
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА МАГНИТОСФЕРЫ И ЛИТОСФЕРЫ: ВОЗМОЖНОСТИ ВЗАИМОДОПОЛНЕНИЯ

MAGNETOTELLURIC SOUNDING AND ELECTROMAGNETIC DIAGNOSTICS OF THE MAGNETOSPHERE AND LITHOSPHERE: POSSIBILITIES OF COMPLEMENTARITY

В.А. Пилипенко 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru*

Е.Н. Федоров 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, enfedorov1@yandex.ru*

Д.В. Зинкин

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, zinkin.deniz@yandex.ru*

V.A. Pilipenko

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru*

E.N. Fedorov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, enfedorov1@yandex.ru*

D.V. Zinkin

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, zinkin.deniz@yandex.ru*

Аннотация. Наблюдения ультранизкочастотных (УНЧ) вариаций геомагнитного и электротеллурического полей на сети наземных станций является экспериментальной основой нескольких геофизических направлений: магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) земной коры; гидромагнитная диагностика околоземной плазмы; электромагнитный мониторинг динамических процессов в литосфере. В предлагаемом обзоре будут продемонстрированы возможности взаимного влияния этих, казалось бы, разнородных направлений. Магнитосферные резонансные эффекты могут вызывать искажения кривой МТЗ над слабопроводящими слоями вблизи локальной резонансной частоты, что может быть неверно истолковано как особенность структуры земной коры. С другой стороны, возможен новый метод гидромагнитной диагностики, использующий как магнитные, так и электрические компоненты вариаций УНЧ-поля, который дает возможность по данным одного пункта наблюдения определить широтный ход резонансной частоты. При поиске электромагнитных предвестников землетрясений можно воспользоваться возможностью разделения магнитосферных и сейсмогенных возмущений, опираясь на то обстоятельство, что для ионосферных источников кажущийся импеданс совпадает с поверхностным импедансом Земли, а импеданс возмущений, создаваемых литосферным источником, на порядок его превышает. До сих пор вызывает споры важный для МТЗ вопрос наличия электрической моды в поле падающих на земную поверхность геомагнитных пульсаций. Разработанная в физике МГД-волн модель взаимодействия альфвеновской волны с ионосферой показывает слабое возбуждение электрической моды. Генерация искусственных УНЧ-сигналов с использованием линий электропередачи в качестве горизонтальной излучающей мега-антенны дает возможность проведения МТЗ на большой площади.

Ключевые слова: УНЧ-волны, магнитотеллурическое зондирование, диагностика магнитосферы, электромагнитный прогноз землетрясений, активные эксперименты.

Abstract. Observations of ultra-low-frequency (ULF) variations in geomagnetic and electrotelluric fields at a network of ground stations are the experimental basis for several geophysical areas: magnetotelluric sounding (MTS) of the earth's crust; hydromagnetic diagnostics of the near-Earth plasma; electromagnetic monitoring of dynamic processes in the lithosphere. The proposed review will demonstrate the possibilities of mutual influence of these seemingly dissimilar areas. Magnetospheric resonance effects can cause distortions of the MTS curve over low-conductive layers near the local resonance frequency, which can be misinterpreted as a feature of the earth's crust structure. On the other hand, a new method of hydromagnetic diagnostics may be adopted that uses both magnetic and electric components of ULF field variations, which can determine the latitudinal variation of the resonance frequency based on data from one observation site. When searching for electromagnetic precursors of earthquakes, we can take an opportunity to separate magnetospheric and seismogenic disturbances, relying on the fact that for ionospheric sources the apparent impedance coincides with the surface impedance of the earth, but the impedance of disturbances created by a lithospheric source exceeds it by an order of magnitude. The question about the presence of an electric mode in the field of geomagnetic pulsations incident on the earth's surface, which is important for MTS sounding, is still controversial. The model of interaction between the Alfvén wave and the ionosphere developed in physics of MHD waves shows a weak excitation of the electric mode. The generation of artificial ULF signals by power lines as a horizontal radiating mega-antenna makes it possible to conduct MTS over a large area.

Keywords: ULF waves, magnetotelluric sounding, magnetosphere diagnostics, electromagnetic earthquake forecasting, active experiments.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения ультранизкочастотных (УНЧ) вариаций в диапазоне от долей герц до первых миллигерц геомагнитного и электротеллурического полей на сети наземных станций является экспериментальной основой нескольких геофизических направлений:

- магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) проводимости поверхностных слоев земной коры [Kaufman, Keller, 1981];
- гидромагнитная диагностика околоземной плазмы по спектральным особенностям УНЧ-волн [Menk, Waters, 2013];
- электромагнитный мониторинг динамических процессов в области сейсмических очагов землетрясений [Nauyaka et al., 2007].

Эти направления практически не связаны друг с другом, и специалисты из этих областей почти не взаимодействуют между собой. В предлагаемом обзоре будут продемонстрированы возможности взаимного влияния этих направлений и то, чем эти, казалось бы, разнородные подходы могут быть полезны друг другу. Во введении мы кратко обозначим круг рассматриваемых проблем.

Существующие модели магнитотеллурики не учитывают резонансных особенностей пространственной структуры УНЧ-волнового поля, обусловленных трансформацией МГД-волн в магнитосфере, и предполагают, что поле геомагнитных пульсаций однородно, по крайней мере, на масштабах скин-длины (модель плоской волны) [Ваньян, Бутковская, 1980]. Вследствие этого особенности, обусловленные резонансными эффектами, могут быть ошибочно интерпретированы как некие структуры в земной коре [Pilipenko, Fedorov, 1993].

Теоретическая модель резонансной трансформации внемагнитосферных МГД-возмущений в альфвеновские колебания магнитных силовых линий во внутренней магнитосфере предсказывает сингулярное поведение волнового поля вблизи резонансной магнитной оболочки [Kivelson, Southwood, 1986]. Таким образом, спектральный состав УНЧ-сигналов должен сильно зависеть от распределения плазмы в магнитосфере, что позволяет использовать наземные наблюдения УНЧ-пульсаций для гидромагнитной диагностики околоземной плазмы [Пилипенко и др., 2024a]. Для корректной гидромагнитной диагностики нужны взаимодополняющие методы оперативного определения распределения резонансных частот в заданном регионе. Основная проблема их экспериментального определения заключается в том, что вклады в спектральный состав УНЧ-пульсаций от резонансного магнитосферного отклика и от источника колебаний сопоставимы (рис. 1). Поэтому наблюдаемый спектральный пик не обязательно соответствует локальной резонансной частоте, а ширина спектрального пика не может быть напрямую использована для определения добротности магнитосферного резонатора. Эту неоднозначность удалось разрешить с помощью градиентного метода, при котором измерения градиентов спектральной амплитуды и фазы на малой базе позволяют исключить влияние формы спектра источника и выявить даже относи-



Рис. 1. Качественное представление спектра УНЧ-поля как комбинации спектра источника и отклика магнитосферного резонанса. Сигнал источника связан с возмущением, переносимым крупномасштабной магнитозвуковой волной, а резонансный отклик магнитосферы на частоте f_R вызван локализованным откликом резонансных альфвеновских колебаний

тельно слабые резонансные эффекты [Baransky et al., 1985]. Выделение локальной резонансной частоты, т. е. собственной частоты альфвеновских колебаний магнитных силовых линий, возможно даже при неизвестных параметрах источника пульсаций [Пилипенко и др., 1988]. Градиентный метод [Kurchashov et al., 1987] и его модификации [Гульельми, 1992] позволяют оценить резонансную частоту силовой линии между станциями и ширину резонансного пика. Несмотря на кажущуюся простоту одномерной модели трансформации МГД-волны в магнитосфере [Southwood, 1974], теоретическая предсказанная амплитудно-фазовая меридиональная структура хорошо соответствует наблюдаемой локальной структуре УНЧ-волн. Область возникновения альфвеновских резонансов простирается от субавроральных широт до довольно низких широт [Green et al., 1993]. Разная чувствительность различных компонент УНЧ-поля к магнитосферному альфвеновскому резонансу подсказывает, что резонансная частота может быть извлечена не только из пространственной структуры, но и из его поляризационных свойств [Baransky et al., 1990; Vellante et al., 1993]. Резонансный отклик магнитосферы характеризуется выраженной асимметрией горизонтальных компонент B_x и B_y , так что отношение $|B_x(f)/B_y(f)|$ выделяет максимум на резонансной частоте. Оказалось, что на основе фазово-амплитудных соотношений между магнитными и электрическими компонентами геомагнитных пульсаций может быть построен новый метод диагностики альфвеновских частот (т. е. по существу плотности магнитосферной плазмы) на заданной широте [Guglielmi, 1989].

