

УДК 621.396

Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем декаметрового радиосвязи: современное состояние и перспективы развития

Коваль С. А.

Актуальность. В последние годы возрос интерес к развитию декаметрового радиосвязи как для силовых структур, так и в системе цифрового радиовещания и для организации радиосвязи с подвижными объектами на больших расстояниях. Резкий толчок этому также дало одно из приоритетных направлений развития Арктической зоны Российской Федерации для обеспечения национальной безопасности и суверенитета страны – создание современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры. Декаметровая связь с удаленными и подвижными объектами при этом является наиболее выгодной, несмотря на изменчивость состояния ионосферы (в том числе и искусственных возмущений), учет которой производится путем ионосферного мониторинга и интересах построения и организации работы адаптивных радиолиний. В связи с этим, актуальным является анализ современного состояния и перспектив развития средств и систем мониторинга ионосферы в интересах декаметрового радиосвязи. **Целью работы** является анализ возможностей существующих средств и систем мониторинга ионосферы, применяемых для получения информации о состоянии ионосферы (среды распространения) и каналов связи (декаметровых радиолиний) с целью определения перспектив их развития в области измерения статистических параметров ионосферы и радиолиний, а также применения полученных данных для проектирования перспективных адаптивных систем декаметрового радиосвязи. **Результаты и их новизна.** К элементам новизны стоит отнести выявленные тенденции развития систем ионосферного обеспечения (радиомониторинга). При рассмотрении этих систем большое внимание уделено возможностям их автономной работы, широте спектра решаемых задач, в том числе по определению отдельных параметров декаметровых радиолиний и параметров, характеризующих возмущенную (в том числе и искусственно) ионосферу, или её локальную область. **Практическая значимость.** Представленный анализ будет полезен техническим специалистам для обоснования новых решений в области оценки состояния ионосферы и применения полученных текущих данных для проектирования динамически адаптивных радиолиний (радиосетей) декаметрового диапазона военного и двойного назначения, совершенствования средств мониторинга ионосферы в условиях ее возмущения.

Ключевые слова: ионосфера, диффузность, декаметровая радиолиния, замирания, неоднородности ионосферы, зондирование ионосферы, электронная концентрация.

Введение

Декаметровая радиосвязь в последние годы получила стремительное развитие во всех сферах, в том числе и в военной. Во многом это связано и с освоением Арктической зоны, районов Сибири и Дальнего Востока, созданием новой инфокоммуникационной инфраструктуры, развития связи одновременно по направлениям «скорость передачи информации (или пропускная способность) –

Библиографическая ссылка на статью:

Коваль С. А. Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем декаметрового радиосвязи: современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 73-100. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10403

Reference for citation:

Koval S. A. Ionospheric monitoring for the benefit of perspective adaptive systems of a decameter radio: current state and prospects of development. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 73-100 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10403

мобильность – охват территории страны» [1]. Декаметровая связь в этих условиях обладает выраженной экономической целесообразностью.

В военной сфере при подготовке и ведении боевых действий огромная роль в системе управления войсками и оружием отводится системе связи. При этом, на стратегических направлениях наиболее вероятным для доведения сигналов (приказов), в связи с большой протяженностью радиолиний и необходимостью маневра предполагается использование радиолиний декаметрового диапазона и спутниковых систем связи. В связи с этим актуальными задачами организационного и технического характера будут являться обеспечение требуемых показателей устойчивости, непрерывности и оперативности.

Декаметровая радиосвязь основана на распространении радиоволн путем отражения их от слоев ионосферы, что связано с рядом эффектов, негативно влияющих на организацию связи и её качество. Ионосфера не является статистически однородной средой и вариации её параметров (например, электронной концентрации в каждом из слоев) требуют учета при планировании радиосвязи и назначении частот. Для их учета проводится прогнозирование: долгосрочное (более 5 суток), краткосрочное (1-5 суток) и оперативное (12-24 часа). Однако, в ряде случаев, оперативное прогнозирование не дает полной картины состояния ионосферы, а иногда и просто «не успевает» за её изменением. Такое наиболее часто наблюдается в высокоширотной ионосфере, особенно в периоды северных сияний.

Отдельно стоит отметить возмущения ионосферы, вызываемые антропогенными факторами различного характера – искусственные возмущения ионосферы. Искусственные возмущения ионосферы могут быть вызваны намеренно, и рядом стран ведется активная деятельность по совершенствованию средств деструктивного воздействия не на сами системы и средства связи, а на разрушение радиоканалов передачи информации, то есть создание таких условий в среде распространения радиоволн, при которых бы наблюдались перерывы в связи (и радионавигации), замирания различного характера (общие, частотно-селективные и пространственно-селективные), невозможность обеспечить прием сигналов с требуемой помехоустойчивостью. Основной идеей при этом является модификация параметров среды распространения радиоволн за счет внешнего воздействия – иными словами, создания искусственных ионосферных образований (ИИО), способных рассеивать, отражать и поглощать радиоволны [2].

Модификация параметров среды распространения радиоволн может быть осуществлена различными способами, основными из которых являются: инжекция (вброс) частиц и ионов бария с самолетов как тактической, так и стратегической авиации и геофизических ракет в нижние слои ионосферы [2]; осуществление высотных и космических ядерных взрывов [3]; радионагрев ионосферы с помощью специальных станций (HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program, США, Аляска; HIPAS (High Power Auroral Stimulation), США, Аляска; EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association), Норвегия, о. Тромсё; SPEAR (Space Plasma Exploration by Active Radar), Норвегия, о. Лонгйр; сеть радаров JORN (Jindalee Operational Radar Network) в Exmouth,

западная Австралия и другими радионагревными стендами, расположенными в Великобритании, Индии, Таджикистане, Украине, Китае и Японии) [2, 4-8].

Реализация первых двух способов в условиях современного состояния средств ПВО и ПРО, а также ответных действий Российской Федерации на осуществление ядерных взрывов в соответствии с Военной доктриной Российской Федерации [9] весьма маловероятна, таким образом, наиболее вероятным способом создания ИИО является радионагрев ионосферы.

Степень реализации можно оценить по появлению в отрытых источниках рассекреченных патентов США, таких как [10-12]:

US 4686605 – Метод и устройство изменения части земной атмосферы, ионосферы и (или) магнитосферы;

US 4999637 – Создание искусственных ионизированных облаков над Землей;

US 4712155 – Метод и устройство создания области плазмы путем искусственного электронного и циклотронного нагрева.

Примерами действия радионагревного стенда HAARP, который «предназначен только лишь для проведения научных исследований» служат следующие явления – увеличение максимума электронной концентрации ионосферы (до трёх – пяти раз), повышение максимальной электронной температуры [13], появление крупномасштабных, среднемасштабных и мелкомасштабных неоднородностей ионосферы [6, 14, 15] смещения авроральной активности (полярных сияний) в средние широты вплоть до 60-62° северной широты [16].

Воздействие на ионосферу радионагревными стендами может быть осуществлено не только со стационарных станций, но и с подвижных. Такими станциями являются: Морская радарная платформа SBX (Sea-Based X-Band Radar platform), имеющая возможность передвижения [17], а также четыре беспилотных космических аппарата Многофункциональной магнитосферной миссии (MMS).

Известно, что время стационарности спокойной (невозмущенной) ионосферы в средних широтах составляет порядка одного часа, а в высоких широтах – порядка нескольких минут [18]. При возникновении ИИО время стационарности априорно неизвестно.

Нестационарность ионосферы, как среды распространения радиоволн, позволяет сделать вывод и о нестационарности параметров декаметровых радиолиний.

Причиной нестационарности ионосферы являются перемещения мелкомасштабных неоднородностей ионосферы. Эти неоднородности характеризуются флуктуациями электронной концентрации (ЭК) ΔN , которые возникают из-за различных факторов (солнечное и искусственное излучение, распыление легкоионизирующих химических веществ, радионагрев) и распределены неоднородно по высоте и по пространству. С ростом высоты величина флуктуаций ЭК ΔN возрастает пропорционально увеличению среднего (фонового) значения ЭК $\langle N \rangle$. Поэтому отношение среднеквадратического отклонения (СКО) флуктуаций ЭК к среднему значению ЭК на любой высоте примерно постоянно, т.е.

$\sigma_{\Delta N} / \langle N \rangle = const$. Это отношение также называют интенсивностью неоднородностей ЭК ионосферы $\beta_{и} = \sigma_{\Delta N} / \langle N \rangle$ [19]. Эта статистическая характеристика может служить в качестве оценки уровня диффузности ионосферы [20]. В условиях нормальной (невозмущенной) ионосферы $\beta_{и} = 10^{-3} \dots 10^{-2}$, а в условиях возмущенной ионосферы (в т.ч. при ИИО) может возрасти до $\beta_{и} = 3 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-1}$ [19].

Увеличение $\beta_{и}$ в свою очередь приводит к увеличению СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе из ионосферы $\sigma_{\varphi} = \psi(\beta_{и}, f_0)$, зависящего также от выбора рабочей частоты f_0 . Рост СКО флуктуаций фазового фронта σ_{φ} оказывает влияние на такие статистические параметры декаметровых радиолоний, как глубина (параметр райсовского распределения) замираний γ^2 , интервалы частотной ΔF_k и пространственной $\Delta \rho_k$ корреляции замираний ($\gamma^2 \sim 1/\exp(\sigma_{\varphi}^2)$, $\Delta F_k \sim 1/\sigma_{\varphi}$, $\Delta \rho_k \sim 1/\sigma_{\varphi}$) [19].

Рассмотренные статистические параметры декаметровых радиолоний (γ^2 , ΔF_k , $\Delta \rho_k$) позволяют судить о наличии (или отсутствии) в каналах связи различных видов замираний, в том числе частотно-селективных (ЧСЗ) и пространственно-селективных (ПСЗ). При использовании разнесенного приема на n антенн ПСЗ будут возникать, когда интервал пространственной корреляции $\Delta \rho_k$ будет меньше разнеса соседних антенн $\Delta \rho_a$ (т.е. $\Delta \rho_k / \Delta \rho_a < 1$).

ЧСЗ возникают в случае, когда интервал частотной корреляции (называемый также полосой когерентности) ΔF_k будет меньше ширины спектра сигнала ΔF_c (т.е. $\Delta F_k / \Delta F_c < 1$). Возникновение ЧСЗ и ПСЗ по раскрытию одиночной антенны приводит к дополнительному снижению помехоустойчивости приема сигналов [21]. При использовании разнесенного приема на n антенн отсутствие ($\Delta \rho_k / \Delta \rho_a \gg 1$) или слабая степень ПСЗ ($\Delta \rho_k / \Delta \rho_a > 1$) обуславливают снижение помехоустойчивости по сравнению со случаем некоррелированности замираний ($\Delta \rho_k / \Delta \rho_a \ll 1$) [22].

Снижение параметра глубины замираний (параметра Райса) γ^2 приводит к снижению помехоустойчивости приема сигналов. Обеспечить требуемую помехоустойчивость в этом случае можно достигнув либо применением кодирования, либо применением помехоустойчивых видов сигналов. Однако их выбор необходимо производить с учетом возможности возникновения ЧСЗ в канале связи ($\Delta F_k / \Delta F_c < 1$).

