

УДК 550.837

**Шиндин Алексей Владимирович**

кандидат физико-математических наук,  
директор,  
научно-исследовательский радиофизический  
институт ННГУ им. Лобачевского,  
603950, г. Нижний Новгород,  
ул. Большая Печерская, д. 25/12а  
е-mail: [shindin@rf.unn.ru](mailto:shindin@rf.unn.ru)

**Котик Дмитрий Самойлович,**

кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
отдел распространения радиоволн и  
дистанционного зондирования,  
научно-исследовательский радиофизический  
институт ННГУ им. Лобачевского  
е-mail: [dmitry.kotik@nirfi.unn.ru](mailto:dmitry.kotik@nirfi.unn.ru)

**НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ НЕДР  
КОНТРОЛИРУЕМЫМ ИОНОСФЕРНЫМ  
ИСТОЧНИКОМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ  
РАДИОВОЛН\****Аннотация:*

Разработана новая технология электромагнитного зондирования недр, основанная на эффекте генерации низкочастотных электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного радиоизлучения наземного передатчика. Предложено устройство для формирования ионосферного источника, базовый модуль которого состоит из двух средневолновых передатчиков, настраиваемых на частоту гирорезонанса электронов в ионосфере на высоте порядка 80 – 90 км и соответствующей широте, на которой предстоит использование устройства. Каждый передатчик нагружается на свою антенну типа вертикальный диполь. Расстояние между антеннами составляет четверть длины волны на рабочей частоте. Использование гирочастоты и вертикальных диполей позволяет сформировать протяженный на несколько сотен километров ионосферный источник. Устройство, составленное из двух базовых модулей, содержит четыре диполя, расположенных по углам квадрата со стороны, равной четверти длины СВ волны. Такая конфигурация антенной системы позволяет получить увеличение мощности СВ излучения за счет двух дополнительных усилителей и увеличение коэффициента усиления антенной системы за счет двух дополнительных излучателей, что предоставляет возможность управления сектором излучения СВ волн по сторонам света. Теоретические расчеты и наши эксперименты с гирочастотными установками показывают, что при мощности предлагаемого устройства в 100 кВт (два усилителя по 50 кВт или 4 по 25 кВт) диаметр обла-

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.066

**Shindin Aleksey V.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Director, Radiophysical Research Institute,  
State University of Nizhny Novgorod  
n.a. Lobachevsky,  
603950 Nizhny Novgorod,  
25/12a Bolshaya Pecherskaya Str.  
e-mail: [shindin@rf.unn.ru](mailto:shindin@rf.unn.ru)

**Kotik Dmitry S.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Leading Researcher,  
Department of Radio Wave Propagation and  
Remote Sensing,  
Radiophysical Research Institute,  
State University of Nizhny Novgorod  
n.a. Lobachevsky,  
e-mail: [dmitry.kotik@nirfi.unn.ru](mailto:dmitry.kotik@nirfi.unn.ru)

**NEW TECHNOLOGY  
OF ELECTROMAGNETIC SUBSURFACE  
SOUNDING BY A CONTROLLED  
IONOSPHERIC SOURCE  
OF LOW-FREQUENCY RADIO WAVES***Abstract:*

A new technology of electromagnetic probing of the subsurface has been developed, based on the effect of generation of low-frequency electromagnetic waves by ionospheric currents under the influence of modulated radio emission of a ground transmitter on the ionosphere. A device for forming an ionospheric source is proposed, the basic module of which consists of two medium-wave transmitters tuned to the frequency of electron gyro resonance in the ionosphere at an altitude of about 80-90 km and the corresponding latitude at which the device is to be used. Each transmitter is loaded onto its own vertical dipole antenna. The distance between the antennas is a quarter of the wavelength at the operating frequency. The use of gyro frequency and vertical dipoles allows forming an ionospheric source extended for several hundred kilometers. The device, composed of two basic modules, contains four dipoles located at the corners of a square with a side equal to a quarter of the length of a medium-frequency wave. This configuration of the antenna system allows to increase the power of the microwave radiation due to two additional amplifiers and to increase the gain of the antenna system due to two additional emitters, which provides the ability to control the sector of microwave radiation by the cardinal directions. Theoretical calculations and our experiments with gyro-frequency installations show that with the power of the proposed device of 100 kW (two amplifiers of 50 kW or 4 of 25 kW), the diameter of the area in which geological exploration is supposed to be carried out can reach up to 1000 km in middle latitudes. In high latitudes, the size of such an area can be 2-3 times larger due to the presence of intense current jets dependent on magnetic activity.

\* Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки России № FSWR-2026-0011.

сти, в которой предполагается проведение геолого-разведки, может достигать до 1000 км в средних широтах. В высоких широтах размеры такой области могут быть в 2 – 3 раза больше благодаря наличию интенсивных токовых струй, зависящих от магнитной активности.

*Ключевые слова:* ионосфера, геологическая разведка, нефть, газ, руда, электромагнитное зондирование, низкочастотные радиоволны, гирочастота, мобильная установка.

*Key words:* ionosphere, geological exploration, oil, gas, ore, electromagnetic sounding, low-frequency radio waves, gyro-frequency, mobile installation.