Одной из актуальных проблем современной геофизики является разработка физических основ оперативного прогноза землетрясений на основе аномальных возмущений электромагнитных полей. Представляется перспективным мониторинг широкополосных УНЧ-излучений и импульсов, источником которых могут быть динамические процессы в очагах землетрясений [Гульельми, Левшенко, 1994;

Freund et al., 2021]. При подвижках горной среды по разломам при активизации сейсмической активности возможно формирование крупномасштабных токовых систем [Гохберг и др., 1985]. В результате такие подвижки можно было бы отслеживать путем регистрации УНЧ-импульсов и шумов на земной поверхности [Лосева и др., 2010]. Однако остается нерешенной проблема разделения магнитосферных и сейсмогенных возмущений. Результаты расчетов УНЧ-поля на земной поверхности, создаваемого подземным током, показывают его характерные особенности по сравнению с полем ионосферных возмущений, что можно было бы использовать для дискриминации эндогенных источников [Александров и др., 2018].

Электромагнитные волны в атмосфере между нижней ионосферой и поверхностью Земли можно разложить на магнитную Н-моду (поперечную электрическую ТЕ) и электрическую Е-моду (поперечную магнитную ТН). Каждая мода имеет свой парциальный импеданс, характеризующий ее взаимодействие с земной корой. Проблема существования Е-моды имеет ключевое значение для основ МТЗ. Рассматривая падающее поле УНЧ-пульсаций как суперпозицию частных Е- и Н-мод, Четаевым [1985] был разработан новый метод МТЗ — дирекционный анализ. Этот метод основан на предположении, что пространственная структура УНЧ-пульсаций над высокоомной корой не соответствует приближению плоской волны и должна моделироваться как горизонтально распространяющаяся неоднородная плоская волна с комплексным волновым вектором [Четаев, 1985; Бердичевский, Дмитриев, 1992]. Согласно этой концепции, Е-мода в атмосфере, несущая большее вертикальное электрическое поле E_z , является частью первичной волны. В связи с этим возможность возбуждения E_z в атмосфере в УНЧ-диапазоне магнитосферными источниками имеет принципиальное значение для применимости МТЗ и дирекционного анализа.

Поскольку электромагнитные возмущения УНЧ-диапазона широко используются для МТЗ земной коры, возникает предположение о возможности генерации искусственных сигналов для этой цели. Однако давно предлагаемый метод возбуждения Рс1-сигналов с помощью модулированного радионагрева ионосферы требует колоссальных затрат и привязан к нагревному стенду. Не может ли наземная антенна использоваться для возбуждения искусственных Рс1-пульсаций? Но какой-либо заметной эффективности излучения УНЧ-КНЧ-диапазона можно ожидать только для чрезвычайно крупномасштабных излучающих систем. Такие УНЧ-КНЧ-мега-антенны действительно существуют — это обширная мировая сеть линий электропередачи (ЛЭП). Отключенную от магистральной сети ЛЭП действительно можно использовать как контролируемый источник УНЧ/КНЧ-излучений [Беляев и др., 2002; Ермакова и др., 2005; Ermakova et al., 2006]. Генерируемые ЛЭП искусственные сигналы делают возможным проведение МТЗ на громадной территории. Такие эксперименты начались в Китае для мониторинга проводимости поверхностных слоев земной коры

с использованием сигналов от крупномасштабных установок CSELF (Control Source Extremely Low Frequency) [Zhao et al., 2015] и WEM (Wireless Electromagnetic Method) [Su et al., 2012].

Далее в обзоре на конкретных примерах мы рассмотрим перечисленные выше направления.

1. РЕЗОНАНСНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ СТРУКТУРЫ УНЧ-ПОЛЯ

Исследования по физике УНЧ-волн в околоземной среде показали, что МГД-возмущения из удаленных частей магнитосферы (например, возмущения солнечного ветра, поверхностные волны на магнитопаузе, турбулентность магнитослоя и т. д.) распространяются внутрь магнитосферы и посредством трансформации мод возбуждают стоячие альфвеновские колебания силовых линий магнитного поля. По существу, в магнитосфере работает гигантский природный МГД-мазер, который накачивается внемагнитосферными возмущениями, и резонансно генерирует на выходе узкополосные альфвеновские волны. Эти волны, проходящие через полупрозрачные «зеркала» МГД-мазера — сопряженные ионосферы, — в большинстве случаев и являются источниками квазимонохроматических геомагнитных пульсаций диапазона Рс3-5, наблюдаемых на Земле. Процесс трансформации мод наиболее эффективен вблизи резонансных геомагнитных оболочек, где локальная собственная частота $f_R(x)$ альфвеновских колебаний силовых линий совпадает с частотой f внешнего источника. Математическое описание пространственной структуры возмущения поля в магнитосфере вблизи резонансных оболочек согласно качественной теории дифференциальных уравнений может быть выражено в виде асимптотического разложения по параметру $x - x_R(f) + i\delta_m$, где x — координата магнитной оболочки; $x_R(f)$ — точка альфвеновского резонанса, в которой $f = f_R(x)$; δ_m — ширина резонансной области над ионосферой [Крылов и др., 1981]. Главный член в асимптотическом выражении, описывающий резонансную особенность азимутальной компоненты $B_y(x, f)$ в магнитосфере, может быть представлен в виде

$$B_y^{(m)}(x, f) = B_0(f) \frac{i\delta_m}{x - x_R(f) + i\delta_m}. \quad (1)$$

Из-за диссипации частоты собственных колебаний имеют мнимую добавку $\omega_A = 2\pi f_R \rightarrow \omega_A - i\gamma$, где $\gamma > 0$. Ширина резонанса δ_m связана с декрементом затухания γ соотношением $\delta_m = -\gamma(\partial_x \omega_A)^{-1}$, т. е. знак δ_m определяется знаком градиента альфвеновской частоты. Поскольку во всей магнитосфере (кроме плазмопаузы) $\partial_x \omega_A < 0$, то $\delta_m > 0$. Исходя из (1), широтную структуру УНЧ-поля можно качественно представить как комбинацию спектра источника $B_0(f)$ и отклика магнитосферного резонанса (см. рис. 1). Сигнал источника связан с возмущением, переносимым крупномасштабной магнитозвуковой волной, и слабо зависит от координаты x . Резонансный от-

клик магнитосферы сильно локализован и вызывает резкие изменения амплитуды и фазы азимутальной компоненты B_y при пересечении резонансной оболочки. Радиальная компонента B_x имеет более слабую логарифмическую особенность, поэтому резонансное поведение этой компоненты едва заметно.

При прохождении через ионосферу пространственная структура УНЧ-волн искажается. Это искажение можно аналитически описать для альфвеновской волны с пространственной структурой (1), проходящей через «тонкую» ионосферу над бесконечно проводящей Землей [Alperovich, Fedorov, 2007]. Приближение тонкой ионосферы предполагает, что вертикальный масштаб волны много больше толщины проводящего Е-слоя ионосферы (~20 км). В асимптотическом случае азимутально-крупномасштабных волн $k_y \ll k_x$ теория приводит к простому выводу: колебания после прохождения через ионосферу сохраняют ту же пространственную форму с учетом двух факторов: а) происходит вращение эллипса поляризации на $\pi/2$: $B_y^{(m)} \Rightarrow B_x$ (СЮ-компонента у земли), $B_x^{(m)} \Rightarrow B_y$ (ВЗ-компонента у земли); б) ширина резонансного пика на земле уширяется по сравнению с шириной пика над ионосферой, $\delta = \delta_m + h$, где h — высота проводящего Е-слоя ионосферы (~100 км).

2. РЕЗОНАНСНАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ И МТЗ

Горизонтальные компоненты магнитотеллурического поля $\mathbf{E}_t = (E_x, E_y)$ и $\mathbf{B}_t = (B_x, B_y)$, регистрируемые на земной поверхности, связаны импедансным условием. Поверхностный импеданс Z , в свою очередь, определяется распределением проводимости земной коры σ по глубине z . Магнитотеллурическая задача состоит в измерении $Z(\omega)$ и восстановлении зависимости $\sigma(z)$ из параметрической зависимости импеданса от частоты ω . Физической основой МТЗ является модель Тихонова—Каньяра, характеризующая электромагнитное УНЧ-поле над горизонтально однородной земной корой импедансом, совпадающим с импедансом Z_g плоской вертикально падающей волны [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. В этом случае импедансное соотношение сводится к предельно простому виду

$$\mathbf{E}_t = - \left(\frac{Z_g}{\mu_0} \right) [\mathbf{n} \times \mathbf{B}_t], \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость свободного пространства; \mathbf{n} — направленный вниз вектор нормали к поверхности Земли. Граничное условие (2) известно в теории распространения радиоволн как приближение сильного скин-эффекта. Если поле однородно или линейно на горизонтальном масштабе, который больше глубины скин-слоя $\delta_g = (2/(\mu_0 \omega \sigma))^{1/2}$ (т. е. $k \delta_g \ll 1$, где k — горизонтальный волновой вектор возмущения), можно использовать соотношение (2). Когда условие применимости сильного скин-эффекта нарушается, кажущийся импеданс определяется не только геоэлектрическими свойствами подстила-

ющей коры, но и пространственной структурой падающей УНЧ-волны [Бердичевский, Дмитриев, 1992]. Для резонансной структуры пульсаций справедливость приближения сильного скин-эффекта сводится к неравенству

$$|k_g \delta| \gg 1,$$

где $k_g = (i\mu_0 \sigma \omega)^{1/2} = (1+i)\delta_g^{-1}$, — волновой вектор в земной коре.

Для иллюстрации возможного искажения структуры поля падающей волны при разных геоэлектрических условиях приведем результаты моделирования, основанного на аналитических результатах по прохождению плоской падающей альфвеновской волны через тонкую ионосферу [Pilipenko, Fedorov, 1993]. Пространственная структура падающей волны (1) разлагается на спектральные гармоники $B(k_x, k_y)$ с пространственными параметрами k_x, k_y . Импедансное условие для отдельной гармоники волны на поверхности Земли аналитически вычисляется с помощью рекуррентной формулы для N однородных слоев [Wait, 1982]. Полные поля $\mathbf{B}(x, y)$ и $\mathbf{E}(x, y)$ получаются путем интегрирования вкладов всех гармоник. Для дневных условий выбранные интегральные проводимости Педерсена и Холла ионосферы составляют $\Sigma_P = 10$ Ом, $\Sigma_H = 15$ Ом. Для типичного значения альфвеновской скорости в магнитосфере $V_A = 800$ км/с, волновая проводимость магнитосферы $\Sigma_A = (\mu_0 V_A)^{-1} = 1$ Ом намного ниже проводимости ионосферы. Предполагается, что высота тонкой ионосферы $h = 100$ км, ширина резонанса над ионосферой $\delta_m = 50$ км, период колебаний $T = 100$ с.

В качестве отправной точки рассмотрим многокомпонентную амплитудно-фазовую структуру поля на средних широтах (геомагнитная широта $\Phi = 55^\circ$) в окрестности резонанса над хорошо проводящей землей с удельным сопротивлением $\rho = 10$ Ом·м (рис. 2, а). Горизонтальные компоненты B_x и E_y имеют локальный максимум в резонансной точке ($x=0$). При движении вдоль меридиана от $x=500$ км до $x=-500$ км горизонтальные компоненты B_x и E_y испытывают скачок фазы несколько меньший π . Вблизи точки резонанса $x=0$ вертикальная магнитная компонента B_z имеет в два раза более крутой градиент, чем горизонтальная компонента B_x . Фазовый сдвиг между компонентами B_z и E_y изменяется от $\sim \pi/2$ до $\sim -\pi/2$ по разные стороны резонансного пика, а в точке резонанса эти компоненты находятся в фазе. Над низкоомной средой амплитудно-фазовые соотношения между E_y и B_x соответствуют теоретическому выражению для импеданса плоской волны над однородным полупространством $Z_g = \sqrt{-i\omega\mu_0/\sigma_g}$ или $|Z_g|^2 = \omega\mu_0\rho$ (рис. 3, а).

Затем рассмотрим искажения волновой структуры над высокоомной землей ($\rho = 10^4$ Ом·м), где нарушается условие сильного скин-эффекта (см. рис. 2, б), так как $|k_g \delta| \sim 0.4$. В этом случае вертикальная магнитная компонента становится сравнимой с горизонтальной, $B_z \sim B_x$. Меридиональное распределение

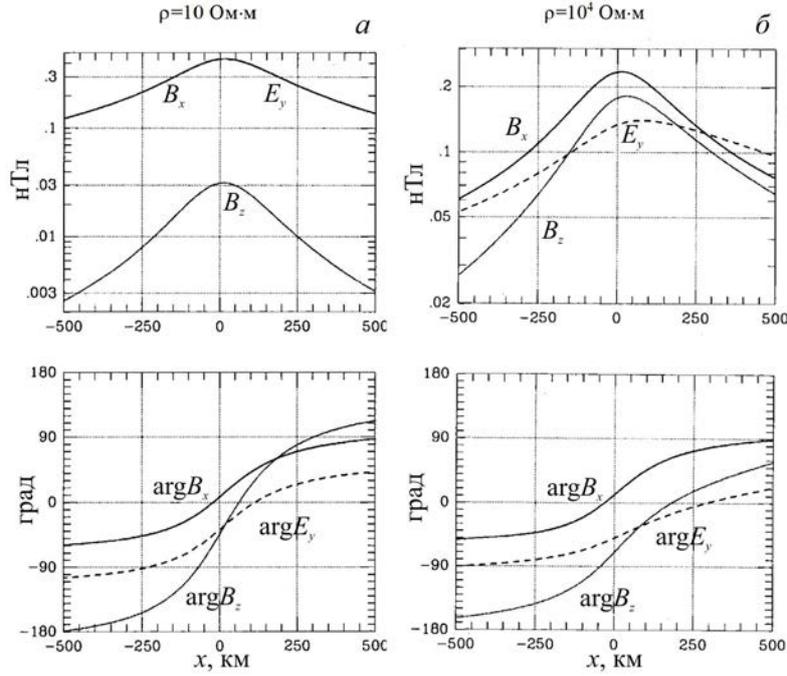


Рис. 2. Пространственная амплитудно-фазовая структура в меридиональном направлении вблизи резонансной оболочки $x=0$ над высокопроводящей корой с удельным сопротивлением $\rho=10$ Ом·м (а) и над низкопроводящей средой с $\rho=10^4$ Ом·м (б). Падающая альфвеновская волна имеет амплитуду $B_y=1$ нТл. Электрическая компонента E_y нормирована на Z_g . Соответствующая фазовая структура показана на нижней панели

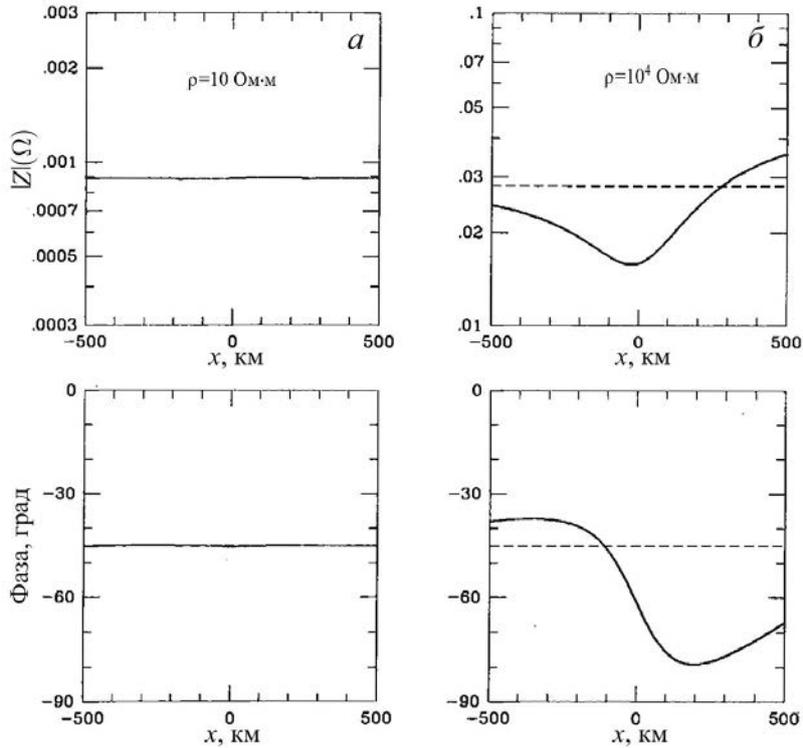


Рис. 3. Амплитуда (вверху) и фаза кажущегося импеданса Z над высокопроводящей землей с $\rho=10$ Ом·м (а) и низкопроводящей землей с $\rho=10^4$ Ом·м (б). Горизонтальной штриховой линией показан импеданс Земли $Z_g \sim 8.9 \cdot 10^{-4}$ Ом и $Z_g \sim 2.8 \cdot 10^{-2}$ Ом соответственно

