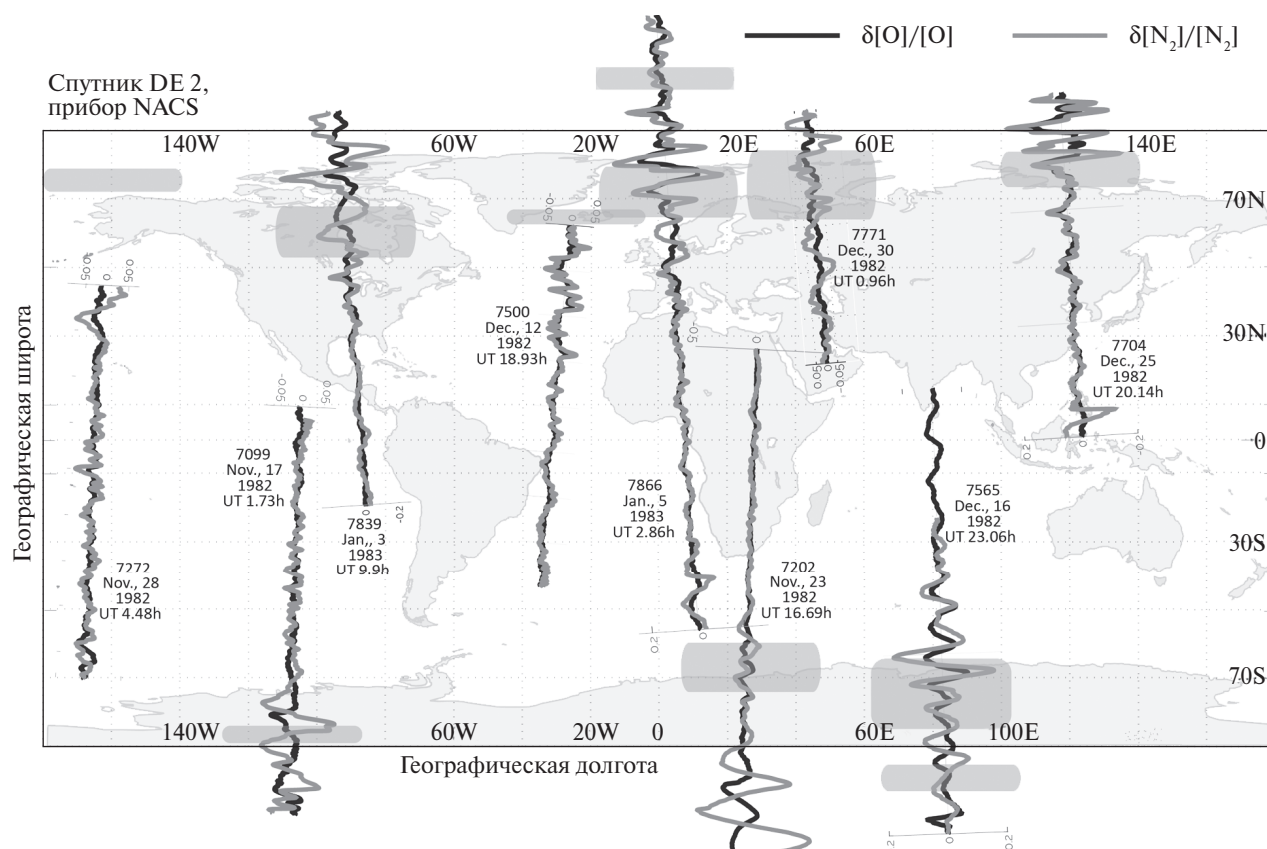


Рис. 12. Волновые формы ГВ в колебаниях плотности газовых компонентов О и N₂ по данным DE-2. Темно-серыми областями показаны текущие положения авральных зон

вариациям плотности, измеряемым прибором NACS) можно оценить частоту волны $\omega \sim \tilde{V}_z / \delta z$ [44], а затем, с использованием теории ГВ, — оценить составляющие волнового вектора [43]. Аналитической основой для соответствующих вычислений служат работы [26, 35, 53]. Алгоритмы обработки спутниковых данных с целью их декомпозиции на тренд, волновой процесс и шум описаны в работах [9, 14, 28, 33].

Далее представлены оригинальные результаты, полученные в результате обработки данных DE-2. На рис. 11 показан пример волновой формы ГВ, который является типичным — подобные волновые эпюры регистрировались на других витках DE-2 и на других спутниках. Этот рисунок демонстрирует два важных свойства термосферных возмущений. Первое свойство заключается в том, что волновые возмущения являются широкополосными — в диапазоне го-

ризонтальных длин волн примерно от 200 км до 2500 км. Второе свойство — что волновые возмущения возникают в результате суперпозиции нескольких волновых пакетов разных периодов и длин волн, распространяющихся по индивидуальным лучевым траекториям, и, вероятно, генерируемых разными источниками [14].

На рис. 12 показана географическая привязка волновых форм ГВ, зарегистрированных на разных орбитальных витках DE-2. Можно видеть, что в планетарном распределении ГВ выделяются активные высокоширотные области (Северная и Южная), где термосфера сильно возмущена, и спокойная низкоширотная область. Условная граница спокойной и активных областей проходит на геомагнитных широтах 40°...50° [15, 34, 61].

Эти данные согласуются с общепринятым представлением о том, что энергетически основ-

ными источниками термосферных ГВ служат процессы нагрева и ускорения газа в полярных сияниях. Из областей генерации в авроральных овалах ГВ распространяются вверх по широте, целиком заполняя полярные шапки, и в направлении экватора, затухая в средних широтах. Возмущённость активной зоны настолько велика, что, по-видимому, она делает невозможной регистрацию волн, генерируемых приземными источниками. В спокойной зоне, напротив, имеется возможность такие волны обнаружить [15]. Поскольку карта заметно искажает географические пропорции, уточним, что спокойная область занимает около 70 %, а обеих активных областей — 30 % площади термосферы Земли.