### Введение

Из мировой практики применения геофизических методов разведки полезных ископаемых известно о широком распространении метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ), в котором источником служат естественные низкочастотные шумы магнитосферы и грозовые помехи и аудио-частотное магнитотеллурическое зондирование (АМТЗ) с контролируемым источником (передатчик в ОНЧ/СНЧ диапазонах). Геофизические методы поиска полезных ископаемых предваряют исследования недр дорогостоящим методом бурения разведочных скважин ввиду их сравнительной дешевизны. В данной статье рассматривается новая технология электромагнитного зондирования недр с использованием ионосферного источника, формируемого в нижней ионосфере мощным модулированным радиоизлучением наземного средневолнового передатчика радиоволн [1 – 3].

#### *Современное состояние метода электромагнитного зондирования*

Метод электромагнитного зондирования в сочетании с традиционным методом МТЗ получил широкое распространение в мире. В данном методе измеряется магнитными и электрическими датчиками поверхностный импеданс в зависимости от частоты (см., например, Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ). URL: <https://sibgeotech.ru/mtz> (дата обращения 01.03.2026)),

Расширенный на диапазон до нескольких килогерц (диапазон аудио частот) с применением передатчиков в этом же диапазоне получил название метод АМТЗ с контролируемым источником. В английской литературе данный метод получил название «Controlled-source audio-frequency magneto telluric (CSAMT) sounding». В совокупности с известными дополняющими методами (геохимия, гравиметрия) решается ряд практически важных задач [4, 5].

Мировой лидер в применении на суше АМТЗ – канадская компания Phoenix Geophysics – лет 20 назад использовала мощные низкочастотные генераторы с выходной мощностью 160 кВт, весом порядка 5 т и с дизельным энергопитанием, которые не смогли обеспечить значительных размеров исследуемых территорий. В настоящее время они перешли к малогабаритному оборудованию весом 10 – 15 кг и с выходной мощностью 1 – 2 кВт. Малогабаритные генераторы имеют очень ограниченный радиус действия и требуют частого перебазирования. Мощные генераторы требуют больших дорогостоящих антенн (см. World Leader in Magnetotellurics. URL: <https://www.phoenixgeophysics.com/> (дата обращения 01.03.2026)). Большие трудности возникают также при интерпретации данных, что связано с положением источника на поверхности земли и в результате широким пространственным спектром волновых векторов э/м поля в Земле.

Аналогичные методы развиваются и в геофизической разведке на морском шельфе. В этом направлении лидером является лаборатория ЭМ исследований Института океанографии им. Скриппса, США (см. Scripps Institution of Oceanography, Marine EM Laboratory Research. URL: <https://marineemlab.ucsd.edu/research.html> (дата обращения 01.03.2026)). Пример результатов, выполненных данной лабораторией зондирований на шельфе, изложен в работе [6].

Существует также методика, при которой передатчик устанавливается непосредственно на судне, антенной служит вертикальный диполь, опускаемый с борта судна до дна. Этот метод разработан в университете Торонто (Канада) и подробно описан в работе [7].

В данной работе мы не рассматриваем вопросы обработки данных э/м зондирования (решение обратной задачи) полагая, что существующие математические методы [8, 9] могут быть легко редуцированы к новому источнику. При этом отметим, что ионосферный источник возбуждает главную волну волновода Земля – ионосфера, у которой под поверхностью существует только вертикально распространяющаяся компонента. Напомним, что в случае размещения антенн непосредственно на поверхности в Земле будет присутствовать полный пространственный спектр волн.

### *Ионосферный источник низкочастотных радиоволн*

Ниже будет рассмотрена новая технология электромагнитного зондирования недр с использованием ионосферного источника, формируемого в нижней ионосфере мощным модулированным радиоизлучением наземного передатчика в СВ/КВ диапазонах радиоволн, авторское свидетельство на данный способ было получено еще в 1983 г. [1, 2].

Нами в 2024 г. получен патент RU 2822002 на установку для формирования ионосферного источника, которая может быть выполнена в мобильном варианте [3]. Аналогичный изложенному в [2] способу, позднее, в 1998 г., был представлен способ в патенте US 5777476 [10], в котором в качестве устройства для выполнения геологического картографирования недр использовался КВ-передатчик с излучением в зенит для нагрева ионосферных электронов, вызывающий модуляцию струи электрического тока на высотах E-слоя, переизлучающего из области нагрева электронов низкочастотное радиоизлучение (НЧР) на частоте модуляции КВ передатчика в волновод Земля – ионосфера (ВЗИ).

Согласно американскому патенту, мощный КВ-передатчик с частотой в диапазоне 2 – 15 МГц располагается под авроральной или экваториальной электроструей. В качестве такого устройства в соответствии с изобретением предлагается использовать стенд на Аляске HAARP (см. HAARP. URL: [https://www.academia.edu/30673299/HAARP\\_Research\\_and\\_Applications](https://www.academia.edu/30673299/HAARP_Research_and_Applications), (дата обращения 20.12.2025)).

Датчики могут располагаться на поверхности земли, морском дне, на низколетящих самолетах или под землей. Измеряются как амплитуда, так и фаза низкочастотных полей. Электромагнитное поле, генерируемое взаимодействием модулированного КВ излучения с ионосферной плазмой, эквивалентно полю, генерируемому горизонтальным магнитным диполем (ГМД), расположенным в области взаимодействия.