амплитуд и фаз искажается, причем это искажение различно для магнитной и электрической компонент. Искажения амплитудно-фазовых профилей B_x и E_y приводят к искажению профиля кажущегося импеданса $Z(x)=\mu_0 E_y(x)/B_x(x)$. Над высокоомной средой

искажения амплитуды и фазы Z достигают 50 % от импеданса $Z_g=2.8 \cdot 10^{-2}$ Ом (см. рис. 3, б). Таким образом, магнитосферные резонансные эффекты могут вызывать искажения стандартной кривой МТЗ вблизи локальной резонансной частоты, что может

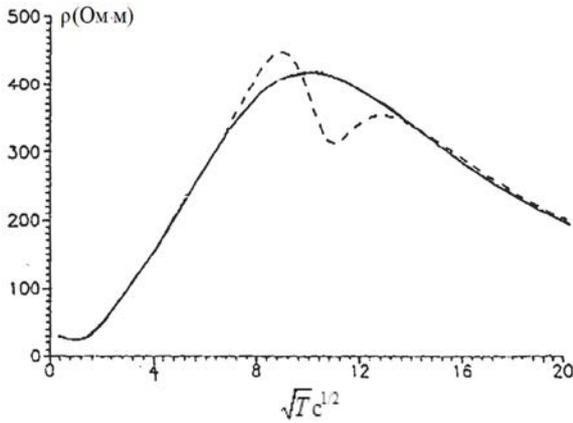


Рис. 4. Кривая МТЗ $\rho(\sqrt{T})$ для 4-слояного разреза,

рассчитанная для падающей альфвеновской волны с резонансной пространственной структурой с $T=100$ с и $\delta_m=20$ км

быть неверно истолковано как некая особенность структуры земной коры [Pilipenko et al., 1998].

Искажение кривых МТЗ резонансными эффектами особенно заметно над слабопроводящими слоями. Пример кривой МТЗ $\rho(T)$ для 4-слояного разреза на широте 60° из [Альперович и др., 1991] показан на рис. 4. Параметры разреза сопротивление [Ом·м] / мощность [кВт] таковы: $30/3, 3 \cdot 10^3/50, 3 \cdot 10^2/50, 3 \cdot 10^{-2}/\infty$. Резонансная волновая структура с $T=100$ с имеет полуширину над ионосферой $\delta_m=20$ км. Сплошной линией показана кривая МТЗ в приближении плоской волны, штриховой — кривая МТЗ, формируемая резонансной волновой структурой. Отклонение реальной кривой от приближения плоской волны достигает $\sim 30\%$.

Описываемые эффекты проявились при глобальном МТЗ территории США с использованием более 1000 временных станций с пространственным шагом 70 км. При анализе кривых МТЗ было обнаружено, что в значительном количестве полученных кривых ($>15\%$) появились нефизичные «бугры» в области частот 10–100 с [Murphy, Egbert, 2018]. Эти искажения связаны с резонансными эффектами в структуре среднеширотных Pc3-4-пульсаций.

3. МЕТОДЫ ГИДРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ДАННЫХ МТЗ

Данные МТЗ, включающие записи магнитных и электрических компонент УНЧ-поля, могут быть использованы для применения новых методов гидромагнитной диагностики распределения магнитосферной плазмы [Гульельми, 1989]. Таким образом, гидромагнитная диагностика может быть обогащена за счет использования данных по теллурическому электрическому полю.

Вертикальная компонента магнитного УНЧ-поля B_z является чувствительным индикатором неоднородностей как самого поля, так и проводимости земной коры [Southwood, Hughes, 1978]. Таким образом, использование данных B_z может быть перспективным для выявления резонансных особенностей простран-

ственной структуры геомагнитных пульсаций [Грин и др., 1991]. Соотношение между вертикальной и горизонтальной магнитными компонентами УНЧ-поля можно оценить в случае сильного скин-эффекта, используя соотношение [Wait, 1982]

$$B_z = i(\mu_0 \omega)^{-1} (Z_g \operatorname{div} \mathbf{B}_t + \mathbf{B}_t \nabla Z_g), \quad (3)$$

где div — 2D-оператор дивергенции в горизонтальной плоскости. Для пульсаций Pc3-5 в регионах с горизонтально-однородной проводимостью земной коры меридиональный градиент $\partial B_x / \partial x$ является доминирующим членом в правой части (3). Используя форму (1) резонансной структуры, получаем

$$B_z = -\frac{Z_g}{\mu_0 \omega \delta} \frac{B_x}{1 - i\xi}, \quad (4)$$

где $\xi = [x - x_R(f)] / \delta$. Как следует из (4), резонансные эффекты в поведении вертикальной компоненты B_z могут быть даже более выраженными, чем в горизонтальной компоненте B_x . Комплексное значение поверхностного импеданса Z_g в (4) можно исключить из рассмотрения с помощью импедансного соотношения (2). Тогда связь между B_z и E_y имеет вид

$$\frac{B_z}{E_y} = \frac{1}{\omega \delta (1 - i\xi)} \quad (5)$$

На частоте альфвеновского резонанса ($\xi=0$) отношение спектральных плотностей мощности $|B_z(f)/E_y(f)|$ должно иметь локальный максимум, а сами B_z и E_y должны быть синфазны. Это предсказание аналитической оценки подтверждается численной моделью (рис. 5).

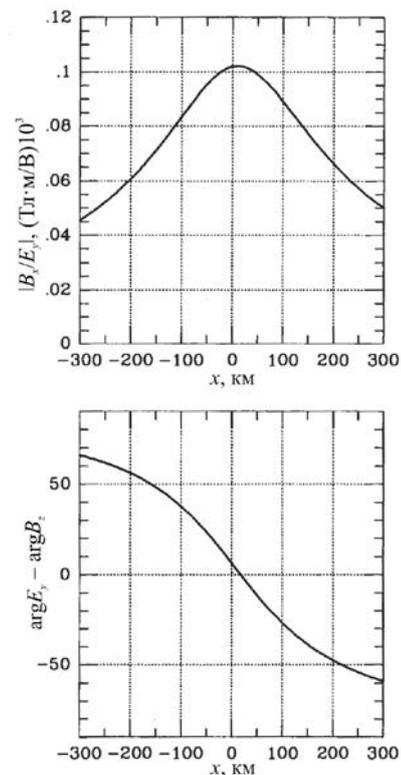


Рис. 5. Соотношение амплитуд компонент B_z и E_y на различных расстояниях от резонансной силовой линии (а) и фаза между ними над земной корой с удельным сопротивлением $\rho=10$ Ом·м (б)

На основе свойств вертикальной магнитной и горизонтальной электрической компонент УНЧ-поля можно предложить дополнительный метод гидромагнитной диагностики магнитосферы. С его помощью можно восстановить функциональную зависимость $f_R(x)$ в окрестности точки наблюдения по данным одной станции [Гульельми и др., 1989]. Расстояние между точкой наблюдения x и резонансной оболочкой $x_R(f)$, а также ширину резонанса δ можно определить из (5) как

$$\begin{aligned} x - x_R &= -\omega^{-1} |E_y / B_z| \sin \psi, \\ \delta &= \omega^{-1} |E_y / B_z| \cos \psi, \end{aligned} \tag{6}$$

где $\psi = \arg E_y - \arg B_z$ — разность фаз между компонентами. Соотношения (6) позволяют использовать многокомпонентные данные одного пункта для определения расстояния до резонансной силовой линии на заданной частоте. Изменяя на обратную зависимость $x_R(f) \Leftrightarrow f_R(x)$, можно определить широтный ход резонансной частоты $f_R(x)$ в окрестности точки наблюдения.

4. ПОИСК ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРНОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ МТЗ-МЕТОДОВ

Не затухает интерес к изучению аномальных сигналов в диапазоне УНЧ, предположительно связанных с землетрясениями. Амплитуда возможных электромагнитных возмущений, вызванных сейсмической активностью, по-видимому, невелика. Поэтому для уверенной дискриминации сейсмогенных возмущений необходима разработка специальных методов регистрации и анализа данных. Для выделения характерных особенностей сейсмического аномального излучения необходимо смоделировать пространственную структуру поля на земной поверхности, создаваемого подземным излучателем. Разработана модель, позволяющая численно рассчитывать УНЧ-поля от подземного линейного тока конечной длины во всей системе земля—атмосфера [Pilipenko et al., 2024]. Модель основана на математическом формализме, разработанном Федоровым и др. [2022] для горизонтально-слоистых сред. Механо-электрические преобразования в земной коре генерируют вдоль разлома переменный линейный ток J_0 конечной длины L , расположенный на глубине $z = -h$ (рис. 6). Ток источника замыкается токами проводимости в земной коре и частично просачивается в атмосферу. Эта система осциллирующих токов создает электромагнитное поле в атмосфере и земной коре, которое и определяется с помощью численной модели.