Снижение негативного влияния ЧСЗ, ПСЗ, а также повышение помехоустойчивости приема сигналов при общих замираниях можно достигнуть при наличии сведений о статистических параметрах декаметровых радиолоний (γ^2 , ΔF_k , $\Delta \rho_k$), которые, в свою очередь, зависят от параметров возмущенной ионосферы.

В настоящее время известны [23-25] способы построения адаптивных систем радиосвязи декаметрового диапазона, а также способы построения сетей декаметровой радиосвязи по принципу «когнитивного радио» [26, 27]. Адапта-

ция в этих способах предполагается путем выбора оптимальной рабочей частоты на основе результатов мониторинга ионосферы, а также с учетом определения уровня помех (шумов) на всех возможных рабочих частотах с помощью тестовых сигналов.

Стоит отметить, что в таких адаптивных системах не учитывается возможность адаптации по ширине спектра ΔF_c и разнесу антенн Δr_a путем определения статистических параметров декаметровых радиолиний (ΔF_k , Δr_k) и не используется возможность определения параметра глубины замираний γ^2 с целью выбора оптимальных сигналов или параметров кода для обеспечения требуемой помехоустойчивости. Современные средства декаметровой радиосвязи имеют в своем составе собственные средства зондирования ионосферы (Р-166 «Артек»), либо для расчета радиолиний и назначения рабочих частот используются сведения от сторонних станций зондирования. Возможности автоматической адаптации по ширине спектра ΔF_c и разнесу антенн Δr_a при их проектировании не применяются.

В настоящее время задача снижения негативного влияния общих замираний, ЧСЗ и ПСЗ для повышения помехоустойчивости приема сигналов решается на основе определения (измерения) статистических параметров декаметровых (ДКМ) радиолиний (γ^2 , ΔF_k , Δr_k) экспериментальным путем [22, 28, 29]. При этом для определения параметров декаметровых радиолиний (γ^2 , ΔF_k , Δr_k) используются результаты измерений статистических характеристик замираний принимаемых сигналов (иначе – оценки системных функций канала связи), а не результаты мониторинга статистических характеристик ионосферных неоднородностей (например, $\langle N \rangle$, $\sigma_{\Delta N}$, $\beta_n = \sigma_{\Delta N} / \langle N \rangle$) как первопричины возникновения замираний в каналах связи). Очевидно, что определение статистических характеристик замираний принимаемых сигналов (как последствия влияния неоднородностей ионосферы на распространение ДКМ волны) обуславливает значительные затраты временных и частотных ресурсов системы ДКМ связи.

Таким образом, одна из основных проблем современных систем ДКМ связи заключается в том, что существующие средства мониторинга ионосферы используются лишь для выбора рабочей (несущей) частоты передаваемого сигнала f_0 , а выбор его частотно-временных (ΔF_c , T_c) и пространственных (Δr_a) характеристик осуществляется средствами оценки качества канала (радиолинии) связи. В условиях возмущения ионосферы различного характера (как естественных, так и искусственных) принятие мер по повышению качества декаметровой радиосвязи возможно при наличии информации о статистических параметрах среды распространения и радиолиний в текущий момент времени, что позволит наиболее оперативно осуществить адаптацию.

Для разрешения этого противоречия (проблемы) существующих систем ДКМ связи необходимо проанализировать возможности измерения статистических параметров неоднородной ионосферы и статистических параметров декаметровых радиолиний (в том числе проходящих через ИИО) с помощью имеющихся средств мониторинга ионосферы.

Целью статьи является анализ возможностей существующих средств и систем мониторинга ионосферы, применяемых для получения информации о состоянии ионосферы (среды распространения) и каналов связи (декаметровых радиолиний) с целью определения перспектив их развития в области измерения статистических параметров ионосферы и радиолиний, а также применения полученных данных для проектирования перспективных адаптивных систем декаметровой радиосвязи.

Материал анализа был рубрицирован на следующие подразделы:

- 1) вертикальное зондирование ионосферы;
- 2) наклонное зондирование ионосферы;
- 3) радиозондирование ионосферы с искусственных спутников Земли;
- 4) транзионосферное радиозондирование;
- 5) радиотомография ионосферы;
- 6) риометрический метод.

1. Вертикальное зондирование ионосферы

Вертикальное зондирование ионосферы (ВЗИ) – вид радиозондирования, при помощи радиосигналов в диапазоне радиочастот, соответствующих диапазону исследуемых плазменных частот ионосферы и излучаемых вертикально вверх относительно поверхности Земли при условии, что точки излучения и приёма совмещены [30].

Метод ВЗИ (рис. 1) основан на измерении времени распространения посланных вертикально вверх $s = s(t_0)$ и вернувшихся обратно $s = s(t_0 + \Delta\tau)$ коротких радиоимпульсов с приемлемой степенью точности.

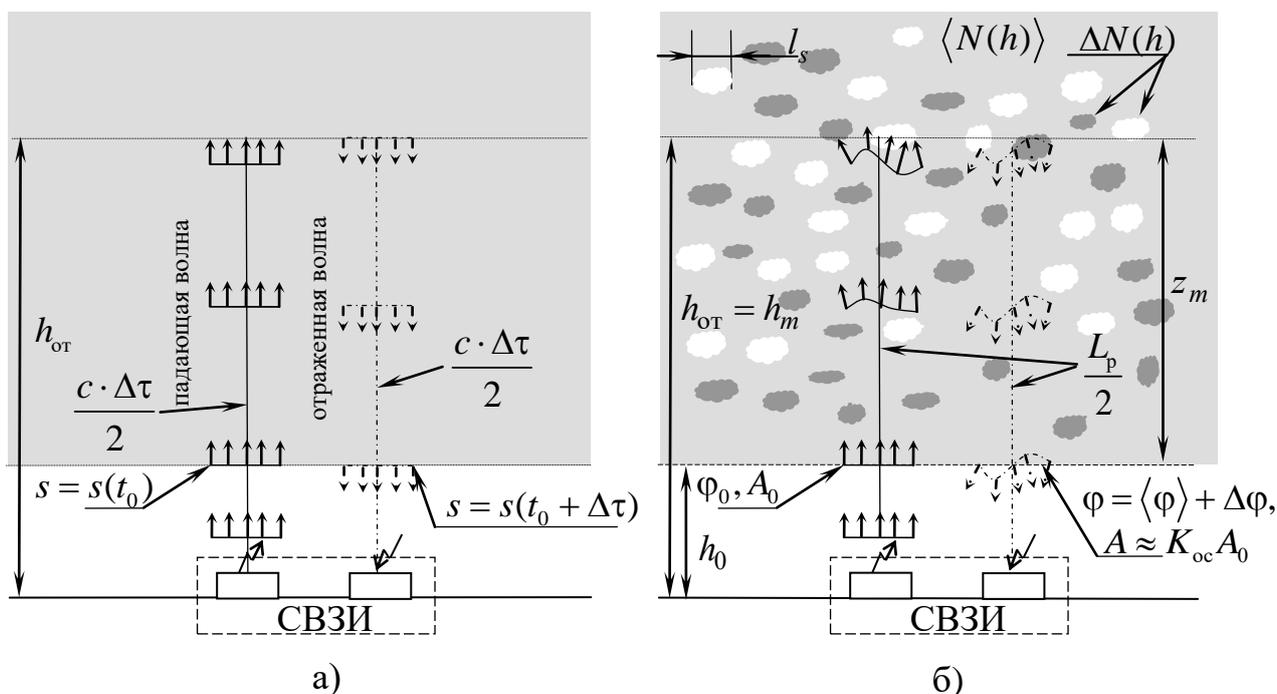


Рис. 1 – Работа станции вертикального зондирования:
а) в невозмущенной ионосфере; б) в условиях диффузности ионосферы

В условиях невозмущенной ионосферы (отсутствия диффузности) падающая на ионосферу волна (обозначена на рис. 1 а сплошной линией) и отраженная от ионосферы волна (обозначена штрих-пунктирной линией) будут плоскими, и сигналы распространяются по нормали к фронтам падающей и отраженной волн (сплошные и штрихпунктирные стрелки). Принимая скорость распространения импульсов равной скорости света c , по времени запаздывания отражённого от ионосферы сигнала Δt относительно переданного t_0 можно получить действующую высоту отражения $h_{от} = 0,5c\Delta t$ на данной частоте f_B вертикально направленной волны (рис. 1 а).

Последовательно излучая радиосигналы на различных частотах получают высотно-частотную характеристику (ВЧХ) – зависимость действующей высоты отражения вертикально направленной волны от ее частоты (рис. 2). По ВЧХ косвенно можно судить о наличии ИИО, а точнее, о явлении диффузности, характеризующем наличие мелкомасштабных неоднородностей ионосферы.

В условиях диффузности (рис. 1 б) состояние ионосферы будет характеризоваться наличием мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации $\Delta N(h)$, со средним масштабом l_s . При распространении радиоволны сквозь диффузную ионосферу амплитудно-фазовый фронт волны (изначально плоский с амплитудой A_0 и фазой φ_0 на высоте h_0 входа в ионосферу) будет изменяться (искажаться) за счет прохождения через неоднородности с различной ЭК, отличающейся от фоновой $\bar{N}(h) \equiv \langle N(h) \rangle$. На выходе из ионосферы отдельные участки фронта будут иметь различное значение фазы $\varphi = \langle \varphi \rangle + \Delta\varphi$, а амплитуда ослабнет в K_{oc} раз: $A \approx K_{oc}A_0$. Степень диффузности ионосферы можно количественно оценить путем прямых измерений ВЧХ.