На рис. 13 показано расположение локализованных всплесков интенсивности ГВ, выявленных в спокойной зоне в период ноябрь 1982 г. — февраль 1983 г., и расположение эпицентров происшедших в это же время землетрясений. В целом области регистрации ГВ близки к сейсмическим районам. А если учесть, что ГВ в процессе распространения смещаются на тысячи километров в сторону от источника, то можно ожидать, что ГВ вызваны именно землетрясениями. Для проверки этого предположения к анализу данных был применён метод наложения эпох — мощный статистический инструмент, позволяющий распознавать причинно-следственные связи даже на фоне сильных помех. Множество событий — землетрясений и ГВ — было отобрано согласно ряду критериев. Учитывались только сильные землетрясения с магнитудой $M > 4.5$. Волновые формы ГВ были подвергнуты теоретическому анализу с целью расчёта спектральных характеристик ГВ (частот, длин волн и скоростей распространения). Волны с горизонтальной фазовой скоростью больше скорости звука в тропосфере (~ 300 м/с) были исключены из рассмотрения, поскольку они физически не могут быть сгенерированы поверхностными источниками. Кроме того, были отброшены пары землетрясение — ГВ, в которых распространение ГВ происходило по направлению к эпицентру землетрясения (по информации о направлении распространения волн вдоль орбиты спутника, определяемой исходя из порядка чередования

колебаний газовых компонентов О и N₂, согласно методике [16]).

На рис. 14 представлена причинно-следственная диаграмма, на которой все землетрясения помещены в начало отсчёта, а локализация ГВ относительно землетрясений указана в системе координат «время — расстояние». Выделяется скопление ГВ на среднем расстоянии 6000 километров от эпицентра и временах ± 5 ч по отношению к моменту землетрясения. Мы специально расширили временное окно до двух суток, чтобы продемонстрировать редкость ГВ вне скопления. Область положительных времён на диаграмме принято называть областью откликов, хотя «после» не всегда значит «вследствие». В данном случае часть скопления, относящаяся к положительным временам, лежит внутри сверхзвукового конуса и, по нашему мнению, не связана с землетрясением в нулевой момент времени. Мы полагаем, что все ГВ в скоплении — при отрицательных и положительных временах — генерируются процессами, предшествующими землетрясению, хотя часть ГВ достигает спутника уже после того, как землетрясение произошло. Правее звукового конуса наблюдается несколько ГВ со скоростью распространения 100...150 м/с; их мы трактуем как отклики на землетрясение.

Данные спутника DEMETER. Специальной целью проекта DEMETER (2005—2010 гг.) было изучение ионосферных эффектов землетрясений. Высота орбиты спутника составляла 650 км, что значительно превышает предельную высоту диссипации ГВ. Поэтому зарегистрированные этим спутником проявления ГВ следует трактовать как результат генерации магнитогидродинамического возмущения при взаимодействии ГВ с динамо-слоем (см. разд. 2).

На рис. 15, заимствованном из персональной презентации Мишеля Парро, показана статистическая диаграмма генерации электромагнитного шума над эпицентрными областями землетрясений. С использованием метода наложения эпох обработан архив данных трёхкомпонентного индукционного магнитометра IMSC на борту DEMETER (около 9000 ч сеансов измерений для 15500 орбит на протяжении шести с половиной лет). Множество исследуемых событий было

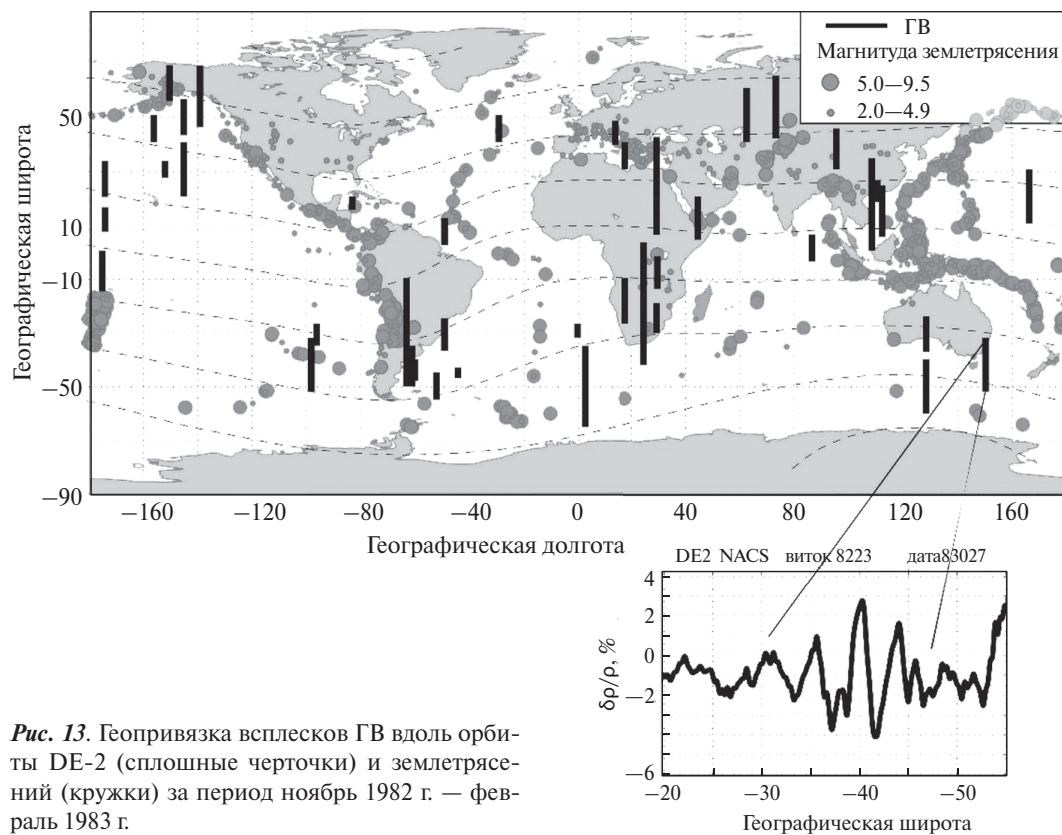


Рис. 13. Геопривязка всплесков ГВ вдоль орбиты DE-2 (сплошные черточки) и землетрясений (кружки) за период ноябрь 1982 г. — февраль 1983 г.