Расчет пространственной структуры поля показывает параметр, который можно использовать для разделения магнитосферных и сейсмогенных возмущений по комбинированным электрическим и магнитным данным — соотношение между кажущимся импедансом (отношение спектральных амплитуд горизонтальных электрической и магнитной компонент $\mu_0 |E|/|B|$) и импедансом поверхности Земли Z_g [Мазур

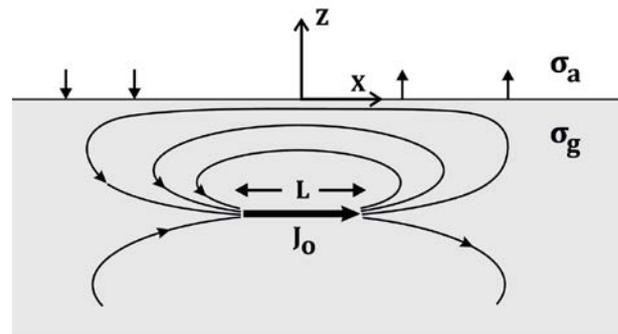


Рис. 6. Модель осциллирующего линейного тока длины L расположенного на глубине $z = -h$ под поверхностью Земли и направленного вдоль оси x . Механо-электрические преобразования в земной коре генерируют заданный ток J_0 , который затем замыкается токами проводимости в земной коре и частично просачивается в атмосферу

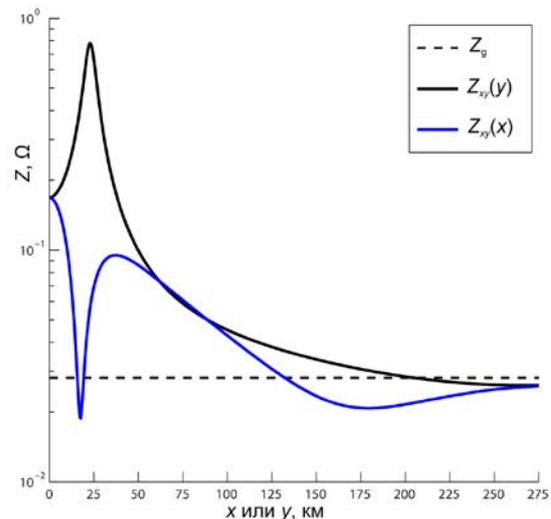


Рис. 7. Кажущийся импеданс сейсмогенных возмущений $Z_{xy} = \mu_0 E_x / B_y$ на частоте 0.1 Гц, рассчитанный по модельным значениям магнитного и электротеллурического полей в направлении вдоль (голубая кривая) и поперек (черная кривая) тока J_0

и др., 2024]. Кажущийся импеданс сейсмогенных возмущений на частоте 0.1 Гц, рассчитанный по модельным значениям магнитного и электротеллурического полей $Z_{xy} = \mu_0 E_x / B_y$, представлен на рис. 7.

Для магнитосферно-ионосферных источников кажущийся импеданс регистрируемых возмущений для всех реальных условий совпадает с Z_g . Напротив, для подземного источника импеданс наземного отклика почти на порядок превышает импеданс Земли. Таким образом, мониторинг мгновенных значений импеданса возмущений при синхронных электротеллурических и геомагнитных наблюдениях позволил бы эффективно выделить возмущения от сейсмогенных источников.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДА ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ И МТЗ

Многочисленные попытки обнаружить синхронные УНЧ-пульсации геомагнитного поля и атмосферного электрического поля E_z дали противоречивые результаты. С одной стороны, многокомпонент-

ные магнитные и теллурические наблюдения дали, казалось бы, многообещающие результаты, подтверждающие существование Е-моды [Савин, Израильский, 2016]. Вывод о возникновении больших E_z в электрической моде представлялся в [Зыбин и др., 1974] как естественное следствие горизонтального распространения электромагнитных мод в волноводе Земля—ионосфера. УНЧ-поле в атмосфере локально можно аппроксимировать как неоднородную плоскую волну с горизонтальным волновым вектором \mathbf{k} . В этом приближении должна появиться вертикальная составляющая E_z , связанная с величиной горизонтальной магнитной компоненты B_{\perp} следующим образом: $E_z = k / (\omega \epsilon_0) B_{\perp}$. Для обычно наблюдаемой горизонтальной фазовой скорости пульсаций Pc3-5 $\omega/k \sim 20$ км/с пульсации с амплитудой магнитной составляющей $B_{\perp} = 1$ нТл должны нести возмущение $E_z \sim 60$ В/м. Шестикомпонентные измерения в скважине на низкоомных породах ($\rho = 10 \div 100$ Ом·м) уверенно регистрировали $E_z \sim 0.01$ мВ/м в поле Pc3-пульсаций (10–100 с) [Савин и др., 1991]. Измерения той же аппаратурой над породами, составленными из системы вертикальных проводящих трещин (дайков), дали в среднем аномально большую величину $E_z \sim 1$ мВ/м при горизонтальных компонентах $H_x \sim 5 \cdot 10^2$ мА/м и $E_y \sim 0.7$ мВ/м. Составляющая E_z в воздухе оценивалась по непрерывности вертикального тока J_z на границе раздела земная кора — воздух $E_z^{(air)} = (\sigma_g / \omega \epsilon_0) E_z^{(ground)}$. Согласно этой оценке, для $\sigma_g \sim 10^{-4}$ См/м и $\omega \sim 0.01$ с $^{-1}$ E_z в воздухе должна составлять несколько десятков В/м. Однако в этих исследованиях использовались измерения вертикального теллурического поля в скважинах. Поэтому неясно, действительно ли отклик в E_z на геомагнитные пульсации был вызван падающей Е-модой или возникал в земной коре из-за неоднородностей проводимости?

С другой стороны, Анисимов и др. [1993] не обнаружили систематических пульсаций в атмосферном поле E_z , когерентных с геомагнитными пульсациями Pc3 на средних широтах. Хотя согласие волновых форм не наблюдалось в эксперименте [Бандилет и др., 1980], события с одновременной активизацией вариаций $E_z \sim 10$ В/м и геомагнитных пульсаций и общностью спектрального состава были интерпретированы как возбуждение пульсаций E_z магнитосферным источником. Редкие события с квазипериодическими изменениями E_z , возможно, были результатом переноса ветром пространственно-неоднородных аэроэлектрических структур.

Убедительный ответ на вопрос об эффективности возбуждения электрической моды магнитосферными источниками мог бы быть получен в физике МГД-волн в космической плазме, где рассматривалась проблема взаимодействия альфвеновских волн с многослойной системой ионосфера—атмосфера—Земля [Alperovich, Fedorov, 2007]. На основе этой теории в [Pilipenko et al., 2021] разработана численная модель электромагнитного УНЧ-отклика на падение альфвеновского возмущения из магнитосферы. Модель численно решает систему связанных волновых уравнений для реалистичной ионосферы и атмосферы

и позволяет количественно рассчитать, какой величины поле E_z можно ожидать для разных типов геомагнитных возмущений. Геомагнитное поле \mathbf{B}_0 на высоких широтах можно считать вертикальным. Поскольку задача азимутально-симметричная, используется цилиндрическая система координат $\{z, \rho\}$ с $\rho = 0$ на оси токовой трубки. На границе атмосфера—Земля накладывается импедансное граничное условие $E_{\phi} / B_{\rho} = E_{\rho} / B_{\phi} = Z_g / \mu_0$. Параметры ионосферной столкновительной плазмы были восстановлены с использованием модели IRI [http://iramodel.org]. Параметры IRI были выбраны соответствующими полночи на авроральной широте. Вертикальный профиль проводимости атмосферы моделируется экспоненциальной зависимостью $\sigma_A(z) = \sigma_0 \exp(z/\alpha)$, которая сшивается с проводимостью из модели IRI при $z = 80$ км, приземная проводимость $\sigma_0 = 10^{-14}$ См/м. Комплексная проводимость атмосферы, включающая ток смещения, определяется выражением $\sigma(z) = \sigma_A(z) - i\epsilon\epsilon_0\omega$, где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Очевидно, что на малых высотах $\sigma(z)$ определяется током смещения, а на больших — током проводимости. Рассчитано горизонтальное распределение шести компонент электромагнитного поля, включая вертикальное электрическое поле в атмосфере, возбуждаемое падающей альфвеновской волной.