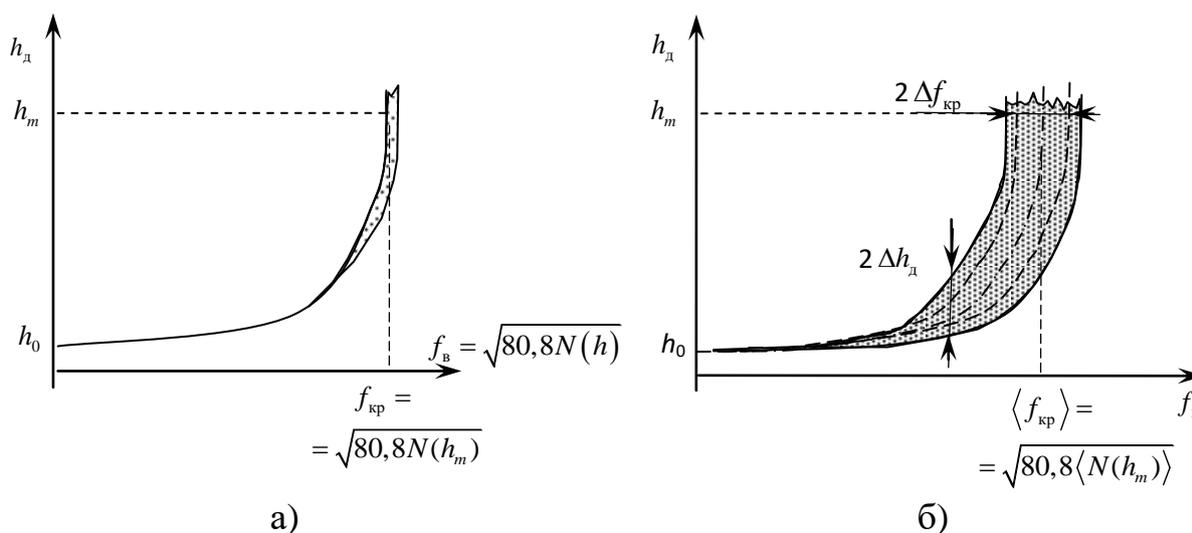


Рис. 2 – Высотно-частотные характеристики: а) при наличии признаков диффузности в невозмущенной ионосфере; б) в условиях диффузности ионосферы

При невозмущенной ионосфере (рис. 2 а) явление диффузности в слое F отсутствует или наблюдаются его незначительные признаки на ВЧХ с приближением частоты вертикальной f_v волны к критической частоте $f_{кр}$ отражения от ионосферы. Эти признаки диффузности (рис. 2 а) имеют вид небольшой размытости (рассеяния) кривой ВЧХ по частоте, возрастающей по мере приближения $f_v = \sqrt{80,8N(h)}$ к $f_{кр} = \sqrt{80,8N(h_m)} = \sqrt{80,8N_m}$.

При прохождении зондирующих импульсов через область диффузной ионосферы (например, ИИО) ВЧХ будет носить более размытый (рассеянный) характер по осям h_d и f_v , утолщения которой ($2\Delta h_d$ и $2\Delta f_v$) возрастают по мере приближения f_v к $f_{кр}$ (рис. 2 б).

Это утолщение объясняется увеличением отношения величины флуктуаций электронной концентрации $\Delta N(h)$ в неоднородностях ионосферы к ее среднему значению $\langle N(h) \rangle$ по мере увеличения высоты h . Среднеквадратическое отклонение (СКО) этих флуктуаций $\sigma_{\Delta N(h)} = \langle \Delta N^2(h) \rangle^{0,5}$ относительно $\langle N(h) \rangle$ характеризует интенсивность неоднородностей ионосферы β_n , которая практически не зависит от ее высоты [31]. Согласно [20] интенсивность неоднородностей ионосферы можно оценить по ВЧХ пропорционально отношению величины СКО флуктуаций критической частоты $\sigma_{f_{кр}}$ ионосферы к ее среднему значению $\langle f_{кр} \rangle = \sqrt{80,8 \langle N(h_m) \rangle}$:

$$\beta_n = \left[\frac{\langle \Delta N^2(h) \rangle}{\langle N(h) \rangle^2} \right]^{0,5} = \frac{\sigma_{\Delta N}(h)}{\langle N(h) \rangle} = \frac{\sigma_{\Delta N}(h_m)}{\langle N(h_m) \rangle} \approx \frac{2\sigma_{f_{кр}}}{\langle f_{кр} \rangle}. \quad (1)$$

В нормальной ионосфере интенсивность неоднородностей мала $\beta_n = 10^{-3} \dots 10^{-2}$, а в условиях диффузности в слое F она может заметно возрастать (до $\beta_n \sim 10^{-2} \dots 10^{-1}$).

Метод ВЗИ является самым чувствительным и информативным методом исследования и контроля состояния ближнего космоса, т.е. до достижения высоты максимума ионизации.

При этом метод ВЗИ позволяет определить среднее значение критической частоты ионосферы $\langle f_{кр} \rangle = \sqrt{80,8 \langle N(h_m) \rangle}$, необходимое для расчета максимально применимой частоты (МПЧ) $f_{мпч} = \langle f_{кр} \rangle \sec \psi_0$ и выбора оптимальной рабочей частоты $f_{орч} \approx 0,8 f_{мпч}$ декаметровый радиолинии.

Поскольку метод ВЗИ позволяет произвести измерение интенсивности неоднородностей ионосферы через статистические характеристики флуктуаций критической частоты отражения волны (1) $\beta_n \approx 2\sigma_{f_{кр}} / \langle f_{кр} \rangle$, открывается возможность рассчитать на этой основе СКО флуктуаций фазового фронта волны с рабочей частотой f_0 на выходе из ионосферы $\sigma_\varphi = \psi(\beta_n, f_0)$ как [32]

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\pi\beta_{\text{и}}f_0}{c} \sqrt{2L_3l_0}, \quad (2)$$

где L_3 – эквивалентный путь распространения радиоволны в ионосфере, определяемый через реальный L_p и групповой L_r пути распространения радиоволн [33], l_0 – наибольший размер неоднородностей ионосферы.

На основе определения интенсивности неоднородностей и СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе из ионосферы (1) и (2) возможно определить параметры декаметровых радиолиний: глубину замираний γ^2 , интервалы частотной ΔF_k и пространственной $\Delta\rho_k$ корреляции [21]

$$\gamma^2 = 1 / [\exp(\sigma_{\varphi}^2) - 1], \quad (3)$$

$$\Delta F_k = 2f_0 / \sigma_{\varphi} \sqrt{2 + d_1^2}. \quad (4)$$

Здесь d_1^2 – коэффициент, характеризующий нарастание дифракционных эффектов, определяемый как:

$$d_1^2 = \frac{3L^2 - 3LL_3 + L_3^2}{48(2\pi f_0/c)^2 l_0^2 l_i^2},$$

где l_i – наименьший размер неоднородностей ионосферы, а $L = L_3 + h_0$.

$$\Delta\rho_k = l_s / \sigma_{\varphi}. \quad (5)$$

В настоящее время основными техническими средствами, применяемыми для проведения ВЗИ являются ионозонды «Парус», «Авгур», «Бизон», Dynasonde-21, Digisonde. Они предназначены для исследовательских целей и мониторинга текущего состояния ионосферы по результатам анализа ВЧХ.

Применимость метода ВЗИ возможна только лишь для оценки состояния ионосферы над станцией зондирования, для глобального мониторинга нужна распределенная сеть станций ВЗИ.

2. Наклонное зондирование ионосферы

Наклонное зондирование ионосферы (НЗИ) – вид радиозондирования, суть которого состоит в получении ионограмм при пространственном разноразности на расстояние D приёмной и передающей систем ионозонда и синхронизации процессов излучения и приёма (рис. 3).

Работа станции наклонного зондирования при невозмущенной ионосфере (рис. 3 а) во многом аналогична ВЗИ. В условиях диффузности (рис. 3 б) состояние ионосферы будет характеризоваться наличием пространственных неоднородностей электронной концентрации $\Delta N(\rho, h)$, со средним масштабом l_s . Аналогично процессу ВЗИ при НЗИ будет изменяться амплитудно-фазовый фронт ($A \approx K_{\text{oc}} A_0$, $\varphi = \langle \varphi \rangle + \Delta\varphi$) волны счет прохождения через неоднородности с различной ЭК.

Метод НЗИ даёт как возможность прямого экспериментального исследования прохождения радиоволн на фиксированной дальности, так и возможность оценки состояния ионосферы в области средней точки радиотрассы на

расстояниях односкачкового прохождения. Метод НЗИ обладает возможностями исследования радиофизических проявлений локализованных искусственных ионосферных возмущений [30]. Зондирование может проводиться также с использованием сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналов).

Разновидностью метода НЗИ можно считать случай совмещения пунктов излучения и приёма с промежуточным обратным отражением (рассеянием) от земной поверхности – метод возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ).

Разрешающую способность метода НЗИ ограничивает дисперсионное искажение при расширении полосы зондирующего сигнала и рассеяние на мелко-масштабных неоднородностях.

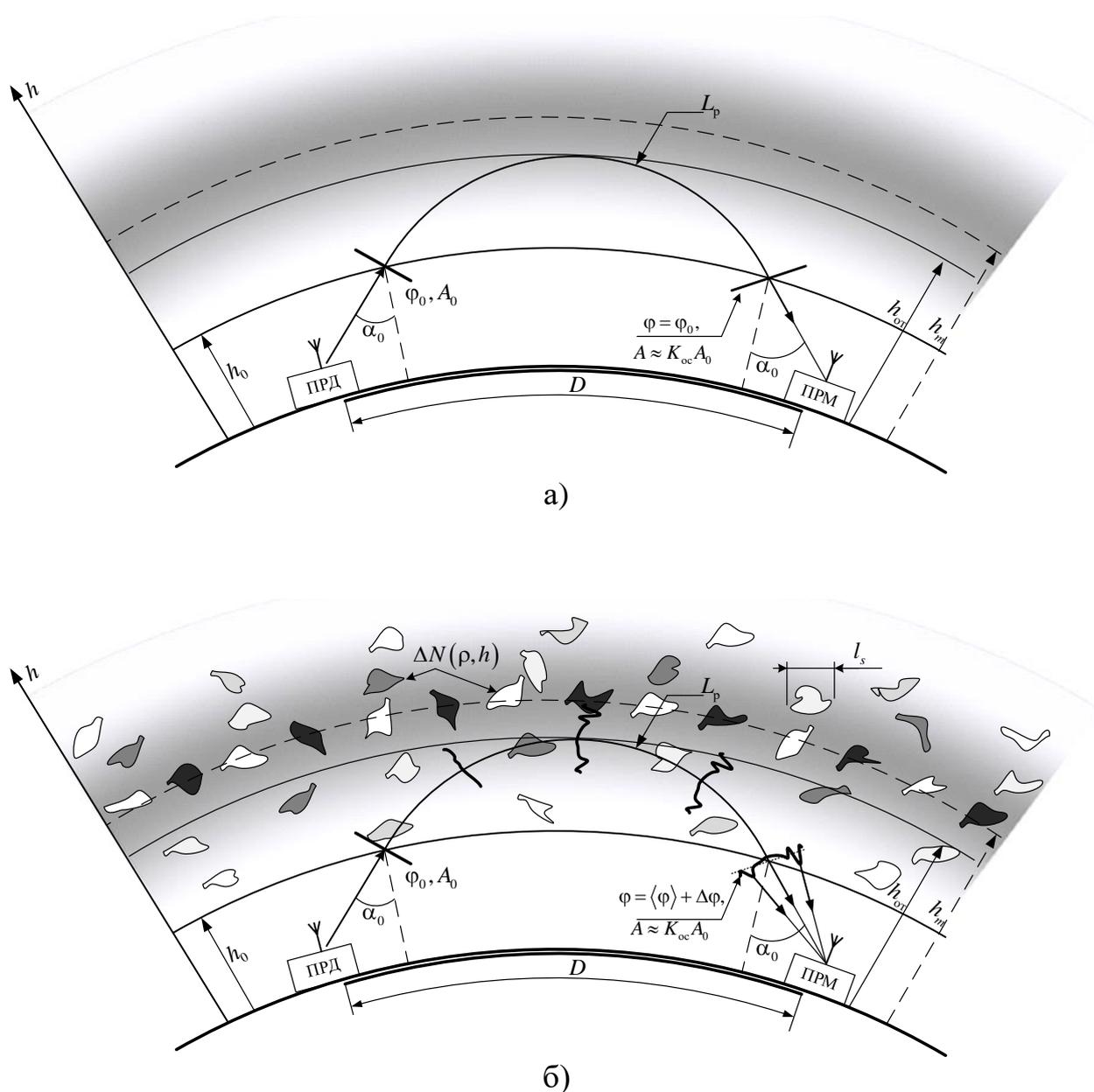


Рис. 3 – Работа станции наклонного зондирования:
а) в невозмущенной ионосфере; б) в условиях диффузности ионосферы

Результатом наклонного радиозондирования ионосферы является ионограмма НЗИ (рис. 4), которая показывает частотную зависимость группового запаздывания сигналов, прошедших различными путями в ионосфере, в точке приёма, т. е. модовую структуру волнового поля.