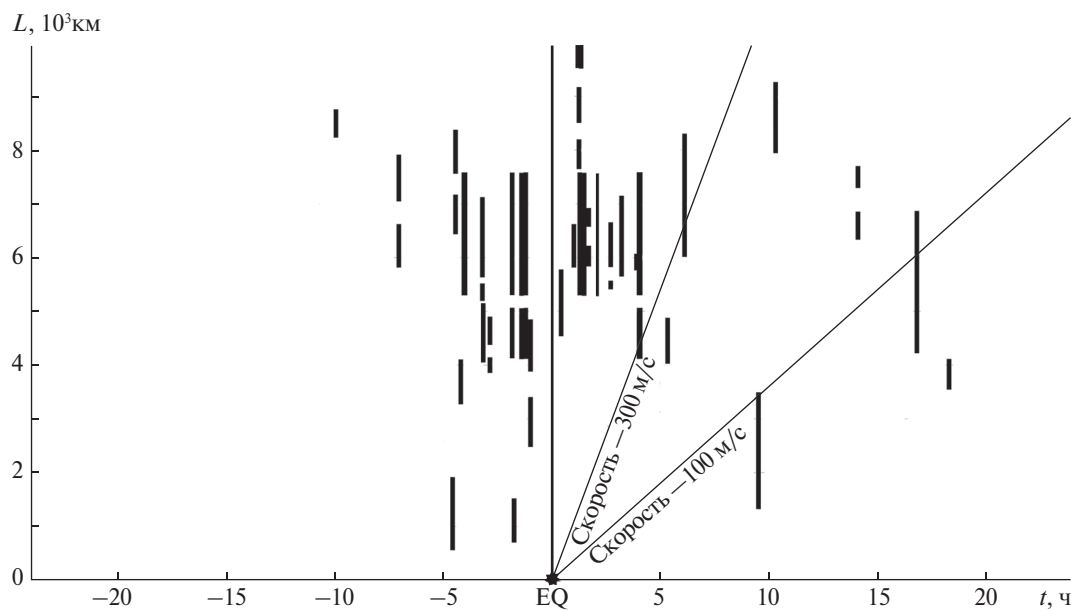


Рис. 14. Диаграмма причинно-следственных связей между землетрясениями и локализованными волновыми пакетами в спокойной зоне

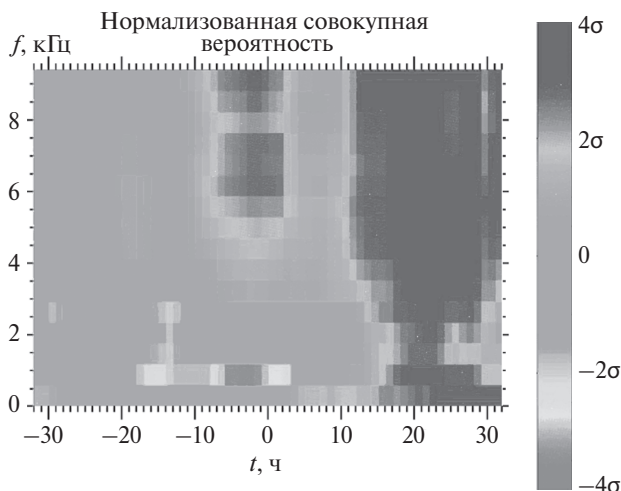


Рис. 15. Интенсивность широкополосного излучения (магнитная составляющая) относительно момента землетрясения (М. Parrot — частное сообщение)

ограничено условиями: магнитуда землетрясений $M > 5$, глубина гипоцентра — менее 40 км. Обратим внимание на область откликов, которая спустя десять часов после момента землетрясения заполняется широкополосным шумом. Можно указать единственный механизм воздействия на ионосферу, характеризующий таким временем запаздывания — распространения ГВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическая и экспериментальная картины воздействия на ионосферу ГВ от приземных источников (сейсмогенных, погодных, прочих), в целом согласуются между собой. Но в деталях обе картины требуют доработки и стыковки. Следует констатировать, что даже обладая всей информацией о готовящемся землетрясении (взятой хотя бы ретроспективно), мы не в состоянии удовлетворительно рассчитать характеристики его ионосферного предвестника. Тем более мы далеки от решения обратной задачи — по наблюдаемым параметрам ионосферных возмущений предсказать параметры будущего землетрясения.

На наш взгляд, дальнейшие усилия теоретиков в этой области должны сфокусироваться на анализе и математическом моделировании хорошо диагностированных сейсмоионосферных событий («case study» эталонных событий). А планировать будущие эксперименты необходимо с целью

верификации положений теории — их однозначного подтверждения или же опровержения. Иначе вновь и вновь будет открываться простор для творчества умозрительных гипотез, что в области изучения ионосферных предвестников землетрясений длится уже несколько десятков лет.

Очевидно, назрела необходимость реализации комбинированного наземно-космического эксперимента с синхронной регистрацией эффектов ГВ на поверхностном, атмосферном, ионосферном и магнитосферном высотных уровнях. Комплексы научной аппаратуры, устанавливаемые на спутниках, должны диагностировать не только электродинамические, но и газоплазменные параметры ионосферных возмущений, которые с борта спутника воспринимаются как стоячие образования с длиной волны 100...400 км и периодами 10...50 с. К сожалению, ни одна из планируемых в настоящее время космических миссий, по-видимому, не создаёт возможности для проведения всех необходимых измерений. Но бурное развитие кубсатов, резко удешевляющих стоимость их изготовления и запуска, даёт надежду на возможность подготовки и проведения международной командой исследователей соответствующего эксперимента.