Магнитная мода в атмосфере возбуждается ионосферными токами Холла. Эти вихревые токи вызывают магнитный отклик в радиальном направлении, т. е. в компоненте B_{ρ} . Электрическая мода в атмосфере связана с вертикальным током, который создает магнитное возмущение в азимутальной компоненте B_{ϕ} . Таким образом, компоненты B_{ρ} и E_{ϕ} связаны с Н-модой, а компоненты B_{ϕ} and E_{ρ} — с Е-модой. Вертикальная электрическая составляющая E_z , связанная с Е-модой, имеет максимум под источником при $\rho = 0$ (рис. 8). На расстояниях до $\sim 10^3$ км величина E_z спадает очень медленно, но резко падает на удалениях $> 10^3$ км. Для более низкой частоты падение начинается раньше.

Численное моделирование показало, что возбуждение Е-моды магнитосферными источниками очень

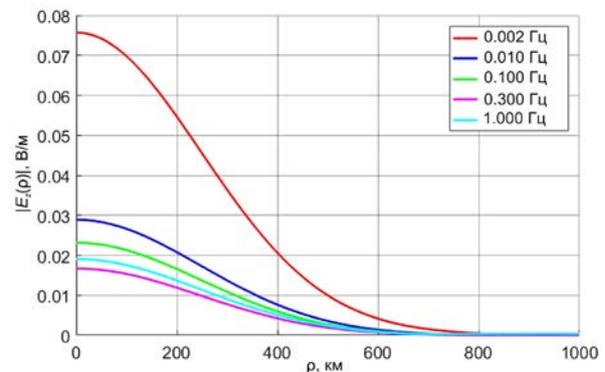


Рис. 8. Горизонтальное распределение вертикального электрического поля $E_z(\rho)$ в атмосфере, возбуждаемого падающей альфвеновской волной с различными частотами. Амплитуды всех компонент поля нормируются таким образом, чтобы получить единичное магнитное возмущение на земле $B_{\rho}(z=0) = 1$ нТл в области пространственного максимума $\rho = \rho_{max}$. Проводимость однородной земли принимается равной $\sigma_g = 10^{-4}$ См/м

слабое и эта мода практически не дает вклада в магнитное поле УНЧ-пульсаций на земной поверхности. Вклад E-моды в горизонтальное теллурическое поле, индуцируемое УНЧ-пульсациями, также незначителен. В наиболее благоприятной ситуации крупномасштабное интенсивное (~100 нТл) геомагнитное возмущение могло бы вызвать лишь слабое E_z -возмущение порядка нескольких В/м. Поэтому предположение дирекционного анализа [Четаев, 1985; Зыбин и др., 1974; Савин, Израильский, 2016] о возникновении E-моды в поле падающей УНЧ-волны не подтверждается представлениями о магнитосферных источниках геомагнитных пульсаций. Однако математический формализм, развитый в рамках дирекционного анализа, может быть применен для МТЗ в СНЧ-диапазоне (например, резонанс Шумана) или для МТЗ с использованием искусственных сигналов от мега-антенн.

6. МТЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ УНЧ-СИГНАЛОВ

УНЧ-волны в герцовом диапазоне частот (пульсации Pc1) имеют особое значение для космической физики. Благодаря резонансному взаимодействию волна — частица, электромагнитные ионно-циклотронные волны диапазона Pc1 могут вызывать высыпание релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу и таким образом снижать уровень потоков электронов-убийц до безопасного для спутниковой электроники. Поэтому в космической физике даже возникла идея возбуждать искусственно электромагнитные волны диапазона Pc1 с помощью модулированного радионагрева ионосферы [Guo et al., 2021]. В первых экспериментах на стенде СУРА при модулированном облучении дневной ионосферы удалось обнаружить возбуждение магнитных пульсаций на частоте модуляции 3 Гц с амплитудой порядка нескольких нанотесла в 100 км от передатчика [Гетманцев и др., 1977]. Предположительно нагрев E-слоя приводит к вариациям частоты столкновения электронов, от которой зависит проводимость столкновительной плазмы ионосферы, так что в области нагрева возникает периодическая модуляция ионосферного тока, возбуждающего геомагнитные пульсации. Модулированный нагрев F-области также может генерировать ионосферные токи, которые действуют как антенна для инъекции волн Pc1 в ионосферный волновод. Волновой отклик на частоте модуляции F-слоя был обнаружен наземными магнитометрами в окрестности нагревного стенда [Eliasson et al., 2012; Котик и др., 2013]. Возбуждаемые искусственные сигналы с заданной частотой можно было бы использовать для МТЗ земной коры в области работы нагревного стенда. Однако существует более эффективный и гораздо более дешевый метод возбуждения искусственных УНЧ-сигналов, который можно реализовать практически в любом районе.

На Кольском полуострове проводятся эксперименты FENICS (Fennoscandian Electrical conductivity from soundings with the Natural and Controlled Sources) с управляемыми источниками электромаг-

нитных полей УНЧ/КНЧ-диапазонов с использованием ЛЭП в качестве горизонтальной излучающей антенны [Велихов и др., 1994; Жамалетдинов и др., 2015]. Основные задачи экспериментов заключались в изучении особенностей распространения УНЧ-КНЧ электромагнитных сигналов в волноводе Земля — ионосфера. В период с 25 июля по 8 августа 2024 г. в два этапа проводился очередной эксперимент FENICS-2024 [Пилипенко и др., 2025].

➤ На первом этапе использовалась линия Выходной — Оленегорск (VKH—OLE) с длиной 95.6 км и расстоянием между заземлителями подстанций $L=84$ км.

➤ На втором этапе использовалась линия Выходной — Никель (VKH—NIK) с длиной 205 км и расстоянием между заземлителями подстанций $L=130$ км.

В ходе эксперимента генератор мощностью 200 кВт создавал в ЛЭП переменный ток ~140–150 А на низких частотах (1–10 Гц) до ~40 А на самых высоких (194 Гц), который подавался в ночные часы по расписанию 15-минутных сеансов. Временное отключение одной линии не сказывалось на электроснабжении потребителей, так как передача электроэнергии шла через остальные участки магистральной сети.

Для изучения особенностей распространения УНЧ-сигналов наблюдения горизонтальных компонент магнитного поля проводились на нескольких магнитных станциях с высокочувствительной аппаратурой (рис. 9):

➤ радиоастрономическая обсерватория «Старая Пустынь» (PUS), удаленная от узловой подстанции VKH на $R\sim 1560$ км;

➤ станция «Исток» (IST) в ~100 км к северу от Норильска, удаленная от VKH на $R\sim 2100$ км;

➤ геофизическая станция «Ловозеро» (LOZ), удаленная от центра излучающей линии на $R\sim 185$ км;

➤ гидрометеорологическая обсерватория «Баренцбург» (BRB), удаленная на $R\sim 1130$ км.

Излучаемые ЛЭП искусственные сигналы на относительно близких станциях LOZ и BRB намного

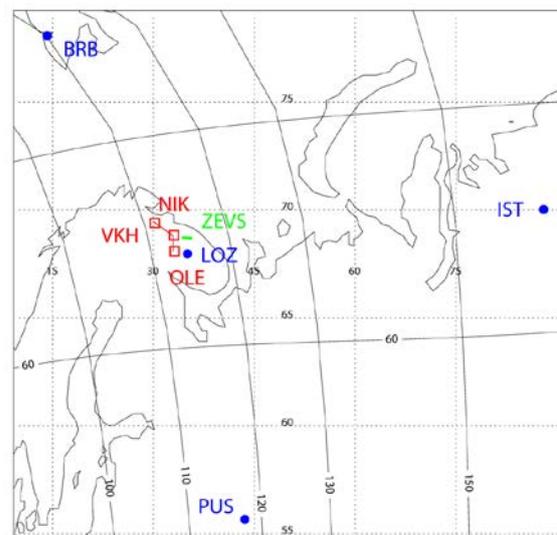


Рис. 9. Карта с положением подстанций ЛЭП (красные квадраты) и магнитных станций (синие точки) (см. также [Пилипенко и др., 2025])