Диффузность на ионограммах НЗИ проявляется также в виде размытия линий запаздывания сигнала.

По ионограммам НЗИ возможно определить критическую частоту для конкретной радиолинии, которая может быть полезна для расчета максимально применимой частоты на этой радиолинии путем пересчета ионограмм НЗИ в ионограммы ВЗИ. Также метод НЗИ аналогично ВЗИ позволит определить интенсивность неоднородностей β_n и СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе из ионосферы $\sigma_\varphi = \psi(\beta_n, f_0)$ (2), которое описывается выражением вида [32]:

$$\sigma_\varphi = \frac{\pi\beta_n f_0}{cK_s^2 \sec^2 \alpha_0} \sqrt{2L_s l_0},$$

где K_s – коэффициент сферичности ионосферы; α_0 – угол падения волны на ионосферу. В соответствии с этим выражением и (3) – (5) определяются параметры зондируемой декаметровый радиолинии: ($\gamma^2 \sim 1/\exp(\sigma_\varphi^2)$, $\Delta F_k \sim 1/\sigma_\varphi$, $\Delta\rho_k \sim 1/\sigma_\varphi$).

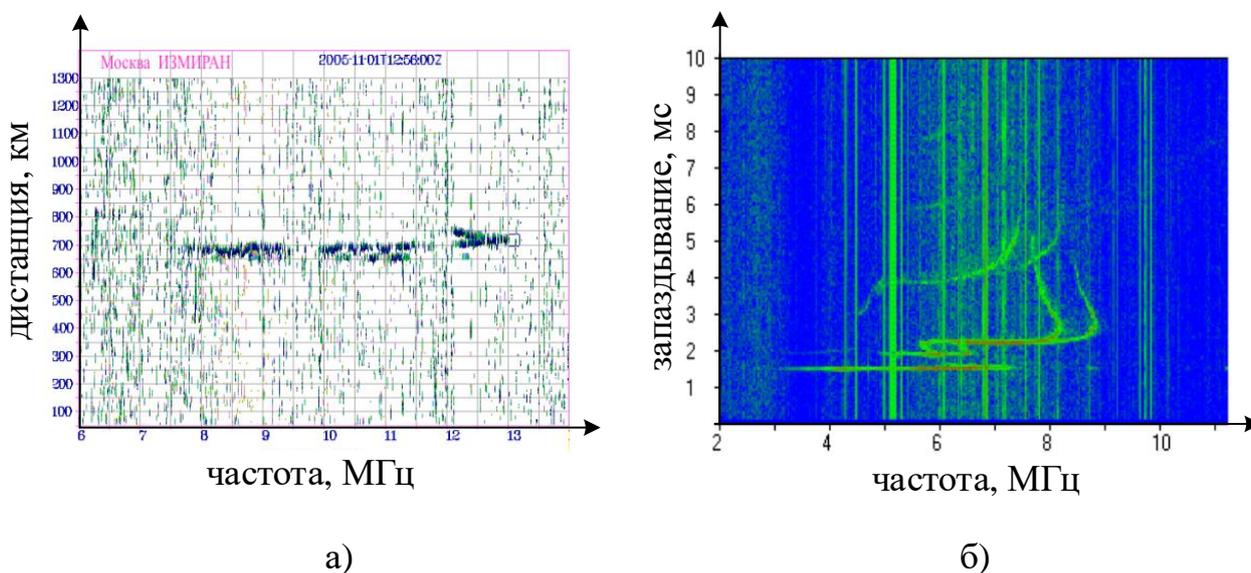


Рис. 4 – Ионограммы НЗИ: а) – с использованием простого импульсного метода, б) – на основе применения ЛЧМ-сигнала

Метод НЗИ для мониторинга ИИО возможен при проведения оценки состояния ионосферы на конкретных радиотрассах, а при использовании частного случая – ВНЗ – на любых направлениях и ограничивается лишь возможностью применения мощных передатчиков на станциях ВНЗ.

3. Радиозондирование ионосферы с искусственных спутников Земли

Радиозондирование ионосферы с искусственных спутников Земли (ИСЗ) представляет собой комплекс методов исследования ионосферы, использующих в качестве источников зондирующих сигналов аппаратуру, размещенную на космических аппаратах различного назначения и включает в себя внешнее радиозондирование ионосферы, трансionoсферное радиозондирование и радиотомографию ионосферы.

Внешнее радиозондирование является аналогом ВЗИ, но при этом используется ионозонд, установленный на ИСЗ, который дает возможность получать информацию о структуре и процессах на высотах между ИСЗ и максимумом ионосферы. При этом методе вдоль всей траектории полёта спутника могут быть получены следующие параметры: критическая частота и высота максимума слоя F2 ($f_{кр}F2$, h_mF2); изменение по высоте электронной концентрации от ИСЗ до главного максимума электронной концентрации слоя F2 – $N(h)$ -профиль. В этом случае метод внешнего радиозондирования дополняет метод ВЗИ, так как параметры распределения электронной концентрации выше h_mF2 не могут быть получены при ВЗИ. Однако при этом слой F1 и области E и D будут недоступны для изучения.

В части применения внешнего радиозондирования для мониторинга ИИО следует отметить ограниченность его применения только для определения параметров слоев ионосферы на высотах выше максимума ионизации h_mF2 , что делает его весьма ограниченным для определения параметров дециметровых радиолоний с трассами, пролегающими ниже максимума ЭК ионосферы. Кроме того, данный метод применяется все реже в связи с широким внедрением трансionoсферного радиозондирования (ТИЗ).

Примерами средств, применяемых для внешнего радиозондирования являются ранее используемые станции типа «Интеркосмос-19», «Космос-1809», «Explorer», «Alouette», аппаратура пилотируемых космических комплексов («МИР», «МКС») и челноков (Space Shuttle STS-134 «Endeavour»).

4. Трансионoсферное радиозондирование

Трансионoсферное радиозондирование направлено на изучение внутренней структуры ионосферы. Для его осуществления необходима синхронизация работы имеющихся бортового и наземного ионозондов одного типа в фиксированном диапазоне частот, заведомо перекрывающем возможные изменения частоты отсечки [30].

В [30] предложена следующая схема метода. Излучающий ионозонд располагается на борту ИСЗ, а работающая только в режиме приёма аппаратура – на Земле. Бортовой ионозонд излучает синхронно тактами два радиоимпульса, один из которых, используется для синхронизации и заполнен постоянной частотой. Его длительность $\sim 10^{-5}$ с, а частота превышает 100 МГц (использовались частоты от 136 до 138 МГц). Синхроимпульс проходит ионосферу насквозь с минимальной групповой задержкой и с возможно меньшим отклонением (за счёт рефракции) от прямой, соединяющей передатчик и приёмник.

Второй радиоимпульс длительностью от 50 до 70 мкс заполнен меняющейся от импульса к импульсу зондирующей частотой на границе диапазона радиопрозрачности ионосферы в диапазоне работы станции ВЗ. После наклонного прохождения обоими импульсами всей ионосферы в каждом такте низкочастотный импульс вследствие большой групповой задержки движется позади высокочастотного импульса, и частотная зависимость этого запаздывания (пересчитанная в километры) регистрируется приёмником на Земле в виде транс-онограммы.

Однако в последние годы наиболее широко применяется метод ТИЗ на основе приема сигналов двухчастотной спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ГЛОНАСС/GPS двухчастотной навигационной аппаратурой потребителя [34, 35]. Его работа состоит в следующем. При прохождении через ионосферу радиосигналы, излучаемые на двух несущих частотах $f_1 = 1,6$ ГГц и $f_2 = 1,2$ ГГц с космического аппарата (КА) СРНС, испытывают различные задержки $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, а также изменения фаз $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$. Они позволяют непрерывно определять по навигационным измерениям двухчастотного приемника СРНС значение полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы $N_T \sim (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)$ вдоль радиотрассы «КА СРНС – приемник СРНС» (от любого видимого КА) в любой момент t . В качестве аппаратуры может применяться любой двухчастотный приемник сигналов ГЛОНАСС/GPS, имеющий техническую возможность обработки сигналов двух частот («Trimble GNSS», «NovaTel»).

Для построения глобальных ионосферных карт абсолютного значения ПЭС (в вертикальном столбе) применяется технология GIM (Global Ionospheric Maps) [36]. Для удобства хранения и передачи карт ПЭС разработан стандартный файловый формат IONEX (стандарт файлов по технологии Global Ionospheric Maps). При этом в каждом файле IONEX мировые карты абсолютного вертикального ПЭС сопоставлены соответствующим картам погрешностей вычисления ПЭС. Считается, что вычисления проводятся в течение одних суток с разрешением по времени 2 часа.

В Российской Федерации организован Информационно-аналитический центр (ИАЦ) Федерального космического агентства, где хранятся результаты анализа навигационной информации и различные типы измерительной и справочной информации из международных систем сбора и хранения данных, полученных через информационно-телекоммуникационную сеть Интернет. Данные результаты хранятся в файлах формата RINEX (Receiver Independent Exchange Format), являющимися стандартными для данной информации. Обмен RINEX-файлами между станциями наблюдений происходит ежечасно через центры накопления данных [36]. В Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН разработан программный комплекс глобального детектирования и мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения на основе измерений вариаций полного электронного содержания [36]. Данный комплекс позволяет также производить расчет вариаций ПЭС.

Данные способы, несмотря на свое широкое применение, большой охват территории, а также предоставление имеющихся данных (файлы IONEX, RINEX) любым пользователям для обработки, не позволяют проводить опера-

тивный мониторинг ионосферы и отслеживать изменения ПЭС, вызванные мелкомасштабными неоднородностями ионосферы. Также данные способы имеют ограниченное применение при мониторинге авроральных областей, в которых состояние ионосферы изменяется быстрее, чем период обновления данных в файлах форматов IONEX и RINEX.

Способ определения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы (с учетом ее неоднородностей) по данным двухчастотного радионавигационного приемника базируется на использовании формулы [35]:

$$N_T = \frac{1}{40,3} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2], \quad (6)$$

где f_1, f_2 – несущие частоты сигналов; L_1, L_2 – число оборотов фазы сигналов; $\lambda_1 = c / f_1, \lambda_2 = c / f_2$ – длины волн; c – скорость света в вакууме.