Подводя итоги, можно заключить, что представление о ГВ как об агенте переноса возмущений от земных источников в ионосферу позволяет объяснить:

- транспортировку значительных потоков энергии, модифицирующих медианные значения параметров E - и F -областей ионосферы (в отличие от электромагнитных излучений и квазистационарных электрических полей);
- независимость интенсивности ионосферного возмущения от интенсивности его источника — как результат нелинейного ограничения увеличения ГВ с высотой;
- сдвиг ионосферного возмущения на тысячи километров в сторону от источника. Временное запаздывание ионосферного отклика от получения до более десяти часов;
- трансформацию волнового процесса в нейтральной атмосфере в вынужденные магнито-гидродинамические колебания ионосферной и магнитосферной плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бидлингмаер Е. Р., Погорельцев А. И. Численное моделирование трансформации акустико-гравитационных волн в температурные и вязкие волны в термосфере. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1992. **28**, № 1. С. 64—73.
2. Госсард Э., Хук У. *Волны в атмосфере*. М. Мир, 1978. 532 с.
3. Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А. Наблюдения со спутника электромагнитного излучения над эпицентральной областью готовящегося землетрясения. *Докл. АН СССР*. 1983. **268**, № 1. С. 56—58.
4. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (Обзор). *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1999. **42**, № 1. С. 1—23.
5. Денисенко В. В., Помозов Е. В. Проникновение электрического поля из приземного слоя атмосферы в ионосферу. *Солнечно-земная физика*. 2010. Вып. 16. С. 70—75.
7. Ларкина В. И., Наливайко А. В., Гершензон Н. И., Липеровский В. А., Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1983. **23**, № 5. С. 842—846.
8. Лизунов Г. В., Леонтьев А. Ю. Диапазоны спектров распространения АГВ в атмосфере земли. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2014. **54**, № 6. С. 834—841.
9. Лизунов Г. В., Скороход Т. В. О селекции волновых возмущений на фоне трендов в данных спутниковых наблюдений термосферы. *Космічна наука і технологія*. 2018. **24**, № 6. С. 57—68.
10. Мареев Е. А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи. *Успехи физ. наук*. 2010. **180**, № 5. С. 527—534.
11. Маров М. Я., Колесниченко А. В. *Введение в планетную аэронавигацию*. М. Наука, 1987. 456 с.
12. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера, инициируемых ионизацией. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. **55**, № 4. С. 1—19.
13. Ришбет Г., Гарриот О. К. *Введение в физику ионосферы*. Л. Гидрометеиздат, 1975. 304 с.
14. Скороход Т. В. *Внутрішні гравітаційні хвилі в термосфері за даними прямих супутникових спостережень*: дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Київ, 2018. 208 с.
15. Скороход Т. В., Лизунов Г. В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2012. **52**, № 1. С. 93—98.
16. Федоренко А. К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009. **14**, № 3. С. 254—265.
17. Федоренко А. К. Направления распространения акустико-гравитационных волн над полярными шапками Земли. *Космічна наука і технологія*. 2011. **17**, № 3. С. 34—44.
18. Френкель Я. И. *Теория явления атмосферного электричества*. Изд. 2-е, испр. М. КомКнига, 2007. 160 с.
19. Черногор Л. Ф. *Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. 544 с.
20. Черногор Л. Ф. Возможность генерации квазипериодических магнитных предвестников землетрясений. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2019. **59**, № 3. С. 1—9.
21. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2004. **9**, № 2. С. 130—151.
22. Astafyeva E. I., Afraimovich E. L. Long distance travelling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra' Andaman earthquake on 26 December 2004. *Earth and Planets Space*. 2006. **58** (8). P. 1025—1031.
23. Bliokh P. Variations of electric fields and currents in the lower ionosphere produced by conductivity growth of the air above the future earthquake center. *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. M. Hayakawa (ed.). TERRAPUB, Tokyo, 1999. P. 829—838.
24. Bullough K., Kaiser R., Strangeways H. J. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1985. **47**. P. 1211—1223.
25. Ding F., Wan W., Yuan H. The influence of background winds and attenuation on the propagation of the atmospheric gravity waves. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2003. **65**. P. 857—869.
26. Dudis J. J., Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.* 1976. **3**, № 12. P. 727—730.
27. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., Klimov S. Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1—60 Hz. *Geophys. Res. Lett.* 2015. **42**. doi:10.1002/2015GL064595.

28. Ferencz Cs., Lizunov G., and POPDAT team. Ionosphere Waves Service (IWS) — A problem-oriented tool in ionosphere and Space Weather research produced by POPDAT project. *J. Space Weather Space Clim.* 2014. **4**, № A17. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014013> (дата звернення: 24.06.2019).
29. Forbes J. M. Dynamics of the thermosphere. *J. Meteor. Soc. Jap.* 2007. **85B**. P. 193—213.
30. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1975. **37**. P. 1011—1054.
31. Fritts D. C., Lund T. X. Gravity Wave Influences in the Thermosphere and Ionosphere: Observations and Recent Modeling. *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series*. 2011. **2**. P. 109—130.
32. Gokhberg M. B., Nekrasov A. K., Shalimov S. L. A new approach to the problem of lithosphere-ionosphere coupling before the earthquake. In: *Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction*. M. Hayakawa and Y. Fujinawa (eds). TERRAPUB, Tokyo, 1994. P. 619—626.
33. Gross S. H., Reber C. A., Huang F. T. Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite. *Trans. Geosci. and Remote Sens.* 1984. **GE-22(4)**. P. 340—351.
34. Hedin A. E., Mayr H. G. Characteristics of Wavelike Fluctuations in Dynamics Explorer Neutral Composition Data. *J. Geophys. Res.* 1987. **92**, № A10. P. 11,159—11,172.
35. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.* 1960. **38**. P. 1441—1481.
36. Hines C. O. *The upper atmosphere in motion*. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1974.
37. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982—1995. *Ann. Geophys.* 1996. **14**. P. 917—940.
38. Holzworth R. H. Quasistatic Electromagnetic Phenomena in the Atmosphere and Ionosphere. CRC Handbook on Atmospherics. Volland H.(ed.). BocaRaton, FL: CRC press, 1995. P. 235—266.
39. Hooke W. H. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1968. **30**. P. 795—829.
40. Hooke W. H. The ionospheric response to internal gravity waves. 1. The F2 region response. *J. Geophys. Res.* 1970. **75**. P. 5535—5544.
41. Hooke W. H. Ionospheric response to internal gravity waves. 2. Lower F region response. *J. Geophys. Res.* 1970. **75**. P. 7229—7238.
42. Hooke W. H. Ionospheric response to internal gravity waves. 3. Changes in the densities of the different ion species. *J. Geophys. Res.* 1970. **75**. P. 7239—7243.
43. Innis J. L., Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data. *J. Geophys. Res.* 2002. **107**, № A12. P. 1418—1439. doi:10.1029/2002JA009370.
44. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., Coley W. R., Carignan G. R., Spencer N. W. Gravity waves near 300 km over the polar caps. *J. Geophys. Res.* 1995. **100**. P. 23,993—24,002.
45. Kato S. Dynamics of the upper atmosphere. *Developments of the Earth and Planetary Sciences*. Tokyo: Center for Academic Publications Japan, 1980.
46. Kato S. Thermosphere. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. Y. Kamide and A. C.-L. Chian (eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. P. 222—249. doi: 10.1007/b104478.
47. Kelley M. C. *The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press. Inc. Inter. Geophys. Ser. 1989. **43**. 485 p.
48. Kim V. P., Hegai V. V. A possible presage of strong earthquakes in the night-time mid-latitude F2 region ionosphere. *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. M. Hayakawa (ed.). TERRAPUB, Tokyo, 1999. P. 619—628.
49. Kim V. P., Liu J. Y., Hegai V. V. Modelling the pre-earthquake electrostatic effect on the F region ionosphere. *Adv. Space Res.* 2012. **50**. P. 1524—1533.
50. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Yu., Lizunov G. AGW as seismo-ionospheric coupling response. *Phys. Chem. of the Earth*. 2009. **34**. P. 485—495.
51. Li M., Parrot M. Statistical analysis of an ionospheric parameter as a base for earthquake prediction. *J. Geophys. Res.* 2013. **118**, № 6. P. 3731—3739. doi:10.1002/jgra.50313.
52. Lizunov G., Skorokhod T., Hayakawa M., Korepanov V. Formation of Ionospheric Precursors of Earthquakes — Probable Mechanism and Its Substantiation. *Open J. Earthquake Res.* 2020. **9**. P. 142—169. doi: 10.4236/ojer.2020.92009.
53. Makhlof U., Dewan E., Isler J. R., Tuan T. F. On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations. *J. Geophys. Res.* 1990. **95**. P. 4103—4111.