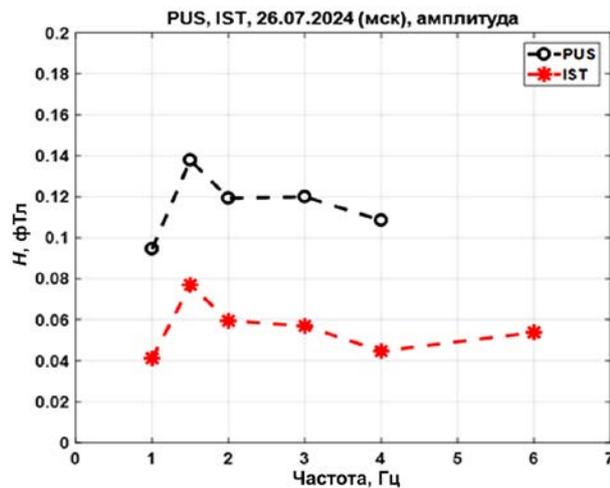


Рис. 10. Нормированные амплитуды искусственных Pc1-сигналов (H -компонента) на разных частотах на станции PUS ($R \sim 1560$ км) и на станции IST ($R \sim 2100$ км): 0.6 ± 0.2 и 0.3 ± 0.05 фТл/А

превышали интенсивность природных пульсаций Pc1-диапазона. Даже на удаленных станциях PUS и IST спектры показывали слабые, но заметные пики, соответствующие появлению искусственных гармонических излучений в соответствующих сеансах. На станции PUS на частотах 1–4 Гц нормированные амплитуды сигналов во всех сеансах составляли 0.6 ± 0.2 фТл/А. На станции IST нормированные амплитуды регистрируемых сигналов в среднем составили 0.3 ± 0.05 фТл/А. Амплитуда искусственных сигналов быстро спадала на небольшом удалении (< 300 км) от излучателя, но на больших удалениях спадание шло довольно медленно. Так, амплитуды искусственных Pc1-сигналов на частотах 1–4 Гц на удалении $R \sim 1560$ км в среднем превышают амплитуду на удалении $R \sim 2100$ км всего в два раза (рис. 10).

Результаты проведения экспериментов FENICS показали, что отключенные от магистрали ЛЭП можно использовать в качестве контролируемого источника УНЧ-волн. В эксперименте FENICS-2024 искусственные сигналы в диапазоне частот 1–6 Гц были обнаружены на расстоянии > 2000 км. Такое дальнейшее распространение никогда не наблюдалось при экспериментах по ионосферному радионагреву. Таким образом, установка типа FENICS может быть значительно более дешевой и эффективной альтернативой радионагревным методам возбуждения искусственных излучений [Пилипенко и др., 20246], позволяющих проводить МТЗ практически в любом регионе.

Однако следует учитывать отличие искусственных сигналов от природных УНЧ-пульсаций. Если в природных пульсациях, возбуждаемых ионосферными токами, преобладает магнитная мода, то в структуру искусственных сигналов, возбуждаемых горизонтальной антенной, дают вклад как магнитная, так и электрическая моды. Над высокоомными породами (типа гранитов на Кольском п-ове) поверхностные импедансы этих мод различаются, и для корректного МТЗ надо применять метод дирекционного анализа, позволяющий разделять вклады электрической и магнитной мод [Четаев, 1985].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существуют далеко не исчерпанные перспективы взаимного обогащения методов МТЗ проводимости поверхностных слоев земной коры и гидромагнитной диагностики околосредней плазмы по спектральным особенностям УНЧ-волн. Наличие резонансной структуры поля геомагнитных пульсаций приводит к искажению кривой МТЗ на резонансных частотах, особенно над высокоомными породами. Чтобы оценить «опасные» для МТЗ частоты, необходимо предварительное определение распределения резонансных частот для изучаемого региона методами гидромагнитной диагностики. С другой стороны, можно предложить дополнительный метод гидромагнитной диагностики, который использует данные МТЗ-станций. Используя этот метод, можно по данным в одной точке определить широтный ход резонансной частоты в конечной области. Методы МТЗ могут оказаться полезными при поиске электромагнитных предвестников землетрясений для разделения магнитосферных и сейсмогенных возмущений. Мониторинг кажущегося импеданса электромагнитных УНЧ-полей может быть использован для обнаружения слабых сейсмогенных возмущений. Разработанная в физике магнитосферных МГД-волн модель взаимодействия альфвеновской волны с системой ионосфера—ионосфера—Земля помогает разрешить давно стоящую в теории МТЗ проблему возможного вклада электрической моды. Первые активные эксперименты с использованием ЛЭП в качестве излучателя искусственных УНЧ-волн открывают возможность оперативного проведения МТЗ поверхностных слоев земной коры на громадной площади. Большая часть описанных в обзоре перспективных направлений исследований пока еще не прошли экспериментальную апробацию.

Работа Д.В. Зинкина выполнена при поддержке гранта РФФ № 25-47-01004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров П.Н., Рыбин А.К., Забиякова О.Б. Разделение электромагнитного поля по положению источников в магнитотеллурическом методе. *Ученые записки Казанского университета*. 2018, т. 160, кн. 2, с. 339–351.
- Альперович Л.С., Федоров Е.Н., Осьмакова Т.Б. Об особенностях теллурического поля вблизи резонансной магнитной оболочки. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1991, № 7, с. 60–71.
- Анисимов С.В., Курнева Н.А., Пилипенко В.А. Вклад электрической моды в поле пульсаций Pc3-4. *Геомагнетизм и аэронавигация*, 1993, т. 33, № 3, с. 35–41.
- Бандилет О.И., Землянкин Г.И., Федоренко Ю.В. Пульсации вертикальной компоненты геоэлектрического поля в диапазонах Pi1-2 и Pc1. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1980. т. 20, № 1. с. 165–168.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н. и др. Первые эксперименты по генерации и приему искусственных УНЧ-излучений (0.3–12 Гц) на дистанции 1500 км. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002, т. 45, № 2, с. 156–162.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. *Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред*. М.: Недра, 1992, 250 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. *Модели и методы магнитотеллурики*. М.: Научный мир, 2009, 680 с.