Исходными данными для расчета ПЭС ионосферы (N_T) согласно (6) являются значения числа оборотов фазы (L_1 и L_2) на рабочих частотах СРНС (f_1, f_2), которые зависят от состояния ионосферы. Произведение $L_{1,2} \cdot \lambda_{1,2}$ в формуле (6) определяется как

$$L_{1,2} \cdot \lambda_{1,2} = R - \frac{40,3}{f_{1,2}^2} N_T, \quad (7)$$

где R – истинная дальность от навигационного спутника до приемника.

Произведение $L_{1,2} \cdot \lambda_{1,2}$ есть фазовый путь $R_\phi = \psi(N_T)$ распространения радиоволны в ионосфере (или псевдодальность, измеренная по фазе) на рабочих частотах КА (f_1, f_2).

Фазовый путь РРВ на двух частотах f_1 и f_2 (или фазовых измерений) можно рассчитать по формулам:

$$R_{\phi 1} = R - 40,4 N_T / f_1^2 c, \quad (8)$$

$$R_{\phi 2} = R - 40,4 N_T / f_2^2 c. \quad (9)$$

По результатам измерений фазовых путей $R_{\phi 1,2}$ на двух частотах f_1 и f_2 можно рассчитать ПЭС по формуле:

$$N_T = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,4(f_1^2 - f_2^2)} [R_{\phi 1} - R_{\phi 2}]. \quad (10)$$

Таким образом, согласно (8) – (10) формирование в СРНС разности псевдодальностей (фазовых путей), измеренных на двух частотах, фактически эквивалентно определению полной интегральной концентрации ионосферы.

В условиях диффузности ионосферы возрастает интенсивность неоднородностей β_n , и пренебрегать мелкомасштабными флуктуациями ЭК нецелесообразно. В этом случае пространственные (по вертикальным h и горизонтальным $\rho = (x, y)$ координатам) неоднородности ЭК будут иметь регулярную $\langle N(h) \rangle$ и флуктуационную $\Delta N(\rho, h)$ составляющие, и ПЭС вдоль линии распространения радиоволны будет описываться выражением [37]:

$$\begin{aligned}
 N_T &= \int_0^{\infty} N(\rho, h) dh = \int_0^{\infty} (\langle N(h) \rangle + \Delta N(\rho, h)) dh = \\
 &= \int_0^{\infty} \langle N(h) \rangle dh + \int_0^{\infty} \Delta N(\rho, h) dh = \langle N_T \rangle + \Delta N_T(\rho).
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Регулярная составляющая ПЭС $\langle N_T \rangle$ при этом определяется максимальным средним значением ЭК в ионосфере $\langle N_m \rangle \equiv \langle N(h_m) \rangle$ и ее эквивалентной толщиной h_3 :

$$\langle N_T \rangle = \langle N_m \rangle \cdot h_3,
 \tag{12}$$

а СКО флуктуаций ПЭС ионосферы $\Delta N_T(\rho)$ определяется как [38]

$$\sigma_{\Delta N_T} = \sqrt{\langle \Delta N_T^2(\rho) \rangle} = \beta_n \langle N_m \rangle (\sqrt{\pi} l_s h_3)^{0,5} = \beta_n \langle N_T \rangle (\sqrt{\pi} l_s / h_3)^{0,5}.
 \tag{13}$$

В соответствии с (13) интенсивность неоднородностей ионосферы связана со статистическими характеристиками ПЭС выражением [37, 39]

$$\beta_n = \frac{\sigma_{\Delta N_T}}{\langle N_T \rangle} \left(\frac{h_3}{\sqrt{\pi} l_s} \right)^{0,5}.
 \tag{14}$$

Основываясь на (11) – (14) метод ТИЗ позволяет производить [35]:

1) измерение согласно (10) в различные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n множества значений ПЭС ионосферы $N_T(t_1), N_T(t_2) \dots N_T(t_n)$ на трассе от КА СРНС до двухчастотного (ДЧ) приемника СРНС (рис. 5), которые соответствуют различным углам $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ возвышения (места) радиотрасс;

2) расчет согласно (11) – (13) в каждый момент времени t_n среднего значения ПЭС $\langle N_T(t_n) \rangle$, СКО флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(t_n)$ и интенсивности неоднородностей $\beta_n(t_n)$;

3) расчет интенсивности неоднородностей ионосферы (14) с учетом справочных значений эквивалентной толщины ионосферы h_3 и характерного масштаба неоднородностей l_s для каждого момента времени: $\beta_n(t_n)$;

4) расчет по навигационным сообщениям принимаемых сигналов в каждый момент времени t_n соответствующего угла α_n возвышения (места) радиотрассы, среднего значения ПЭС ионосферы на этой трассе

$$\langle N_T(t_n) \rangle = \langle N_T(\alpha_n) \rangle = \int_0^{\infty} \langle N(h, \alpha_n) \rangle dh;$$

среднего значения ПЭС ионосферы на этой

$$\text{трассе } \langle N_T(t_n) \rangle = \langle N_T(\alpha_n) \rangle = \int_0^{\infty} \langle N(h, \alpha_n) \rangle dh \approx \operatorname{cosec} \alpha_n \int_0^{\infty} \langle N(h) \rangle dh;$$

4) восстановление высотного (вертикального) профиля среднего значения ЭК ионосферы $\langle N(h) \rangle$;

5) расчет ионосферных параметров на каждой из трасс: высоты $h_m(\alpha_n)$ и величины максимума ионизации $\langle N_m(\alpha_n) \rangle$ слоя F ионосферы;

б) расчет критической частоты отражения ионосферы на каждой из трасс $f_{кр}(\alpha_n) = \sqrt{80,8 \langle N_m(\alpha_n) \rangle}$;

7) расчет максимальной применимой частоты (МПЧ) декаметровый радиолинии $f_{МПЧ} = f_{кр}(\alpha_n) \sec \psi_0$ при падении волны на область ионосферы с критической частотой $f_{кр}(\alpha_n)$ под углом ψ_0 .

Кратко суть работы метода ТИЗ с использованием одного КА СРНС описывает рис. 5.

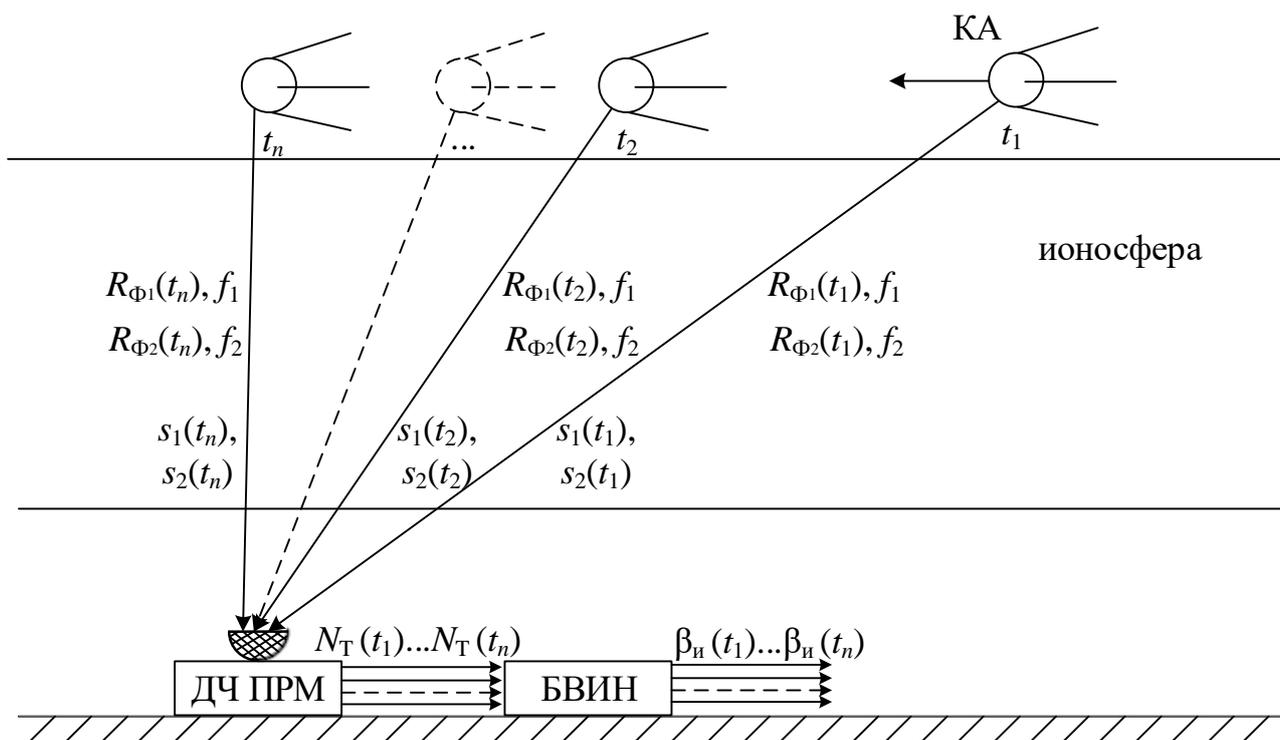


Рис. 5 – Схема метода трансionoсферного зондирования с одним КА СРНС

КА СРНС при движении по орбите формирует и передает в различные моменты времени (t_1, t_2, \dots, t_n) в направлении двухчастотного приемника СРНС (ДЧ ПРМ) сигналы $(s_1$ и $s_2)$ на двух частотах $(f_1$ и $f_2)$, содержащие навигационные сообщения. В каждом навигационном сообщении содержится информация, позволяющая определить фазовые пути R_{ϕ_1} и R_{ϕ_2} на частотах f_1 и f_2 соответственно. На основании этих измерений в ДЧ ПРМ согласно (10) определяются значения ПЭС $(N_T(t_1) \dots N_T(t_n))$ в моменты времени t_1, \dots, t_n . Измеренные значения ПЭС поступают на вход блока вычисления интенсивности неоднородностей (БВИН), в котором согласно (11) – (14) определяется значение β_n в различные моменты времени $(\beta_n(t_1) \dots \beta_n(t_n))$.

На основе полученных данных об интенсивности неоднородностей ионосферы в [37, 39] разработан способ обнаружения и пеленгации ИИО путем измерения интенсивности мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на трассах распространения радиоволн $\beta_n(\alpha_n)$ от нескольких навигационных космических аппаратов до ДЧ ПРМ СРНС по сигналам $s_{1,2}(\alpha_n)$ от каждого из них

(рис. 6). В ДЧ ПРМ с БВИН производятся вычисления (10) – (14), сравниваются полученные значения β_n на каждой из трасс с пороговым значением $\beta_n^{\text{пор}}$ и определяются номера (n) КА, на трассах РРВ которых определены надпороговые ($\beta_n(\alpha_n) \geq \beta_n^{\text{пор}}$) значения интенсивности неоднородностей. После этого из навигационных сообщений КА с этими номерами определяются углы их места $\Delta\alpha^{\text{ИИО}}$ и азимуты $\Delta\gamma^{\text{ИИО}}$ для оперативного определения пеленгов сектора нахождения ИИО.