Экспериментальные исследования показали, что размещение устройства в авроральной ионосфере не позволило получить интенсивный низкочастотный сигнал, наблюдаемый в глобальных масштабах. Прежде всего, это связано с большой вариабельностью положения и интенсивности авроральной электроструи. Ее положение зависит от магнитной активности и может находиться на удалении 500 – 600 км к северу от стенда при слабой магнитной активности и настолько же к югу – при высокой. Антенная решетка стенда содержит 180 диполей и обладает высокой направленностью. Вследствие этого область ионосферы, подвергаемая нагреву, имеет размеры порядка 10 – 30 км в диаметре (в зависимости от несущей частоты).

Существуют еще две установки для воздействия на ионосферу (среднеширотная – стенд СУРА в РФ и высокоширотная – EISCAT Heater в Норвегии, Тромсё). Эти установки также обладают большими антенными решетками со 144 диполями каждая. Все указанные установки являются капитальными сооружениями и, естественно, не могут быть приближены к районам, нуждающимся в геологических изысканиях. Строить новые подобного рода установки в таких районах также не представляется экономически обоснованным ввиду их высокой стоимости. Отметим, что на момент ввода в строй уста-

новка HAARP (по состоянию на 2008 г.) понесла около 250 млн долл. строительных, эксплуатационных и налоговых затрат, а само строительство длилось более 10 лет (см. HAARP. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/HAARP> (дата обращения 01.03.2026)). Более того, отсутствует такого рода установка на экваторе. Ввиду данных обстоятельств, в США возникла идея разработки мобильной установки морского базирования, которая могла бы быть использована для исследований на любой широте, в том числе и на магнитном экваторе. Однако этот проект исходил из той же парадигмы, что и стационарные стенды. Предложена достаточно большая антенная решетка (24 диполя на двух океанских баржах), диапазон воздействия 5 – 10 МГц, и передатчик мощностью 800 кВт. Основные результаты разработки этого проекта опубликованы в статьях [11, 12].

Механизм генерации НЧР в ионосфере был впервые предложен в работе [13]. Там же было указано на резонансное усиление эффекта при использовании нагрева на частоте, близкой к гирочастоте электронов в нижней ионосфере. Отметим, что циклотронная частота электронов в нижней ионосфере зависит от широты и изменяется от 0,8 МГц на экваторе до 1,5 МГц в высоких широтах.

Экспериментальная проверка данного утверждения была проведена на подмосковном нагревном стенде НИИ Радио (передатчик мощностью  $P=80$  кВт работал на синфазную антенную решетку с коэффициентом усиления  $G=100$  на частоте  $f=1,35$  МГц) и на стенде СУРА с использованием гирочастотного нагревного передатчика с синфазной решеткой из восьми скрещенных диполей ( $G=35$ ,  $P=150$  кВт, полоса рабочих частот 1,2 – 1,4 МГц) [14, 15].

Большой массив данных позволил провести детальное сравнение эффективности генерации на частотах 4,8 и 1,4 МГц, результат совместной обработки представлен в работе [15]. В результате было установлено, что эффективность использования нагрева на гирочастоте выше в среднем в 4 раза в дневное время, до 8 раз – в утренние часы и безальтернативна ночью. Экспериментальное подтверждение приема сигнала от гирочастотного передатчика стенда СУРА на удалении в 500 км к югу представлено в [16].

В эксперименте с мощной широкополосной радиостанцией «Коминтерн», работавшей на частоте 236 кГц, была доказана возможность эффективного использования антенны в виде вертикального диполя для ионосферной генерации НЧ радиоволн [17].

Автором патента US 5053783 [18] указывается, что генерируемая мощность низкочастотного сигнала пропорциональна квадрату эффективного дипольного момента источника:

$$M = I_{\Omega} L, \quad (1)$$

где  $I_{\Omega}$  – полный модулированный ток в области взаимодействия – источник низкочастотного поля в ВЗИ;  $L$  – линейный размер модулированной области.

Эффективный момент горизонтального тока  $M$  можно оценить интегрированием по высоте плотности тока  $\vec{j}_{\Omega}^{ct}$  на частоте модуляции  $\Omega$ .

$$\vec{j}_{\Omega}^{cm} = \Delta \hat{\sigma}_{\Omega} * \vec{E}_0 = \frac{d\hat{\sigma}_{\Omega}}{dv_e} \Delta v_e * \vec{E}_0, \quad (2)$$

где  $\Delta \sigma_{\Omega}$  – амплитуда модуляции проводимости;  $\Delta v_e$  – амплитуда модуляции частоты столкновений электронов с молекулами;  $E_0$  – стороннее электрическое поле является динамо полем  $\vec{E}_0 = \vec{E}_D = -\frac{m_e v_e}{e} \vec{U}_{0m}$  на средних широтах ( $\vec{U}_{0m}$  – скорость нейтрального

ветра), для высоких широт или экватора это поле поляризации токовой струи  $\vec{E}_0 = \vec{E}_P$ . Эффективный момент  $M$  оценим, интегрируя (2) с использованием теоремы о среднем:

$$\vec{M} = L_{\parallel} \vec{I}_{\Omega} = L_{\parallel} * \int_S \vec{j}_{\Omega}^{cm} dx dz \approx \left\langle \frac{d\hat{\sigma}_{\Omega}}{dv_e} \Delta v_e \right\rangle L_{\parallel} L_{\perp} \Delta z * \vec{E}_0, \quad (3)$$

где  $\Delta z$  – протяженность эффективного излучающего слоя по высоте:  $L_{\parallel}, L_{\perp}$  – продольная и поперечная протяженность ионосферного источника. Выражение (3) практически совпадает с выражением (2) в описании к патенту US 5053783 [18].