54. 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*, M. Hayakawa and O. A. Molchanov (eds). TERRAPUB, Tokyo, 2002. P. 335—342.
55. Nakamura T., Korepanov V., Kasahara Y., Hobara Y., Hayakawa M. An evidence on the lithosphere-ionosphere coupling in terms of atmospheric gravity waves on the basis of a combined analysis of surface pressure, ionospheric perturbations and ground-based ULF variations. *J. Atmos. Elec.* 2013. **33**, № 1. P. 53—68.
56. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. Heating of the Lower Ionosphere Electrons by Electromagnetic Radiation of Lightning Discharges. *Geophys. Res. Lett.* 1995. **22**, № 22. P. 3015—3018.
57. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Y. M., Figurski M. Efficient usage of dense GNSS networks in Central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors*. 2017. **17**, № 10. P. 2298.
58. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Ann. Geophys.* 1990. **8**. P. 135—145.
59. Parrot M., Zaslavski Y. Physical mechanisms of manmade influences on the magnetosphere. *Surv. Geophys.* 1996. **17**, № 1. P. 67—100.
60. Pogoreltsev A. I. Production of electromagnetic field disturbances due to the interaction between acoustic gravity waves and the ionospheric plasma. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1996. **58**, № 10. P. 1125—1141.
61. Potter W. E., Kayser D. C., Mauersberger K. Direct measurements of neutral wave characteristics in the thermosphere. *J. Geophys. Res.* 1976. **81**, № 28. P. 5002—5012.
62. Pulnits S. A., Boyarchuk K. A., Hegai V. V., Kim V. P., Lomonosov A. M. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling. *Adv. Space Res.* 2000. **26**, № 8. P. 1209—1218.
63. Rishbeth H. Ionoquakes: earthquake precursors in the ionosphere. *Eos*. 8 August 2006. **97**, № 2.
64. Roble R. G. The thermosphere. *The Upper Atmosphere and Magnetosphere*. Washington, D. C.: Nat. Acad. Sci., 1977. P. 57—71.
65. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*. 2011. **63**, № 7. P. 853—857.
66. Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2005. **67**, № 8-9. P. 821—828.
67. Row R. V., Mentzoni M. H. On D-region Electron Heating by a Low-Frequency Terrestrial Line Current With Ground Return. *Radio Sci.* 1972. **7**, № 11. P. 1061—1066.
68. Singh D., Singh R. P., Kamra A. K., Gupta P. N., Singh R., Gopalakrishnan V., Singh A. K. Review of electromagnetic coupling between the Earth's atmosphere and the space environment. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2005. **67**. P. 637—658.
69. Simões F., Pfaff R., Berthelier J.-J., Klenzing J. A review of low frequency Electromagnetic wave phenomena related to tropospheric-ionospheric coupling mechanisms. *Space Sci. Revs.* 2011. **168**. P. 1—43.
70. Tronin A. A. Satellite thermal survey application for earthquake prediction. *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. M. Hayakawa (ed.). TERRAPUB, Tokyo, 1999. P. 717—746.
71. Tronin A. A. Atmosphere-lithosphere coupling. Thermal anomalies on the Earth surface in seismic processes. *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. M. Hayakawa and O. A. Molchanov (eds). TERRAPUB, Tokyo, 2002. P. 173—176.
72. Vadas S. L., Fritts D. C. Thermospheric responses to gravity waves: influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *J. Geophys. Res.* 2005. **110**: D15103. doi:10.1029/2004JD005574.
73. Vadas S. L., Yue J., She Ch., Stamus P. A., Liu A. Z. A model study of the effects of winds on concentric rings of gravity waves from a convective plume near Fort Collins on 11 May 2004. *J. Geophys. Res.* 2009. **114**. D06103. doi: 10.1029/2008JD010753.
74. Walterscheid R. L., Hickey M. P. Group velocity and energy flux in the thermosphere: Limits on the validity of group velocity in a viscous atmosphere. *J. Geophys. Res.* 2011. **116**. D12101. P. 1—12. doi:10.1029/2010JD014987.
75. Yang S.-S., Asano T., Hayakawa M. Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. **124**. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JA026002> (дата звернення: 24.06.2019).
76. Yeh K. C., Liu C. H. Acoustic-gravity waves in upper atmosphere. *Revs Geophys. and Space Phys.* 1974. **12**, № 2. P. 193—216.