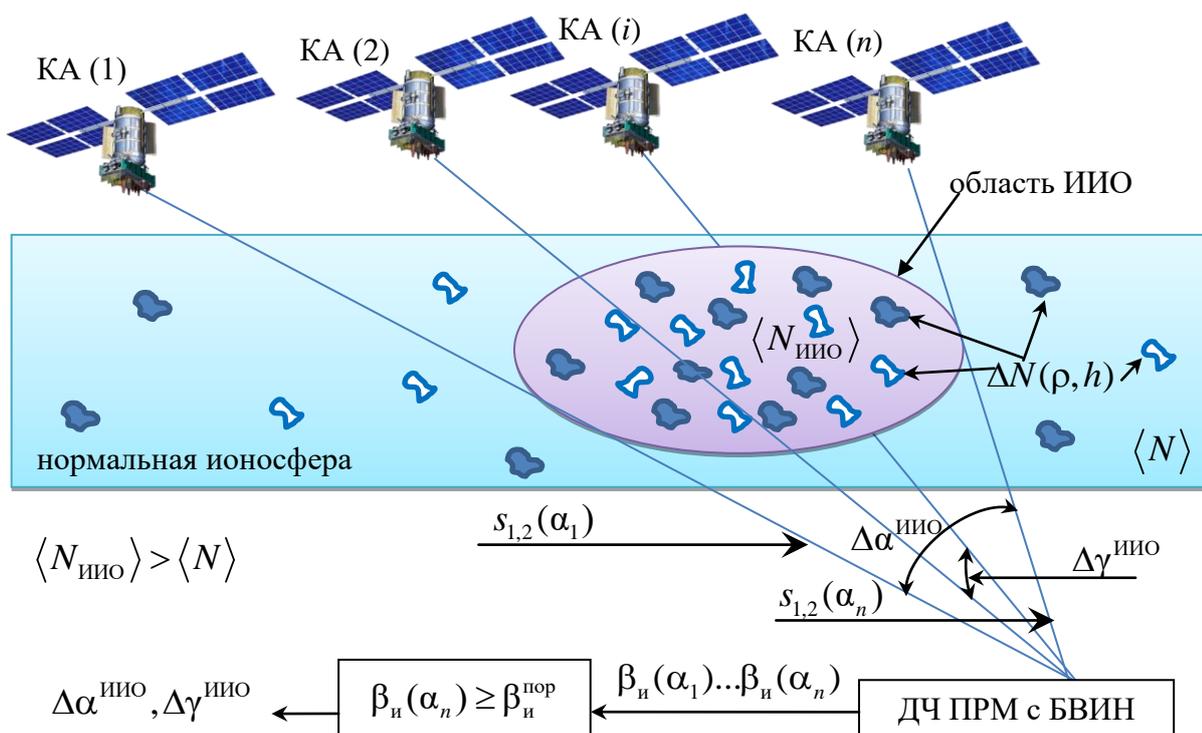


Рис. 6 – Иллюстрация способа обнаружения и пеленгации ИИО

Метод ТИЗ с использованием сигналов СРНС может применяться как для мониторинга состояния ионосферы с целью пеленгации ИИО и количественной оценки параметров ИИО ($\beta_n(\alpha_n)$), так и для прогнозирования качества каналов связи, проходящих через ИИО [40] (в том числе и декаметровых, в соответствии с выражениями (3) – (5)). Также ТИЗ позволяет при восстановлении профиля ЭК ионосферы определить критическую частоту $f_{кр}(\alpha_n) = \sqrt{80,8 \langle N_m(\alpha_n) \rangle}$ ионосферы, рассчитать МПЧ $f_{МПЧ} = f_{кр}(\alpha_n) \sec \psi_0$ и произвести выбор оптимальной рабочей частоты $f_{орч} \approx 0,8 f_{МПЧ}$, произвести измерение интенсивности неоднородностей β_n в соответствии с выражением (14), рассчитать на его основе СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе из ионосферы $\sigma_\varphi = \psi(\beta_n, f_0)$ согласно (2) и параметры декаметровых радиолиний (3) – (5): глубину замираний γ^2 , интервалы частотной ΔF_k и пространственной Δr_k корреляции. Следовательно, метод ТИЗ обладает такими же возможностями, как и

метод ВЗИ, однако не требует передающей аппаратуры. Средства мониторинга ионосферы при этом обладают небольшими массогабаритными характеристиками и обеспечивают зондирование ионосферы в радиусе около 1000 км от места размещения приемника.

5. Радиотомография ионосферы

Методы радиотомографии ионосферы служат для определения радиотомографических разрезов ионосферы и трёхмерных распределений электронной концентрации ионосферы. Более подробно принципы радиотомографии описаны в [41].

Радиотомографическое просвечивание ионосферы позволяет решать ряд научных и прикладных задач:

- 1) мониторинг пространственного распределения и динамики изменения электронной концентрации в ионосфере во времени;
- 2) определение региональных особенностей вариации поля электронной концентрации в ионосфере для уточнения существующих ионосферных моделей;
- 3) изучение эволюции и определение механизмов формирования неоднородностей электронной концентрации в ионосфере.

В радиотомографии ионосферы используются [41]:

- 1) методы низкоорбитальной радиотомографии (с ИСЗ типа «Космос», «Транзит», «FORMOSAT-3/COSMIC») на частотах 150 – 400 МГц;
- 2) методы высокоорбитальной радиотомографии (с использованием сигналов любых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou (Compass), IRNSS, QZSS);
- 3) методы использования в радиотомографических реконструкциях сигналов между низкоорбитальными спутниками различного назначения и сигналами глобальной навигационной спутниковой системы – использование так называемых радиозатменных схем;
- 4) методы восстановлений профилей электронной концентрации на основе применения алгоритмов однопозиционного радиопросвечивания.

В целом, стоит отметить, что методы радиотомографии ионосферы весьма схожи с методами, применяемыми при ТИЗ. Однако приемники сигналов при радиотомографии могут также располагаться и на КА, при этом трассы зондирования «спутник – спутник» позволяют проводить измерения параметров ионосферы на различных «разрезах». Данный вид получил название квазикасательного зондирования ионосферы.

Радиотомографические методы позволяют также, как и ТИЗ на основе восстановленных профилей ЭК ионосферы определить критические частоты для слоев ионосферы, рассчитать МПЧ и произвести выбор оптимальных рабочих частот. Но для их реализации требуется распределенная сеть из ИСЗ, оснащенных специализированной приемо-передающей аппаратурой, что не позволяет широко использовать этот метод.

6. Риометрический метод

Риометрический метод является пассивным и основан на приеме сигналов от звезд, имеющих стабильный характер излучаемых с некоторой, заранее известной периодичностью, сигналов. Использование риометров позволяет диагностировать активность электромагнитного излучения и потоков энергичных протонов Солнца. Изучение процесса высыпания заряженных частиц из магнитосферы в атмосферу Земли позволяет решать задачи, связанные с поступлением энергии солнечного ветра в околоземное космическое пространство, а также процессы, происходящие внутри магнитосферы. Применение цепочки риометрических станций позволяет исследовать пространственно-временную структуру D-области ионосферы, учесть неотклоняющее поглощение.

Риометрический метод не позволяет оценить быстроменяющиеся параметры неоднородной ионосферы, что делает невозможным его применение для определения параметров декаметровых радиолиний.

Кроме перечисленных выше применяют также и некоторые другие радиоволновые средства контроля состояния ионосферы: радары некогерентного (Иркутский радар) и когерентного рассеяния (SuperDARN), радары полярных сияний, радары частичных отражений. Эти методы на практике применяются реже остальных, техника порой используется в единичном экземпляре.

Заключение

В статье проведен анализ возможностей существующих средств и систем мониторинга ионосферы, применяемых для получения информации о состоянии ионосферы (среды распространения) и каналов связи (декаметровых радиолиний) с целью определения перспектив их развития в области измерения статистических параметров ионосферы и радиолиний, а также применения полученных данных для проектирования перспективных адаптивных систем декаметровой радиосвязи.

Обзор способов и средств, применяющихся для зондирования ионосферы (в том числе в интересах декаметровой радиосвязи), позволил сделать следующие выводы.

1. Для проектирования адаптивных систем декаметровой радиосвязи в настоящее время применяются данные о критических частотах слоев ионосферы, получаемые из ионограмм (при ВЗИ и НЗИ) и при восстановлении профиля ЭК при ТИЗ. Полученные данные позволяют произвести расчет МПЧ и на его основе осуществить выбор оптимальной для конкретной радиолинии рабочей частоты.

2. Существующие возможности по измерению параметров декаметровых радиолиний используются не в полном объеме. По результатам мониторинга ионосферы адаптация декаметровых радиолиний и радиосетей в настоящее время производится только лишь путем выбора оптимальной рабочей частоты по данным зондирования и с учетом помеховой обстановки в каналах связи на фиксированных рабочих частотах [22-27]. Адаптация по характеристикам и параметрам разнесения антенн, скорости передачи, ширине спектра, сигнально-

кодовым конструкциям производится по результатам измерения параметров принимаемых сигналов, а не мониторинга ионосферы.

3. При применении расширенных возможностей по мониторингу ионосферы и применению его результатов для определения статистических параметров декаметровых радиолиний (определение γ^2 , ΔF_k , $\Delta \rho_k$) при проектировании перспективных средств радиосвязи декаметрового диапазона для построения радиолиний и радиосетей позволит применять комбинированные методы адаптации с целью снижения дополнительного влияния как общих, так и селективных замираний (ЧСЗ и ПСЗ) на помехоустойчивость и обеспечение требуемой (либо максимально возможной для текущих условий) помехоустойчивости путем выбора сигнально-кодовых конструкций при известной глубине общих замираний γ^2 .

4. В интересах мониторинга параметров декаметровых радиолиний возможно применение средств ВЗИ, НЗИ и ТИЗ как наиболее распространенных, имеющих возможность мобильного исполнения и позволяющих определить на основе измерения статистических параметров ионосферы (β_i , σ_f) статистические параметры декаметровых радиолиний (γ^2 , ΔF_k , $\Delta \rho_k$). Средства радиотомографии, риометрии и внешнего радиозондирования с ИСЗ не в полном объеме позволяют провести данные измерения.

Проведенный анализ показал, что в целом в Российской Федерации в различных ведомствах применяется довольно широкий спектр средств, позволяющих проводить измерения основных параметров ионосферы. Но имеющийся для этих целей инструментарий разрознен.