В патенте US 5053783 [18] предлагается увеличить размеры области нагрева ионосферы путем быстрого сканирования узким лучом (полуширина луча  $7,5^{\circ}$  в конусе с полушириной размером в  $35,5^{\circ}$  [18]), поскольку эффективный момент ионосферного источника пропорционален размерам этой области. Сканирование производится в течение первого полупериода низкочастотного сигнала и во время второго полупериода передатчики установки выключаются для остывания ионосферы (так называемая пространственная модуляция). Такая манипуляция позволяет увеличить диаметр области источника с 20 до 120 км на высоте 80 км. Отметим, что подобное управление лучом – достаточно сложная техническая задача.

С другой стороны, устройство, предлагаемое согласно нашему изобретению (рис. 1), использует антенную систему из двух вертикальных диполей 6 и 7, разнесенных на расстояние  $d$  (назовем данное устройство Базовый модуль – БМ). Диаграмма направленности такой системы представлена на рис. 2, где показано, что эта диаграмма определяет размеры области ионосферы 15, нагреваемой радиоизлучением наземной установки на циклотронной частоте. На высоте E-слоя (70 – 100 км) протекают постоянные токи 14. Излучение такой системы направлено вдоль линии, соединяющей диполи (ось X) в секторе шириной  $179^{\circ}$  (при сдвиге фазы диполя 6 на  $-90^{\circ}$  относительно диполя 7). В случае сдвига фазы диполя 6 на  $+90^{\circ}$  направление излучения сменится на противоположное.

Расчеты показывают, что продольный размер источника на высоте 80 км по уровню 0,5 составляет  $L_{\parallel}=300$  км, а поперечный –  $L_{\perp}=300$  км. Площадь ионосферного источника составит 120 000 кв. км. Это почти на порядок превышает площадь, образуемую сканированием лучом коротковолновой нагревной установки в пространстве по патенту US 5053783 [18] и равную  $\sim 14400$  кв. км. Отметим, что такой результат достигается намного более простой антенной системой по сравнению с антенной решеткой стенда HAAR.

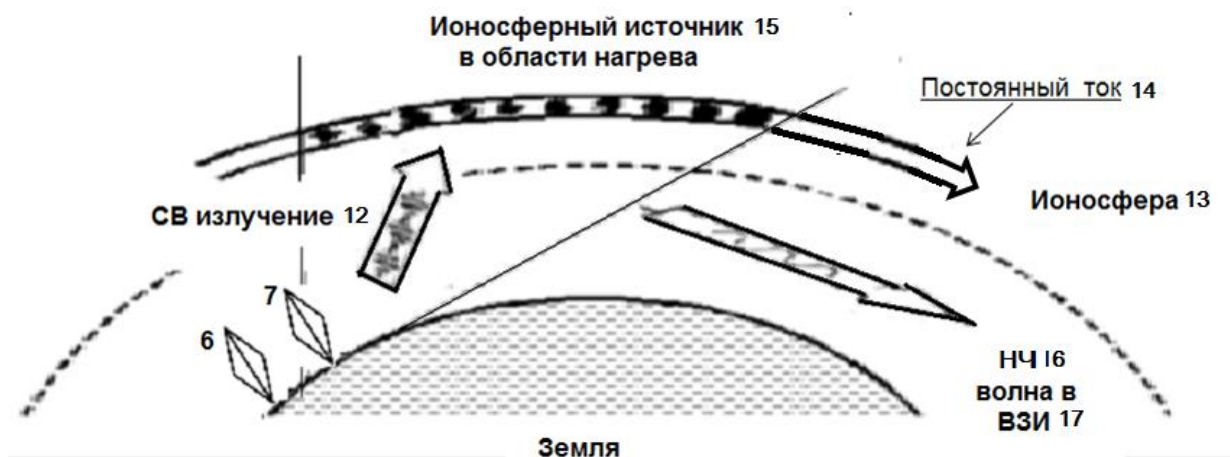


Рис. 1. Концепция устройства для формирования ионосферного источника НЧР согласно изобретению

Рассмотрим устройство, составленное из двух базовых модулей. Четыре диполя в этом случае располагаются по углам квадрата, сторона которого также равна четверти длины СВ радиоволны. В данном устройстве оба основных модуля объединены общим блоком управления и общей станцией контроля характеристик НЧР. Такая конфигурация антенной системы позволяет получить увеличение мощности СВ излучения за счет двух

дополнительных передатчиков и увеличение коэффициента усиления антенной системы за счет двух дополнительных излучателей. Дополнительные возможности предоставляет управление сектором излучения СВ волн для переключения направления по сторонам света.