- Ваньян Л.Л., Бутковская А.И. *Магнитотеллурическое зондирование слоистых сред*. М.: Недра, 1980.
- Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона. *Доклады РАН*. 1994, т. 338, № 1, с. 106–109.
- Гетманцев Г.Г., Гульельми А.В., Клайн Б.И. и др. Возбуждение магнитных пульсаций при воздействии на ионосферу излучением мощного коротковолнового передатчика. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1977, т. 20, № 7, с. 1017–1019.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Гершензон Н.И., Пилипенко В.А. Эффекты электромагнитной природы при разрушении земной коры. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1985, № 1, с. 72–87.
- Грин А.У., Вортингтон Е.У., Пилипенко В.А. и др. Влияние магнитосферного альфвеновского резонанса на спектр пакетов пульсаций Pc3-4 на средних широтах. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1991, т. 31, № 4, с. 619–624.
- Гульельми А.В. Гидромагнитная диагностика и геоэлектрическое зондирование. *Успехи физических наук*. 1989, т. 158, с. 605–637.
- Гульельми А.В. Гидромагнитная диагностика космической среды. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1992, № 5, с. 45.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т. Электромагнитные сигналы от землетрясений. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1994, № 5, с. 65–70.
- Гульельми А.В., Гохберг М.Б., Рубан В.Ф. Гидромагнитная диагностика и геоэлектроразведка на базе одиночной обсерватории. *Доклады АН СССР*. 1989, т. 308, № 3, с. 578–581.
- Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Собчаков Л.А. и др. Экспериментальные исследования распространения искусственных электромагнитных сигналов в диапазоне 0.6–4.2 Гц. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005, т. 48, № 9, с. 788–799.
- Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Велихов Е.П. и др. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ-СНЧ-диапазона (0.1–200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент «FENICS»). *Геофизические процессы и биосфера*. 2015, т. 14, № 2, с. 5–49.
- Зыбин К.Ю., Крылов С.М., Лепендин В.П., и др. О вертикальной электрической напряженности поля геомагнитных пульсаций, *Доклады АН СССР*. 1974, т. 218, № 4, с. 828–829.
- Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н. и др. Свойства УНЧ/ОНЧ-сигналов, генерируемых установкой СУРА в верхней ионосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013, т. 56, № 6, с. 382–394.
- Крылов А.Л., Лифшиц А.Е., Федоров Е.Н. О резонансных свойствах магнитосферы. *Изв. РАН. Физика Земли*. 1981, № 6, с. 49.
- Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А. Электрические и магнитные сигналы при стесненных движениях блоков земной коры. *Доклады РАН*. 2010, т. 432, № 5, с. 685–688.
- Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Боровлева К.Е. Электромагнитные УНЧ-поля на земной поверхности и в ионосфере от подземного сейсмического источника. *Изв. РАН. Физика Земли*. 2024, № 2, с. 59–71. DOI: [10.31857/S0002333724020058](https://doi.org/10.31857/S0002333724020058).
- Пилипенко В.А., Повзнер Т.А., Савин И.В., Никомаров Я.Н. Локальная пространственная структура поля геомагнитных пульсаций на средних широтах. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1988, № 10, с. 54–61.
- Пилипенко В.А., Позднякова Д.Д., Савельева Н.В. Ультранизкочастотные волны в космосе и на Земле. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук. Физика*. 2024а, vol. 96, № 9-3, с. 163–205. DOI: [10.24412/2500-1000-2024-9-3-163-205](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-9-3-163-205).
- Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Шевцов А.Н. О возможности экспериментов по возбуждению искусственных ультранизкочастотных излучений в ионосфере установкой FENICS на Кольском полуострове. *Известия РАН. Серия физическая*. 2024б, т. 88, № 3, с. 392–400.
- Пилипенко В.А., Ермакова Е.Н., Потапов А.С. и др. Возбуждение глобальных искусственных сигналов диапазона Pc1 в эксперименте FENICS-2024: 1. Наблюдения. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 2, с. 124–131. DOI: [10.12737/szf-112202511](https://doi.org/10.12737/szf-112202511) / Piliipenko V.A., Ermakova E.N., Potapov A.S., et al. Excitation of global artificial Pc1 signals during FENICS-2024 experiment: 1. Observations. *Sol.-Terr. Phys.* 2025, vol. 11, iss. 2, pp. 111–118. DOI: [10.12737/stp-112202511](https://doi.org/10.12737/stp-112202511).
- Савин М.Г., Никифоров В.М., Харитонов В.М. Об аномалиях вертикальной электрической компоненты магнитотеллурического поля на Северном Сахалине. *Физика Земли*. 1991, № 2, с. 100–108.
- Савин М.Г., Израильский Ю.Г., Новые возможности модели Четаева, *Солнечно-земная физика*. 2016, т. 2, № 2, с. 86–92, DOI: [10.12737/13465](https://doi.org/10.12737/13465) / Savin M.G.; Izrail'sky Yu.G. New possibilities of the Chetaev model. *Sol.-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, iss. 2, pp. 104–114. DOI: [10.12737/21003](https://doi.org/10.12737/21003).
- Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А. Электромагнитные поля в верхней ионосфере от горизонтального КНЧ наземного излучателя конечной длины. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2022, т. 65, № 9, с. 697–712. DOI: [10.52452/00213462_2022_65_09_697](https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_09_697).
- Четаев Д.Н. *Дирекционный анализ магнитотеллурических наблюдений*. М.: ИФЗ АН СССР, 1985, 228 с.
- Alperovich L.S., Fedorov E.N. Hydromagnetic waves in the magnetosphere and the ionosphere. *Astrophys. Space Sci. Library*. 2007, vol. 353, Springer, Berlin, 418 p.
- Baransky L.N., Borovkov Yu.E., Gokhberg M.B., et al. High resolution method of direct measurement of the magnetic field line's eigen frequencies. *Planetary and Space Sci.* 1985, vol. 33, iss. 12, pp. 1369–1374. DOI: [10.1016/0032-0633\(85\)90112-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(85)90112-6).
- Baransky L.N., Belokris S.P., Borovkov Yu.E., Green C.A. Two simple methods for the determination of the resonance frequencies of magnetic field lines. *Planetary and Space Sci.* 1990, vol. 38, no. 12, pp. 1573–1576. DOI: [10.1016/0032-0633\(90\)90163-k](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90163-k).
- Eliasson B., Chang C.-L., Papadopoulos K.J. Generation of ELF and ULF electromagnetic waves by modulated heating of the ionospheric F2 region. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, art. no. A10320. DOI: [10.1029/2012JA017935](https://doi.org/10.1029/2012JA017935).
- Ermakova E.N., Kotik D.S., Polyakov S.V., et al. A power line as a tunable ULF-wave radiator: Properties of artificial signal at distances of 200 to 1000 km. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A04305. DOI: [10.1029/2005JA011420](https://doi.org/10.1029/2005JA011420).
- Freund F.T., Héraud J.A., Centa V.A., Scoville J. Mechanism of unipolar electromagnetic pulses emitted from the hypocenters of impending earthquakes. *The European Physical J. Special Topics*. 2021, vol. 230, pp. 47–65. DOI: [10.1140/epjst/e2020-000244-4](https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000244-4).
- Green A.W., Worthington E.W., Baransky L.N., et al. Alfvén field line resonances at low latitudes ($L=1.5$). *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, pp. 15693–15699. DOI: [10.1029/93ja00644](https://doi.org/10.1029/93ja00644).
- Guglielmi A.V. Diagnostics of the plasma in the magnetosphere by means of measurement of spectrum of Alfvén oscillations. *Planetary and Space Sci.* 1989, vol. 37, iss. 8, pp. 1011–012. DOI: [10.1016/0032-0633\(89\)90055-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90055-X).
- Guo Z., Fang H., Honary F. The generation of ULF/ELF/VLF waves in the ionosphere by modulated heating. *Universe*. 2021, vol. 7, no. 2, p. 29. DOI: [10.3390/universe7020029](https://doi.org/10.3390/universe7020029).

- Hayakawa M., Hattori K., Ohta K. Monitoring of ULF geomagnetic variations associated with earthquakes. *Sensors*. 2007, vol. 7, no. 7, pp. 1108–1122. DOI: [10.3390/s7071108](https://doi.org/10.3390/s7071108).
- Kaufman A.A., Keller G.V. The magnetotelluric sounding method. *Elsevier Science*. 1981, New York, 595 p.
- Kivelson M.G., Southwood D.J. Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, p. 4345.
- Kurchashov Yu.P., Nikomarov Ya.S., Pilipenko V.A., Best A. Local meridional structure of midlatitude geomagnetic pulsations. *Ann. Geophys.* 1987, vol. 5A, p.147.
- Menk F.W., Waters C.L. Magnetoseismology: Ground-based remote sensing of Earth's magnetosphere. 2013, p. 271.
- Murphy B.S., Egbert G.D. Source biases in midlatitude magnetotelluric transfer functions due to Pc3-4 geomagnetic pulsations. *Earth, Planets and Space*. 2018, vol. 70, no. 12. DOI: [10.1186/s40623-018-0781-0](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0781-0).
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N. Magnetotelluric sounding of the crust and hydromagnetic monitoring of the magnetosphere with the use of ULF waves. *Ann. Geofisic.* 1993, vol. 36, no. 5-6, pp. 19–33.
- Pilipenko V., Vellante M., Anisimov S., et al. Multi-component ground-based observation of ULF waves: goals and methods. *Ann. Geofis.* 1998, vol. 41, no. 1, pp. 63–77.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Martines-Bedenko V.A., Bering E.A. Electric mode excitation in the atmosphere by magnetospheric impulses and ULF waves, *Frontiers in Earth Science*. 2021, vol. 8, pp. 687. DOI: [10.3389/feart.2020.619227](https://doi.org/10.3389/feart.2020.619227).
- Pilipenko V.A., Mazur N.G., Fedorov E.N. Discrimination of ULF signals from an underground seismogenic current. *Earth, Planets and Space*. 2024, vol. 76, no. 118. DOI: [10.1186/s40623-024-02058-9](https://doi.org/10.1186/s40623-024-02058-9).
- Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere. *Planetary and Space Sci.* 1974, vol. 22, p. 483.
- Southwood D.J., Hughes W.J. Source induced vertical components in geomagnetic pulsation signals. *Planetary and Space Sci.* 1978, vol. 26, pp. 715–720.
- Su B., Wang Y., Cao Q. Simulation of WEM using ELF modeling of local area and modified UPML. *ISAPE2012*, 2012, pp. 983–986. DOI: [10.1109/ISAPE.2012.6408939](https://doi.org/10.1109/ISAPE.2012.6408939).
- Vellante M., Villante U., De Lauretis M., et al. Simultaneous geomagnetic pulsation observations at two latitudes: resonant mode characteristics. *Ann. Geophys.* 1993, vol. 11, pp. 734–741.
- Wait J.R. *Geoelectromagnetism*. Academic Press, 1982.
- Zhao G.Z, Bi Y.X., Wang L.F., et al. Advances in alternating electromagnetic field data processing for earthquake monitoring in China. *Science China Earth Sciences*. 2015, vol. 58, no. 2, pp.172–182. DOI: [10.1007/s11430-014-5012-3](https://doi.org/10.1007/s11430-014-5012-3). URL: <http://irimodel.org> (дата обращения 3 мая 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Зинкин Д.В. Магнитотеллурическое зондирование и электромагнитная диагностика магнитосферы и литосферы: возможности взаимодополнения. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 1, с. 33–44. <https://doi.org/10.12737/szf-121202605>.