Измерения параметров неоднородной ионосферы (в том числе возмущенной), декаметровых радиолиний (в том числе проходящих через искусственное ионосферное образование) в настоящее время имеющимися средствами проводится весьма ограниченно. Так, имеющиеся в настоящее время средства зондирования ионосферы позволяют оперативно в процессе измерений получать значения электронной концентрации ионосферы, строить профили электронной концентрации и высотно-частотных характеристик ионосферы для осуществления адаптации радиолиний по значению рабочей частоты. Это не в полной мере позволяет получать набор параметров, необходимых для проектирования перспективных адаптивных систем радиосвязи с целью адаптации по ширине спектра ΔF_c и разнесу антенн $\Delta \rho_a$ (путем определения интервалов частотной ΔF_k и пространственной $\Delta \rho_k$ корреляции замираний в декаметровых радиолиниях), выбор оптимальных сигналов или параметров кода для обеспечения требуемой помехоустойчивости (на основе определения параметра глубины замираний γ^2).

Наиболее перспективными с точки зрения получения информации о состоянии ионосферы и определения параметров каналов связи (декаметровых радиолиний) являются средства, использующие вертикальное и трансionoсферное зондирование, обладающие широким спектром решаемых задач, автономностью и возможностью компактного размещения.

Литература

1. Ступницкий М. М., Харитонов Н. И., Девяткин Е. Е. Инфокоммуникационная инфраструктура цифровой экономики: задачи отраслевого института // Электросвязь. 2018. № 4. С. 49-54.
2. Благовещенская Н. Ф. Геофизические аспекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. – СПб: ГНЦ РФ ААНИИ, 2002. – 316 с.
3. Макаренко С. И. Использование космического пространства в военных целях: современное состояние и перспективы развития систем информационно-космического обеспечения и средств вооружения // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 161-213.
4. Ерухимов Л. М. Ионосфера Земли как космическая плазменная лаборатория // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 4. С. 71-77.
5. Ерухимов Л. М., Генкин Л. Г. Ионосфера как плазменная лаборатория // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1992. Т. 35. №11/12. С. 363-387.
6. Zawdie K. A., Huba J. D. Can HF heating generate ESF bubbles? // Geophysical research letters. 2014. № 41. P. 8155-8160. Doi: 10.1002/2014GL062293.
7. Starodubtsev M. V., Nazarov V. V. Gushchin M. E., Kostrov A. V., Laboratory modeling of ionospheric heating experiments // Journal of geophysical research: Space physics. 2016. № 121. P. 10481-10495. Doi: 10.1002/2015JA021898.
8. Быстров Р. П., Дмитриев В. Г., Перунов Ю. М., Рябошапка В. А. Геофизические возмущения в ионосфере, создаваемые естественным и искусственным путем, как источник мощного воздействия в природе // Вестник Академии военных наук. 2016. № 4 (57). С. 142-156.
9. Военная доктрина Российской Федерации, утверждена Президентом Российской Федерации 25.12.2014г. №Пр-2976 // Российская газета. № 6570. 2014. С. 1-2.
10. Bernard J. Eastlund. Method and apparatus for altering a region in the Earth's atmosphere, ionosphere, and/or magnetosphere // Patent USA № 4686605. Publ. Aug. 11. 1987.
11. Ronald M. Bass. Creation of artificial ionization clouds above the Earth // Patent USA № 4999637. Publ. Mar. 12. 1991.
12. Bernard J. Eastlund, Simon Ramo. Method and apparatus for creating an artificial electron cyclotron heating region of plasma // Patent USA № 4712155. Publ. Dec. 8. 1987.
13. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Ритвельд М. Т., Черняков С. М., Швец М. В. Изменение высокоширотной ионосферы при нагреве мощной коротковолновой установки EISCAT/Heating по данным спутника ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2018. Т. 21. № 1. С. 170-181.

14. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере, вызванные воздействием мощного нестационарного излучения // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18. № 1. С. 49-64.

15. Фролов В. Л. Об особенностях воздействия мощными радиоволнами с Х-поляризацией на ионосферу Земли и наблюдаемых при этом эффектах // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2012. Т. 15. № 1-2. С. 122-139.

16. Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Пластинин Ю. А., Карабаджак Г. Ф., Фролов В. Л., Парро М. Авроральная активность, вызванная мощным радиоизлучением станда «СУРА» // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 1. С. 46-52.

17. Floatin' Smokey: The USA's SBX Radar // Defense Industry Daily. 2018. August 17. URL: <https://www.defenseindustrydaily.com/floatin-smokey-the-usas-sbx-radar-04804> (дата обращения: 23.03.2020).

18. Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Калишин А. С. Прогнозирование условий распространения декаметровых радиоволн в арктическом регионе // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 78-86.

19. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели транзионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи. – Самара: ПГАТИ, 2006 – 357 с.

20. Пашинцев В. П., Омельчук А. В., Коваль С. А., Галушко Ю. И. Метод определения величины интенсивности неоднородностей по данным ионосферного зондирования // Двойные технологии. 2009. № 1. С. 38-41.

21. Пашинцев В. П. Методы построения структурно-физических моделей транзионосферных радиоканалов и их применение для анализа помехоустойчивости систем космической связи. Дис. ... докт. техн. наук. – Самара: ПГАТИ, 2006. – 466 с.

22. Пенин П. И. Системы передачи цифровой информации. – М.: Советское радио, 1976. – 368 с.

23. Кейстович А. В., Белоусов Е. Л. Система автоматического управления коротковолновой связью // Патент на изобретение RU № 2 564 993 С1. опубл. 10.10.2015, бюл. №28.

24. Брянцев В. Ф., Птицын А. С. Способ адаптивной радиосвязи в ДКМВ-диапазоне // Патент на изобретение RU № 2 401 511 С2. опубл. 10.10.2010, бюл. № 28.

25. Кейстович А. В., Измайлова Я. А. Система коротковолновой радиосвязи // Патент на изобретение RU № 2 622 902 С1. опубл. 21.06.2017, бюл. №18.

26. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. Повышение эффективности функционирования декаметровых линий связи // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. №2. С. 4-10.

27. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхузкополосных декаметровых радиолний // Морская радиоэлектроника. 2015. №2 (52). С. 16-22.

28. Кириллов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. – М.: Связь, 1971. – 256 с.

29. Березовский В. А., Дулькейт И. В., Савицкий О. К. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы. М.: Радиотехника, 2011. – 444 с.

30. РД 52.26.817 – 2015. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть I. Ионосферные наблюдения. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2015. – 199 с.

31. Калинин А. И., Черенкова Л. Е. Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Связь, 1971. – 439 с.

32. Пашинцев В. П., Колосов Л. В., Тишкин С. А., Антонов В. В. Применение теории фазового экрана для разработки модели однокачкового декаметрового канала связи // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 1. С. 21-26.

33. Пашинцев В. П., Тишкин С. А., Смирнов А. А., Боровлев И. И. Эквивалентный путь распространения декаметровой волны в сферическислоистой ионосфере // Журнал радиоэлектроники. 2001. № 8. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug01/1/text.html> (дата обращения 12.10.2020).

34. Перевалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений методом транзионосферного GPS-зондирования. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Иркутск: ФГБУН ИСЗФ СО РАН, 2014. – 286 с.

35. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.

36. Скрипачев В. О. Программный комплекс для обработки данных ионосферных измерений // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 213-216.

37. Пашинцев В. П., Коваль С. А., Стрекозов В. И., Ляхов А. В. Обнаружение и пеленгация искусственных ионосферных образований с помощью спутниковых радионавигационных систем. // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 1. С. 88-93.

38. Пашинцев В. П., Солчатов М. Э., Гахов Р. П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации. Монография. – М: Физматлит, 2006. – 184 с.

39. Пашинцев В. П., Чипига А. Ф., Коваль С. А., Стрекозов В. И., Зинкин А. А., Горжий В. А., Катков К. А., Ляхов А. В. Устройство обнаружения ионосферных образований с мелкомасштабными неоднородностями // Патент на полезную модель RU №154138 U1. опубл. 20.08.2015, бюл. №23.

40. Коваль С. А., Стрекозов В. И., Ахмадеев Р. Р. О возможности прогнозирования качества каналов связи с помощью транзионосферного зондирования // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2015. Т. 5. № 2. С. 196-200.

41. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.

References

1. Stupnitskiy M. M., Kharitonov N. I., Devyatkin E. E. The Branch-Wise Institute's Tasks Of Creation Of Digital Economy Infrastructure. *Electrosvyaz*, 2018, no. 4, pp. 49-54 (in Russian).
2. Blagoveshchenskaya N. F. *Geofizicheskie aspekty aktivnyh vozdeystvij v okolozemnom kosmicheskom prostranstve*. Dis. dokt. fiz.-mat. nauk. [Geophysical aspects of active influences in near-earth space. D.Sc. Tesis]. Saint-Petersburg, Russian State scientific center – Arctic and Antarctic research institute, 2002. 316 p. (in Russian).
3. Makarenko S. I. Information-Space Systems and Space Weapons – Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 4, pp. 161-213 (in Russian).
4. Eruhimov L. M. Ionosfera Zemli kak kosmicheskaya plazmennaya laboratoriya [Earth ionosphere as space plasma laboratory]. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal* [Soros educational magazine], 1998, no. 4, pp. 71-77 (in Russian).
5. Eruhimov L. M., Genkin L. G. Ionosfera kak plazmennaya laboratoriya [Ionosphere as plasma laboratory]. *Radiophysics and quantum electronics*, 1992, vol. 35, no. 11/12, pp. 363-387 (in Russian).
6. Zawdie K. A., Huba J. D. Can HF heating generate ESF bubbles? *Geophysical research letters*, 2014, no. 41, pp. 8155-8160. Doi:10.1002/2014GL062293.
7. Starodubtsev M. V., Nazarov V. V., Gushchin M. E., Kostrov A. V., Laboratory modeling of ionospheric heating experiments. *Journal of geophysical research: Space physics*, 2016, no. 121, pp. 10481-10495. DOI:10.1002/2015JA021898.
8. Bystrov R. P., Dmitriev V. G., Perunov YU. M., Ryaboshapko V. A. Geofizicheskie vozmushcheniya v ionosfere, sozdavaemye estestvennym i iskusstvennym putem, kak istochnik moshchnogo vozdeystviya v prirode [The geophysical indignations in an ionosphere created in the natural and artificial way as a source of powerful influence in the nature]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2016, no. 4 (57), pp. 142-156 (in Russian).
9. Military doctrine of the Russian Federation, approved as the President of the Russian Federation 25.12.2014 no. Ord-2976. *Rossiiskaia hazeta* [Russian Newspaper], 2014, no. 6570, pp. 1-2 (in Russian).
10. Bernard J. Eastlund. *Method and apparatus for altering a region in the Earth's atmosphere, ionosphere, and/or magnetosphere*. Patent USA, no. 4686605, 1987.
11. Ronald M. Bass. *Creation of artificial ionization clouds above the Earth*. Patent USA, no. 4999637, 1991.
12. Bernard J. Eastlund, Simon Ramo. *Method and apparatus for creating an artificial electron cyclotron heating region of plasma*. Patent USA, no. 4712155, 1987.
13. Tereshchenko E. D., Milichenko A N., Ritvel'd M. T., Chernyakov S. M., Shvec M. V. Izmenenie vysokoshirotnoj ionosfery pri nagreve moshchnoj korotkovolnovoj ustanovki EISCAT/Heating po dannym sputnika GLONASS i

radara nekogerentnogo rasseyaniya [Change of the High-Latitude Ionosphere During Heating by a Powerful Short Radio Wave of the EISCAT/Heating Complex According to Signals of the GLONASS Satellite and the Incoherent Scattering Radar]. *Vestnik of MSTU*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 170-181 (in Russian).