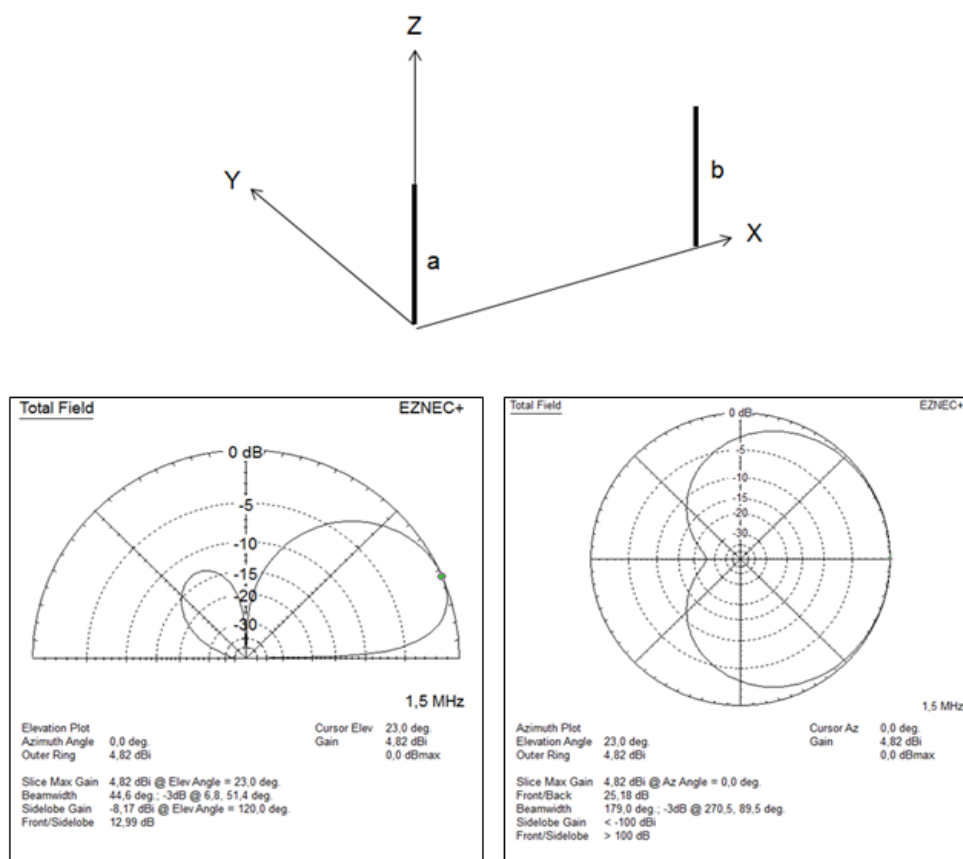


Рис. 2. Диаграммные свойства устройства БМ для формирования ионосферного источника НЧР (вверху схематическое изображение антенной системы модуля)

Теоретические расчеты и наши эксперименты с гирочастотными установками показывают, что при мощности предлагаемого устройства в 100 кВт (два усилителя по 50 кВт или 4 по 25 кВт) диаметр области, в которой предполагается проведение геолого-разведки, может достигать до 1000 км от пункта размещения устройства в средних широтах. В высоких широтах размеры такой области могут быть в 2 – 3 раза больше благодаря наличию интенсивных токовых струй, зависящих от магнитной активности.

Отдельно отметим современные возможности построения мощных передатчиков в СВ диапазоне. Революция в элементной базе силовой электроники привела к созданию множества мощных твердотельных малогабаритных устройств в различных областях народного хозяйства, от двигателей электромобилей до радиопередатчиков [19]. Так, например, передатчик производства канадской компании NAUTEL мощностью 25 кВт в диапазоне 531 – 1605 кГц имеет размеры 184 см × 96 см × 120 см при весе 567 кг. Такие массогабаритные параметры позволяют установить четыре таких передатчика в морской контейнер и перевозить автомобильным тягачом. Вариант такого мобильного размещения передатчика мощностью 100 кВт предлагает хорватская компания RIZ, выпускающая аналогичные канадским передатчиками (см. Mobile MW & SW Broadcasting Programme, URL: <https://riz.hr/en/transmitters/mobile-program.html> (дата обращения 01.03.2026)). Антенна в виде телескопической мачты, высотой в несколько десятков мет-

ров, размещается на прицепе. Таким образом, становится очевидной возможность создания мобильного варианта устройства, предлагаемого согласно данному изобретению в автомобильном, железнодорожном или морском варианте. Предлагаемая новая технология основана на создании нового устройства для наземных и шельфовых геофизических исследований: разведки нефти и газа, полезных рудных ископаемых, геотермальных ресурсов, подземных вод, карстов, инженерно-экологических и археологических изысканий, общей геолого-томографической съемки. Техническим результатом является увеличение размеров ионосферного источника при одновременном уменьшении массогабаритных параметров устройства, уменьшение стоимости расходов на его сооружение и эксплуатацию, возможность создания мобильных вариантов устройства, увеличении размеров района, в котором возможно проведение геологической разведки с использованием одной мобильной установки для воздействия на ионосферу (МУВИ).

Ниже представлено несколько концептуальных рисунков, поясняющих суть метода (рис. 3 – 5).