Стаття надійшла до редакції 24.06.2019

REFERENCES

1. Bidlingmaier E. R., Pogoreltsev A. I. (1992). Numerical simulation of the transformation of acoustic-gravity waves in temperature and viscous waves in the thermosphere. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Atmos. and Ocean Phys.*, **28**, № 1, 64–73 [in Russian].
2. Gossard E., Hooke W. (1975). *Waves in the atmosphere*. Elsevier scientific Publishing Company.
3. Gokhberg M. B., Pilipenko V. A., Pokhotelov O. A. (1983). Satellite observations of electromagnetic radiation over the epicenter area of the impending earthquake. *Rep. Acad. Sci. USSR*, **268**(1), 56–58 [in Russian].
4. Grigor'ev G. I. (1999). Acoustic-gravity waves in the Earth atmosphere (Review). *University News Radio Phys.*, **42**, № 1, 1–23 [in Russian].
5. Denisenko V. V., Pomozov E. V. (2010). Penetration of the electric field from the surface layer of the atmosphere into the ionosphere. *Solar-terr. phys.*, № 16, 70–75 [in Russian].
6. Lighthill J. (1978). *Waves in fluids*. (2nd Editi.). Cambridge Mathematical Library.
7. Larkina V. I., Nalyvayko A. V., Gershenzon N. I., Liperovsky V. A., Gokhberg M. B., Shalimov S. L. (1983). Observations on the Interkosmos-19 satellite of VLF emissions associated with seismic activity. *Geomagnetism and aeronomy*, **23**(5), 842–846 [in Russian].
8. Lizunov G. V., Leontyev A. Yu. (2014). Spectral ranges of AGV in the atmosphere of the earth. *Geomagnetism and aeronomy*, **54**(6), 834–841 [in Russian].
9. Lizunov G. V., Skorokhod T. V. (2018). On the selection of wave disturbances against the background of trends in satellite observations of the thermosphere. *Space sci. and technol.*, **24**, № 6, 57–68 [in Russian].
10. Mareev E. A. (2010). Achievements and prospects of research of the global electrical circuit. *Successes phys. sci.*, **180**(5), 527–534 [in Russian].
11. Marov M. Ya., Kolesnichenko A. V. (1987). *Introduction to planetary aeronomy*. M.: Nauka.
12. Pul'nets S. A., Uzunov D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. (2015). Physical basis of the generation of short-term earthquake precursors. A complex model of geophysical processes in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system initiated by ionization. *Geomagnetism and aeronomy*, **55**, № 4, 1–19 [in Russian].
13. Rishbeth H., Garriott O. K. (1969). Introduction to ionospheric physics. *Inter. Geophys.* **14**, 331 p.
14. Skorokhod T. V. (2018). *Internal gravity waves in the thermosphere according to direct satellite measurements*. Thesis for scientific degree of Candidate of physical and mathematical sciences. Kyiv: Space Research Institute of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine [in Ukrainian].
15. Skorokhod T. V., Lizunov G. V. (2012). Localized packets of acoustic-gravity waves in the ionosphere. *Geomagnetism and aeronomy*, **52**, № 1, 93–98 [in Russian].
16. Fedorenko A. K. (2009). Characteristics of atmospheric gravity characteristics in polar regions on the basis of mass spectrometric satellite spectra. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **14**, № 3, 254–265 [in Ukrainian].
17. Fedorenko A. K. (2011). Propagation directions of acoustic-gravity waves above the Earth polar caps. *Space sci. and technol.*, **17** (3), 254–265 [in Russian].
18. Frenkel Ya. I. (2007). *Theory of the phenomenon of atmospheric electricity*. (2nd Edition, rev.). M.: KomKniga [in Russian].
19. Chernogor L. F. (2014). *Physics of powerful radio emission in geocosmos: monograph*. Kh.: KhNU named V. N. Karazin. [in Russian].
20. Chernogor L. F. (2019). The possibility of generating quasi-periodic magnetic earthquake precursors. *Geomagnetism and aeronomy*, **59**, № 3, 1–9 [in Russian].
21. Yampolsky Yu. M., Zalizovsky A. V., Litvinenko L. N., Lizunov G. V., Groves K., Moldvin M. (2004). Variations of the magnetic field in the Antarctic and the conjugate region (New England), stimulated by cyclonic activity. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **9**, № 2, 130–151 [in Russian].
22. Astafyeva E. I., Afraimovich E. L. (2006). Long distance travelling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra' Andaman earthquake on 26 December 2004. *Earth and Planets Space*, **58** (8), 1025–1031.
23. Bliokh P. (1999). Variations of electric fields and currents in the lower ionosphere produced by conductivity growth of the air above the future earthquake center. *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. M. Hayakawa (ed.). TERRAPUB, Tokyo, 829–838.
24. Bullough K., Kaiser R., Strangeways, H. J. (1985). Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere. *J. Atmos. and Terr. Phys.*, **47**, 1211–1223.
25. Ding F., Wan W., Yuan H. (2003). The influence of background winds and attenuation on the propagation of the atmospheric gravity waves. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, **65**, 857–869.
26. Dudis J. J., Reber C. A. (1976). Composition effects in thermospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, **3**, № 12, 727–730.

27. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., Klimov S. (2015). Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1–60 Hz. *Geophys. Res. Lett.* **42**. doi:10.1002/2015GL064595.
28. Ferencz Cs., Lizunov G., and POPDAT team. (2014). Ionosphere Waves Service (IWS) — A problem-oriented tool in ionosphere and Space Weather research produced by POPDAT project. *J. Space Weather Space Clim.* **4**, № A17. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014013> (дата звернення: 24.06.2019).
29. Forbes J. M. (2007). Dynamics of the thermosphere. *J. Meteor. Soc. Jap.*, **85B**, 193–213.
30. Francis S. H. (1975). Global propagation of atmospheric gravity waves: a review. *J. Atmos. and Terr. Phys.*, **37**, 1011–1054.
31. Fritts D. C., Lund T. X. (2011). Gravity Wave Influences in the Thermosphere and Ionosphere: Observations and Recent Modeling. *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series.* **2**, 109–130.
32. Gokhberg M. B., Nekrasov A. K., Shalimov S. L. (1994). A new approach to the problem of lithosphere-ionosphere coupling before the earthquake. *Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction*. M. Hayakawa and Y. Fujinawa (eds). TERRAPUB, Tokyo, 619–626.
33. Gross S. H., Reber C. A., Huang F. T. (1984). Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite. *Trans. Geosci. and Remote Sens.*, **GE-22**(4), 340–351.
34. Hedin A. E., Mayr H. G. (1987). Characteristics of wavelike fluctuations in dynamics explorer neutral composition data. *J. Geophys. Res.*, **92**, № A10, 11,159–11,172.
35. Hines C. O. (1960). Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, **38**, 1441–1481.
36. Hines C.O. (1974). *The upper atmosphere in motion*. Washington, D.C.: American Geophysical Union.
37. Hocke K., Schlegel K. (1996). A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.*, **14**, 917–940.
38. Holzworth R. H. (1995). Quasistatic Electromagnetic Phenomena in the Atmosphere and Ionosphere (Ed. H. Volland). CRC Handbook on Atmospherics, BocaRaton, FL: CRC press, 235–266.
39. Hooke W. H. (1968). Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. and Terr. Phys.*, **30**, 795–829.
40. Hooke W. H. (1970). The ionospheric response to internal gravity waves. 1. The F2 region response. *J. Geophys. Res.*, **75**, 5535–5544.
41. Hooke W. H. (1970). Ionospheric response to internal gravity waves. 2. Lower F region response. *J. Geophys. Res.*, **75**, 7229–7238.
42. Hooke W. H. (1970). Ionospheric response to internal gravity waves. 3. Changes in the densities of the different ion species. *J. Geophys. Res.*, **75**, 7239–7243.
43. Innis J. L., Conde M. (2002). Characterization of acoustic–gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data. *J. Geophys. Res.*, **107**, № A12, 1418–1439. doi:10.1029/2002JA009370.
44. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., Coley W. R., Carignan G. R., Spencer N. W. (1995). Gravity waves near 300 km over the polar caps. *J. Geophys. Res.*, **100**, 23,993–24,002.
45. Kato S. (1980). Dynamics of the upper atmosphere. *Developments of the Earth and Planetary Sciences*. Tokyo: Center for Acad. Publ. Japan.
46. Kato S. (2007). Thermosphere. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. Y. Kamide and A. C.-L. Chian (eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/b104478.
47. Kelley M. C. (1989). *The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press. Inc. Inter. Geophys. Ser., **43**.
48. Kim V. P., Hegai V. V. (1999). A possible presage of strong earthquakes in the night-time mid-latitude F2 region ionosphere. *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. M. Hayakawa (ed). TERRAPUB, Tokyo.
49. Kim V. P., Liu J.Y., Hegai V. V. (2012). Modelling the pre-earthquake electrostatic effect on the F region ionosphere. *Adv. in Space Res.*, **50**, 1524–1533.
50. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Yu., Lizunov G. (2009). AGW as seismo-ionospheric coupling response. *Phys. Chem. of the Earth*, **34**, 485–495.
51. Li M., Parrot M. (2013). Statistical analysis of an ionospheric parameter as a base for earthquake prediction. *J. Geophys. Res.*, **118**, № 6, 3731–3739. doi:10.1002/jgra.50313.
52. Lizunov G., Skorokhod T., Hayakawa M., Korepanov V. (2020). Formation of Ionospheric Precursors of Earthquakes — Probable Mechanism and Its Substantiation. *Open J. Earthquake Res.*, **9**, 142–169. doi: 10.4236/ojer.2020.92009.

53. Makhlof U., Dewan E., Isler J. R., Tuan T. F. (1990). On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations. *J. Geophys. Res.*, **95**, 4103–4111.
54. Mareev E. A., Iudin D. I., Molchanov O. A. (2002). Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity. *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. M. Hayakawa and O. A. Molchanov (eds). TERRA-PUB, Tokyo.
55. Nakamura T., Korepanov V., Kasahara Y., Hobara Y., Hayakawa M. (2013). An evidence on the lithosphere-ionosphere coupling in terms of atmospheric gravity waves on the basis of a combined analysis of surface pressure, ionospheric perturbations and ground-based ULF variations. *J. Atmos. Elec.*, **33**, № 1, 53–68.
56. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. (1995). Heating of the Lower Ionosphere Electrons by Electromagnetic Radiation of Lightning Discharges. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, № 22, 3015–3018.
57. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Y. M., Figurski M. (2017). Efficient usage of dense GNSS networks in Central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors*, **17**, № 10, 2298.
58. Parrot M. (1990). World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Ann. Geophys.*, **8**, 135–145.
59. Parrot M., Zaslavski Y. (1996). Physical mechanisms of manmade influences on the magnetosphere. *Surv. in Geophys.*, **17**, № 1, 67–100.
60. Pogoreltsev A. I. (1996). Production of electromagnetic field disturbances due to the interaction between acoustic gravity waves and the ionospheric plasma. *J. Atmos. and Terr. Phys.*, **58**, № 10, 1125–1141.
61. Potter W. E., Kayser D. C., Mauersberger K. (1976). Direct measurements of neutral wave characteristics in the thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **81**, № 28, 5002–5012.
62. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A., Hegai V. V., Kim V. P., Lomonosov A. M. (2000). Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling. *Adv. Space Res.*, **26**, № 8, 1209–1218.
63. Rishbeth H. (2006). Ionoquakes: earthquake precursors in the ionosphere. *Eos*. 8 August **97**, № 2.
64. Roble R. G. (1977). The thermosphere. *The Upper Atmosphere and Magnetosphere*. Washington, D.C.: Nat. Acad. Sci., 57–71.
65. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. (2011). The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, № 7, 853–857.
66. Rothkaehl H., Parrot M. (2005). Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, **67**, № 8-9, 821–828.
67. Row R. V., Mentzoni M. H. (1972). On D-region Electron Heating by a Low-Frequency Terrestrial Line Current With Ground Return. *Radio Sci.*, **7**, № 11, 1061–1066.
68. Siingh D., Singh R. P., Kamra A. K., Gupta P. N., Singh R., Gopalakrishnan V., Singh A. K. (2005). Review of electromagnetic coupling between the Earth's atmosphere and the space environment. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, **67**, 637–658.
69. Simões F., Pfaff R., Berthelier J.-J., Klenzing J. (2011). A review of low frequency Electromagnetic wave phenomena related to tropospheric-ionospheric coupling mechanisms. *Space Sci. Revs*, **168**, 1–43.
70. Tronin A. A. (1999). Satellite thermal survey application for earthquake prediction. In: *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. M. Hayakawa (ed.). TERRAPUB, Tokyo.
71. Tronin A. A. (2002). Atmosphere-lithosphere coupling. Thermal anomalies on the Earth surface in seismic processes. In: *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, M. Hayakawa and O. A. Molchanov (eds), TERRA-PUB, Tokyo.
72. Vadas S. L., Fritts D. C. (2005). Thermospheric responses to gravity waves: influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *J. Geophys. Res.*, **110**, D15103. doi:10.1029/2004JD005574.
73. Vadas S. L., Yue J., She Ch., Stamus P. A., Liu A. Z. (2009). A model study of the effects of winds on concentric rings of gravity waves from a convective plume near Fort Collins on 11 May 2004. *J. Geophys. Res.*, **114**, D06103. doi: 10.1029/2008JD010753.
74. Walterscheid R. L., Hickey M. P. (2011). Group velocity and energy flux in the thermosphere: Limits on the validity of group velocity in a viscous atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **116**, D12101, 1–12. doi:10.1029/2010JD014987.
75. Yang S.-S., Asano T., Hayakawa M. (2019). Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **124**. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JA026002> (дата звернення: 24.06.2019).
76. Yeh K. C., Liu C. H. (1974). Acoustic-gravity waves in upper atmosphere. *Revs Geophys. and Space Phys.*, **12**, № 2, 193–216.