14. Chernogor L. F. Krupnomasshtabnye vozmushcheniya v nizhnej ionosfere, vyzvannye vozdejstviem moshchnogo nestacionarnogo [The large-scale indignations in the lower ionosphere caused by influence of powerful non-stationary radiation]. *Radio physics and radio astronomy*, 2013, vol. 18, no. 1, pp. 49-64 (in Russian).

15. Frolov V. L. Ob osobennostyah vozdejstviya moshchnymi radiovolnami s X-polyarizaciej na ionosferu Zemli i nablyudaemyh pri etom effektah [About features of influence by powerful radio waves with X-polarization on an ionosphere of Earth and the effects observed at the same time]. *Radiophysics and quantum electronics*, 2012, vol. 15, no. 1–2, pp. 122-139 (in Russian).

16. Ruzhin YU. YA., Kuznecov V. D., Plastinin YU. A., Karabadzhak G. F., Frolov V. L., Parro M. Avroral'naya aktivnost', vyzvannaya moshchnym radioizlucheniem stenda «SURA» [The Avroralny activity caused by a powerful radio emission of the SURA stand]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 46-52 (in Russian).

17. Floatin' Smokey: The USA's SBX Radar. *Defense Industry Daily*, 2018, August 17. Available at: <https://www.defenseindustrydaily.com/floatin-smokey-the-usas-sbx-radar-04804> (accessed 23 march 2020).

18. Borisova T. D., Blagoveshchenskaya N. F., Kalishin A. S. *Prognozirovanie usloviy rasprostraneniya dekametrovykh radiovoln v arkticheskom regione* [Forecasting of conditions of distribution of decameter radio waves in the Arctic region]. *Arctic and Antarctic Research*, 2017, no. 3 (113), pp. 78-86 (in Russian).

19. Maslov O. N., Pashincev V. P. *Modeli transionosfernykh radiokanalov i pomekhoustojchivost' sistem kosmicheskoy svyazi* [Models of transionospheric radio channels and noise stability of systems of space communication]. Samara, Volga region state academy of telecommunications and informatics Publ., 2006. 357 p. (in Russian).

20. Pashintsev V. P., Omelshuk A. V., Koval S. A., Galushko Yu. I. Method of Irregularity Intensity Value Determination According to Ionosphere Sounding. *Dual technology*, 2009, no. 1, pp. 38-41 (in Russian).

21. Pashincev V. P. *Metody postroeniya strukturno-fizicheskikh modeley transionosfernykh radiokanalov i ikh primenenie dlya analiza pomekhoustoychivosti sistem kosmicheskoy svyazi*. Dis. dokt. tekhn. nauk. [Methods for constructing structural-physical models of transionospheric radio channels and their application for analyzing the noise immunity of space communication systems. D.Sc. Tesis]. Samara, Volga region state academy of telecommunications and informatics, 2006. 466 p. (in Russian).

22. Penin P. I. *Sistemy peredachi tsifrovoy informatsii* [Digital transmission systems]. Moscow, Sovyetskoe radio Publ., 1976. 368 p. (in Russian).

23. Keystovich A. V., Belousov E. L. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya korotkovolnovoi svyaz'u* [System of automatic control of short-wave communication]. Patent Russia, no. 2564993 C1, 2015.

24. Bryantsev V. F., Ptitsyn A. S. *Sposob adaptivnoy radiosvyazi v DKMV-diapazone* [Way of an adaptive radio communication in the decameter range]. Patent Russia, no. 2401511 C2, 2010.

25. Keystovich A. V., Izmaylova Ya. A. *Sistema korotkovolnovoï svyazi* [System of a short-wave radio communication]. Patent Russia, no. 2622902 C1, 2017.

26. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. *Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya dekametrovykh liniy svyazi* [Increase in efficiency of functioning of decameter communication lines]. *T-comm*, 2015, no. 2, pp. 4-10 (in Russian).

27. Nikolashin Yu. L., Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. *Kognitivnaya sistema svyazi i vliyanie ispol'zovaniya dannykh monitoring na pomekhoustoichivost' sverkhuzkopolostnykh dekametrovykh radiolinii* [The cognitive communication system and influence of use of the supernarrow-band decameter radio lines given monitoring on noise stability]. *Marine Radio electronics*, 2015, no. 2 (52), pp. 16-22 (in Russian).

28. Kirillov N. E. *Pomekhoustoichivaya peredacha soobshcheniy po lineynym kanalam so sluchayno izmenyayushchimisya parametrami* [Noise-immune transmission of messages over linear channels with randomly changing parameters]. Moscow, Svyaz Publ., 1971. 256 p. (in Russian).

29. Berezovskiy V. A., Dulkey I. V., Savitskiy O. K. *Sovremennaya dekametrovaya radiosvyaz: oborudovaniye, sistemy i komplekсы* [Modern decameter radio communication: equipment, systems and complexes]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2011. 444 p. (in Russian).

30. RD 52.26.817 – 2015. *Rukovodstvo po ionosfernym, magnitnym i geliogeofizicheskim nablyudeniyam. Chast' 1. Ionosfernye nablyudeniya* [Guide to ionospheric, magnetic and heliogeophysical observations. Part I. Ionospheric observations]. Obninsk, Federal state budgetary institution Russian Research Institute of hydrometeorological information - World data center Publ. 2015. 199 p. (in Russian).

31. Kalinin A. I., Cherenkova L. E. *Rasprostraneniye radiovoln i rabota radiolinij* [Distribution of radio waves and work of radio lines]. Moscow, Svyaz Publ., 1971. 439 p. (in Russian).

32. Pashintsev V. P., Kolosov L. V., Tishkin S. A., Antonov V. V. Application of the Phase-Screen Theory for Developing a Model of a One-Hop Decameter Communication Link. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1996, vol. 41, no. 1, pp. 21-26 (in Russian).

33. Pashintsev V. P., Tishkin S. A., Smirnov A. A., Borovlev I. I. *Ekvivalentniy put' rasprostraneniya dekametrovoyoï volny v sfericheskisloistoy ionosphere* [Equivalent way of distribution of a decameter wave in a spherically layered ionosphere]. *Journal of radio electronics*, 2001, no. 8. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/aug01/1/text.html> (accessed 12 October 2020). (in Russian).

34. Perevalova N. P. *Issledovanie ionosfernykh vozmushchenij metodom transionosfernogo GPS-zondirovaniya*. Dis. dokt. fiz.-mat. nauk. [Research of ionospheric indignations of method of transionospheric GPS sounding. D.Sc. Tesis].

Irkutsk, Federal state budgetary institution of science Institute of Solar and Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014. 286 p. (in Russian).

35. Afrajmovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verhnej atmosvery Zemli* [GPS monitoring of the top atmosphere of Earth]. Irkutsk, Public institution Scientific center of the East Siberian scientific center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006. 480 p. (in Russian).

36. Skripachev V. O. Programmnyj kompleks dlya obrabotki dannyh ionosfernyh izmerenij [Program complex for data processing of ionospheric measurements]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2013, no. 4, pp. 213-216 (in Russian).

37. Pashincev V. P., Koval S. A., Strekozov V. I., Lyahov A. V. Artificial Ionospheric Buildup Detection and Direction Finding by Means of Satellite Navigation Systems. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2014, no. 1, pp. 88-93 (in Russian).

38. Pashincev V. P., Solchatov M. E., Gakhov R. P. *Vliyanie ionosfery na kharakteristiki kosmicheskikh system peredachi informatsii* [Influence of the ionosphere on the characteristics of space information transmission systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 184 p. (in Russian).

39. Pashincev V. P., Chipiga A. F., Koval S. A., Strekozov V. I., Zinkin A. A., Gorzhij V. A., Katkov K. A., Lyahov A. V. *Ustrojstvo obnaruzheniya ionosfernyh obrazovanij s melkomasshtabnymi neodnorodnostyami* [The device of detection of ionospheric formations with small-scale not uniformity]. Patent Russia on useful model, no. 154138, 2015.

40. Koval S. A., Strekozov V. I., Akhmadeev R. R. O vozmozhnosti prognozirovaniya kachestva kanalov svyazi s pomoshchyu transionosferного zondirovaniya [About possibility of predicting the quality of communication channels using transionospheric sounding]. *REDS: Telekommunikatsionnye ustroystva i sistemy*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 196-200 (in Russian).

41. Kunicyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. *Radiotomografiya ionosfery* [Ionosphere radio tomography]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 336 p. (in Russian).

Статья поступила 9 апреля 2020 г.

Информация об авторе

Коваль Станислав Андреевич – кандидат технических наук. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг параметров ионосферы в интересах декаметрового связи. E-mail: _bober_@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Ionospheric monitoring for the benefit of perspective adaptive systems of a decameter radio: current state and prospects of development

S. A. Koval

Relevance. In recent years interest in development of a decameter radio communication both for security agencies, and increased in the system of digital broadcasting and for the organization of a radio communication with mobile objects at long distances. The sharp impetus to it was also given by one of the priority directions of development of the Arctic zone of the Russian Federation for ensuring national security and sovereignty of the country – creation of modern information and telecommunication infrastructure. Decameter communication with remote and mobile objects at the same time is the most favorable, despite variability of a condition of an ionosphere (including artificial indignations) which accounting is made by ionospheric monitoring and the interests of construction and the organization of work of adaptive radio lines. In this regard, the analysis of the current state and the prospects of development of means and systems of monitoring of an ionosphere for the benefit of a decameter radio communication is relevant. **The aim of this paper** is the analysis of the capabilities of existing tools and systems for monitoring the ionosphere, used to obtain information about the state of the ionosphere (propagation medium) and communication channels (decameter radio lines) in order to determine the prospects for their development in the field of measuring the statistical parameters of the ionosphere and radio lines, as well as using the obtained data for the design of promising adaptive decameter radio systems. **Results and novelty.** It is worth carrying the revealed trends of development of systems of ionospheric providing (radio monitoring) to novelty aspects. By consideration of these systems much attention is paid to opportunities of their independent operation, width of a range of solvable tasks, including of an opreleleniye of separate parameters of the decameter radio lines and parameters characterizing revolted (including it is artificial) an ionosphere, or its local area. **Practical relevance.** The submitted analysis will be useful to technical specialists to justification of new decisions in the field of assessment of a condition of an ionosphere and application of the obtained current data for design of dynamically adaptive radio lines (radio networks) of decameter range of the military and dual-use, improvement of monitors of an ionosphere in the conditions of her indignation.

Key words: ionosphere, diffusivity, HF-radio link, fading, heterogeneity of an ionosphere, sounding of an ionosphere, electronic concentration.

Information about Author

Stanislav Andreevich Koval – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral Candidate. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: monitoring of ionosphere parameters for decameter radio. E-mail: _bober_@mail.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoretskiy prospekt, 3.