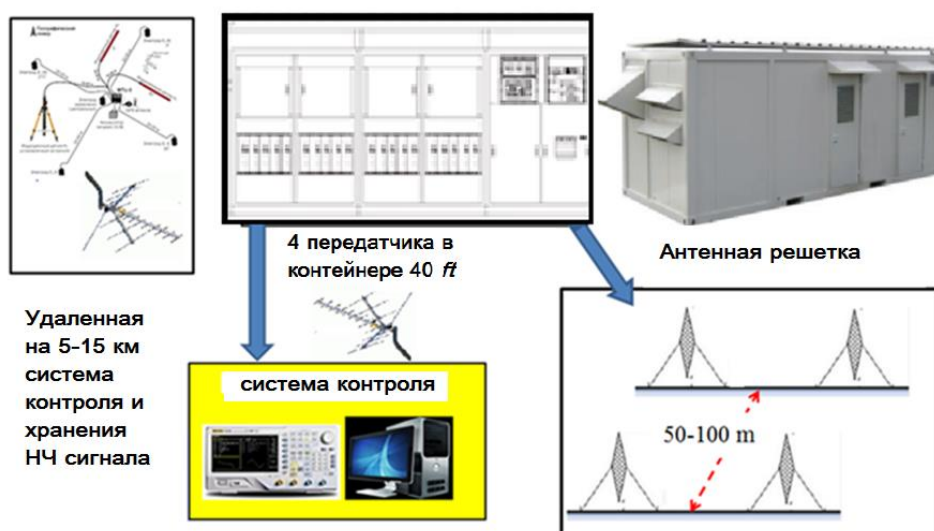


Рис. 3. Блок-схема мобильной установки для воздействия на ионосферу (МУВИ), формирующей ионосферный источник

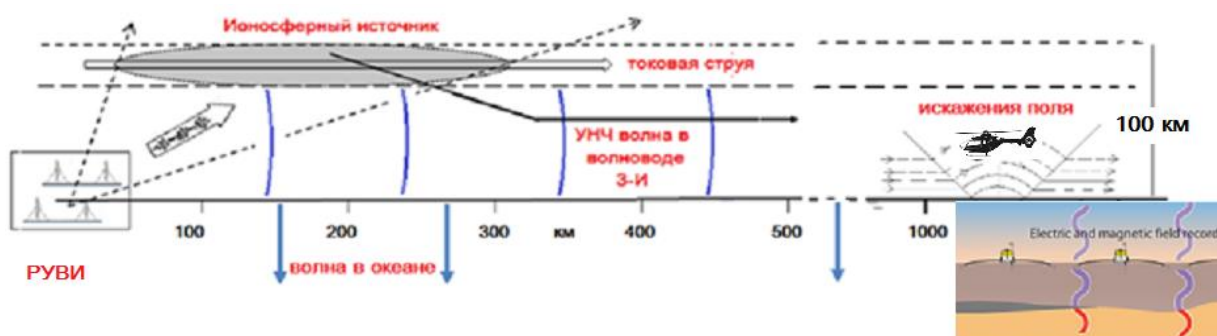


Рис. 4. Концепция применения МУВИ для геологоразведки. В высоких широтах струя может перемещаться по широте на +/- 1000 км относительно берегового МУВИ

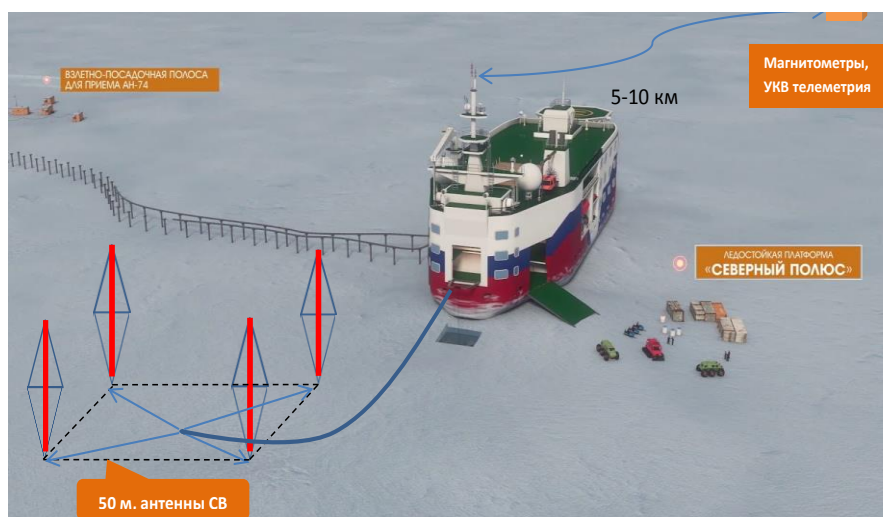


Рис. 5. Использование дрейфующей платформы СП для электромагнитных зондирований в Арктике. Как передающие антенны, так и датчики устанавливаются непосредственно на лед

### Заключение

Ионосферный метод генерации низкочастотных радиоволн, предлагаемый в данном проекте, обладает рядом несомненных преимуществ.

1. Габариты установки типа МУВИ будут иметь размеры в сотни раз меньше, чем традиционные СНЧ/СДВ радиостанции и в сотни раз дешевле в производстве. Это позволит создавать мобильные и быстро разворачиваемые (в течение нескольких дней) установки или размещать их на судовых или железнодорожных платформах, рассредоточивать их на расстояниях нескольких сотен километров или агрегировать несколько МУВИ в одну более мощную установку, резервировать их на складах.

2. Частота ионосферного источника может мгновенно перестраиваться в широком диапазоне частот от долей герца до нескольких килогерц, а в некоторых режимах работы и до десятков килогерц, что особенно полезно для применения зондирований в различных задачах на море и на суше.

3. Дополнительную возможность предоставляет использование МУВИ на рабочих частотах в СВ диапазоне в режиме поверхностной волны для резервной связи (навигации) с судами, проходящими по северному морскому пути, в частности при потере КВ или спутниковой связи во время магнитных бурь и других технических катаклизмах.

4. Еще одна дополнительная возможность – использование установки для радиовещания на северных территориях или в регионах вне работы установки для проводки судов на СМП или Э/М зондирований.