Received 24.06.2019

Г. В. Лізунов¹

зав. лаб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: georgii.lizunov@gmail.com

Т. В. Скороход²

співроб. докторантури кафедри фізики, канд. фіз.-мат. наук

E-mail: tetianaskorokhod1983@gmail.com

В. Є. Корепанов³

заст. директора, д-р техн. наук

E-mail: vakor@isr.lviv.ua

¹ Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України

Проспект Академіка Глушкова 40, корп. 4/1, Київ, Україна, 03187

² Університет Арієль, Ізраїль

³ Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України і ДКА України

вул. Наукова 5А, Львів, Україна, 79060

АТМОСФЕРНІ ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ СЕРЕД ФІЗИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ СЕЙСМОІОНОСФЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ

У роботі привертається увага наукової спільноти до атмосферних гравітаційних хвиль (ГХ) як найбільш ймовірного механізму перенесення енергії від приземних шарів атмосфери на космічні висоти та охарактеризувати сформований таким чином канал сейсмоіоносферного зв'язку. Обговорюються кілька основних механізмів впливу на іоносферу знизу: поширення низькочастотних електромагнітних випромінювань; замикання через іоносферу електричних струмів; проникнення хвиль нейтральної атмосфери. Основна частина роботи присвячена аналізу теоретичних та експериментальних відомостей про ГХ. Виписані прості аналітичні вирази, що дозволяють розрахувати параметри ГХ в конкретних експериментальних умовах. Аналізуються теоретичні та експериментальні дані, що стосуються власне ГХ. Приведено прості аналітичні вирази для розрахунку параметрів ГХ у конкретних експериментальних умовах. Аналізуються специфіка дисперсійних властивостей ГХ та особливостей їхнього поширення, досліджено процеси амплітудного підсилення та дисипації ГХ з висотою, описано механізм генерації електромагнітних збурень при перетині ГХ динамо-шару та визначено кількісні характеристики магнітодинамічних збурень іоносфери. В експериментальній частині аналізується глобальний розподіл ГХ на іоносферних висотах за даними супутника DE-2 та виконано статистичний аналіз зв'язку ГХ із землетрусами. Результати DE-2 підсилено порівнянням з раніше опублікованими даними місії DEMETER.

Ключові слова: атмосферна гравітаційна хвиля, землетрус, сейсмоіоносферний зв'язок, термосфера, іоносфера.

*G. V. Lizunov*¹

Head of laboratory, Cand. Sci. in Phys. & Math.

E-mail: georgii.lizunov@gmail.com

*T. V. Skorokhod*²

Assistant of Doctorate, Department of Physics, Cand. Sci. in Phys. & Math.

E-mail: tetianaskorokhod1983@gmail.com

*V. Ye. Korepanov*³

Deputy Director, Dr. Sci. in Tech.

E-mail: vakor@isr.lviv.ua

¹Space Research Institute of NASU and SSAU

40 Akademika Hlushkova Ave, building 4/1, Kyiv, 03187, Ukraine

²Ariel University, Israel

³Lviv Center of Space Research Institute of NASU and SSAU

5A Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine

ATMOSPHERIC GRAVITY WAVES AMONG OTHER PHYSICAL MECHANISMS OF SEISMIC-IONOSPHERIC COUPLING

We present a comparison of several basic mechanisms of influence on the ionosphere from below discussed in the literature: the propagation of low-frequency electromagnetic radiation; the short circuits of electric currents through the ionosphere; the penetration of neutral atmosphere waves. It is shown that atmospheric gravity waves (GW) are the most likely candidate for the role of a carrier of seismic-ionospheric interaction, which allows one to explain (i) the transport of significant energy fluxes into the ionosphere, (ii) the weak dependence of the intensity of ionospheric disturbance on the magnitude of the earthquake, (iii) the shift of ionospheric disturbances per thousand kilometers horizontally relative to the earthquake; (iv) and the generation of an ionospheric electromagnetic response. A detailed review of the theoretical and experimental data on GW is given. Simple analytical expressions are written that allow one to calculate the parameters of GW in specific experimental situations. The processes of amplitude amplification and dissipation of GW with height are investigated, the mechanism of generation of electromagnetic perturbations when GW passes the dynamo-layer is described, and the quantitative characteristics of perturbations are determined. The experimental part of the work presents the study of GW global distribution at ionospheric heights according to DE-2 satellite data and statistical analysis of GW relations with earthquakes. The results of the DE-2 are backed up by comparison with the published data from the DEMETER mission.

Keywords: atmosphere gravity wave, earthquake, seismic-ionospheric coupling, thermosphere, ionosphere.