5. При создании морского носителя МУВИ представляется целесообразным создание специализированной организации (государственной или коммерческой), предлагающей услуги по геофизической разведке на шельфах в первую очередь стран БРИКС.

6. Согласно нашим оценкам три береговых установки в Арктике и по одной на Камчатке, Сахалине, в Крыму и Калининградской области обеспечат разведку на шельфе и в прибрежных районах РФ на долгие годы, а использование возможностей по пп. 3 и 4 обеспечит их круглогодичную эксплуатацию при разумном решении межведомственных вопросов.

В настоящее время на полигоне НИРФИ «Васильсурск» создается стационарный действующий образец базового модуля устройства на базе существующего передатчика «Шторм», мощность двух моноблоков 2x75 кВт. Разработан проект антенной системы,

названной нами «Большой Квадрат», стоимость которой оценена в 12 млн руб. Ориентировочно строительство антенн возможно в течение 2026 – 2027 гг. при наличии финансирования. Собственно целью данной работы является привлечение внимания МТЗ общества и потенциальных заказчиков к новой технологии электромагнитного зондирования.

### Список литературы

1. Авторское свидетельство № 987552 СССР. *Способ геоэлектрической разведки* № 3323145/18-25; заявл. 24.07.81; опубл. 07.01.83, бюл. 1 / Котик, Д.С., Поляков С.В., Рапопорт В.О., заявитель: Горьковский научно-исследовательский институт.
2. Бабиченко, А.М., Котик Д.С., Клайн Б.И., и др., 1984. Электромагнитное зондирование Земли с использованием эффекта Гетманцева. *Докл. АН СССР*, 276:4 (1984), С. 840–842.
3. Патент № 2822002 Российская Федерация, МПК НО 4В 7/22. *Устройство для формирования ионосферного источника низкочастотных радиоволн*; заявл. 06.12.2023; опубл. 28.06.2024, бюл. № 19 / Котик Д.С., Рябов А.В., Яшнов В.А., патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». [Электронный охраняемый документ 2822008.eod.pdf](#)
4. Qiu N., Pan C., Zhang Y. et al. 2024. Sensitivity of Marine Controllable Source Electromagnetic Soundings for Identifying Plume Migration in Offshore CO<sub>2</sub> Storage. *J. Marine. Sci. Appl.*, 23, P. 656–673. <https://doi.org/10.1007/s11804-024-00601-4>
5. Tveit S., Mannseth T., Park J., Sauvin G., Agersborg R., 2020. Combining CSEM or gravity inversion with seismic AVO inversion, with application to monitoring of large-scale CO<sub>2</sub> injection. *Computational Geosciences* 24: 1201–1220. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09934-9>
6. Constable S. and Cox C., 1996. Marine controlled source electromagnetic sounding – II: The PEGASUS experiment. *Journal of Geophysical Research*, V. 97, P. 5519-5530, DOI:10.1029/95JB03738.
7. Edwards N., 2005. Marine controlled source electromagnetic: principles, methodologies, future commercial applications. *Surveys in Geophysics*, V. 26, P. 675–700, DOI 10.1007/s10712-005-1830-3.
8. O Castillo-Reyes et al., 2025. Inverse geo-electromagnetic modeling: a systematic review and bibliometric assessment, *Front. Earth Sci., Sec. Solid Earth Geophysics*, V. 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1645896>.
9. Kim Y.H., Park Y.G., 2023. A review of CO<sub>2</sub> plume dispersion modeling for application to offshore carbon capture and storage. *Journal of Marine Science and engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/jmse12010038>
10. Papadopoulos K., 1998. *Ground global tomography (GGT) using modulation of the ionospheric electrojets*, US 5777476, Date of Patent: Jul. 7.
11. Esser B. et al, 2017. The Path to a Transportable Ionospheric Heater—Tuning Methods. *IEEE Transactions on Plasma Science*. V. 45, (6).
12. Brian L. Beaudoin et al., 2018. Experimental studies on radio frequency sources for ionospheric heaters, *Physics of Plasmas*, 25, 103116); <https://doi.org/10.1063/1.5052183>.
13. Котик Д.С., Трахтенгерц В.Ю., 1975. О механизме возбуждения комбинационных частот в ионосферной плазме. *Письма в ЖЭТФ*, Т. 21, № 2, С. 114.
14. Котик, Д.С., Петров С.М., Поляков С.В и др., 1984. Экспериментальные исследования сигналов комбинационных частот при резонансном гирочастотном нагреве ионосферы. *Труды XIV Всесоюзной конференции по распространению радиоволн*. Москва: Наука.
15. Беляев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н. и др., 1987. Генерация сигналов комбинационных частот в ионосфере. *Известия вузов. Радиофизика*, т. 30, № 2, С. 248-268.

16. Kotik D., 1994. ELF/VLF emissions generated in the ionosphere by heating facilities – A new tool for ionospheric and magnetospheric research, *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 37, (6).

17. Котик Д.С. и др., 1986. Генерация ОНЧ сигналов в области авроральной электроструи среднеширотным длинноволновым передатчиком. *Низкочастотное излучение в магнитосфере земли*. Москва: ИЗМИРАН, С. 71-75.

18. Papadopoulos K., 1990. High power low frequency communications by ionospheric modification, Patent US5053783A.

19. Макушин М., 2019. Тенденции развития силовой электроники. *Электроника*, № 8. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.50

### References

1. Avtorskoe svidetel'stvo № 987552 SSSR. Spособ geoelektricheskoi razvedki № 3323145/18-25 [Copyright certificate No. 987552 of the USSR. Geoelectric exploration method No. 3323145/18-25]; zayavl. 24.07.81; opubl. 07.01.83, byul. 1 / Kotik, D.S., Polyakov S.V., Rapoport V.O., zayavitel': Gor'kovskii nauchno-issledovatel'skii institut.

2. Babichenko, A.M., Kotik D.S., Klain B.I., i dr., 1984. Elektromagnitnoe zondirovanie Zemli s ispol'zovaniem effekta Getmantseva . [Electro-magnetic sensing of the Earth using the Getmantsev effect]. Dokl. AN SSSR, 276:4 (1984), P. 840–842.

3. Patent № 2822002 Rossiiskaya Federatsiya, MPK NO 4V 7/22. Ustroistvo dlya formirovaniya ionosfernogo istochnika nizkochastotnykh radiovoln [Patent No. 2822002 Russian Federation, IPC NO 4B 7/22. A device for forming an ionospheric source of low-frequency radio waves]; zayavl. 06.12.2023; opubl. 28.06.2024, byul. № 19 / Kotik D.S., Ryabov A.V., Yashnov V.A., patentoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshogo obrazovaniya "Natsional'nyi issledovatel'skii Nizhegorodskii gosudarstvennyi universitet im. N.I. Lobachevskogo". Elektronnyi okhrannyi dokument 2822008.eod.pdf.

4. Qiu N., Pan C., Zhang Y. et al. 2024. Sensitivity of Marine Controllable Source Electromagnetic Soundings for Identifying Plume Migration in Offshore CO<sub>2</sub> Storage. *J. Marine. Sci. Appl.*, 23, P. 656–673. <https://doi.org/10.1007/s11804-024-00601-4>

5. Tveit S., Mannseth T., Park J., Sauvin G., Agersborg R., 2020. Combining CSEM or gravity inversion with seismic AVO inversion, with application to monitoring of large-scale CO<sub>2</sub> injection. *Computational Geosciences* 24: 1201–1220. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09934-9>

6. Constable S. and Cox C., 1996. Marine controlled source electromagnetic sounding – II: The PEGASUS experiment. *Journal of Geophysical Research*, V. 97, P. 5519-5530, DOI:10.1029/95JB03738.

7. Edwards N., 2005. Marine controlled source electromagnetic: principles, methodologies, future commercial applications. *Surveys in Geophysics*, V. 26, P. 675–700, DOI 10.1007/s10712-005-1830-3.

8. O Castillo-Reyes et al., 2025. Inverse geo-electromagnetic modeling: a systematic review and bibliometric assessment, *Front. Earth Sci., Sec. Solid Earth Geophysics*, V. 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1645896>.

9. Kim Y.H., Park Y.G., 2023. A review of CO<sub>2</sub> plume dispersion modeling for application to offshore carbon capture and storage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/jmse12010038>

10. Papadopoulos K., 1998. *Ground global tomography (GGT) using modulation of the ionospheric electrojets*, US 5777476, Date of Patent: Jul. 7.

11. Esser B. et al, 2017. The Path to a Transportable Ionospheric Heater—Tuning Methods. *IEEE Transactions on Plasma Science*. V. 45, (6).

12. Brian L. Beaudoin et al., 2018. Experimental studies on radio frequency sources for ionospheric heaters, *Physics of Plasmas*, 25, 103116); <https://doi.org/10.1063/1.5052183>.

13. Kotik D.S., Trakhtengerts V.Yu., 1975. O mekhanizme возбужdeniya kombinatsionnykh chastot v ionosfernoi plazme [On the mechanism of excitation of combination frequencies in ionospheric plasma]. Pis'ma v ZhETF, V. 21, № 2, P. 114.

14. Kotik, D.S., Petrov S.M., Polyakov S.V i dr., 1984. Eksperimental'nye issledovaniya signalov kombinatsionnykh chastot pri rezonansnom girochastotnom nagreve ionosfery [Experimental studies of combination frequency signals during resonant gyro-frequency heating of the ionosphere]. Trudy XIV Vsesoyuznoi konferentsii po rasprostraneniyu radiovoln. Moscow: Nauka.

15. Belyaev P.P., Kotik D.S., Mityakov S.N. i dr., 1987. Generatsiya signalov kombinatsionnykh chastot v ionosfere [Generation of combination frequency signals in the ionosphere]. Izvestiya vuzov. Radiofizika, Vol. 30, № 2, P. 248-268.

16. Kotik D., 1994. ELF/VLF emissions generated in the ionosphere by heating facilities – A new tool for ionospheric and magnetospheric research, *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 37, (6).

17. Kotik D.S. i dr., 1986. Generatsiya ONCh signalov v oblasti avroral'noi elektrostrui sredneshirotnym dlinnovolnovym peredatchikom [Generation of very low-frequencies signals in the field of an auroral electric jet a medium-latitude long-wave transmitter]. Nizkochastotnoe iz-luchenie v magnitosfere zemli. Moscow: IZMIRAN, P. 71-75.

18. Papadopoulos K., 1990. High power low frequency communications by ionospheric modification, Patent US5053783A.

19. Makushin M., 2019. Tendentsii razvitiya silovoi elektroniki [Trends in the development of power electronics]. Elektronika, № 8. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.189.8.50.