

DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.12

УДК 537.872.32

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ БОРТОВОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО ПЕРЕДАТЧИКА В ИОНОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЕМНИКА, УСТАНОВЛЕННОГО НА СУБ-СПУТНИКЕ

А. В. Мошков

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 10 мая 2020 г.

Аннотация. На примере конкретного проекта активного ионосферного эксперимента проведено численное моделирование процесса измерения напряженности поля низкочастотной волны, излучаемой при помощи рамочной антенны большого диаметра, установленной на борту спутника на приполярной орбите. В качестве измерителя используется суб-спутник с приемной аппаратурой на борту. Показано, что из-за ярко выраженного резонансного характера распределения напряженности поля в пространстве её надежное измерение возможно в рамках данного эксперимента только в приэкваториальной области ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, бортовой низкочастотный передатчик, суб-спутник, плазменные резонансы, конус Стори.

Abstract. Projects of active experiments in the ionosphere and the magnetosphere of the Earth and planets often include powerful low-frequency transmitters installed on board a spacecraft. Such sources are very effective, but their radiation is extremely heterogeneous in space because of an anisotropy of the ionospheric plasma due to the presence of the magnetic field of the Earth. A sub-satellite with onboard receiving equipment is often suggested as a measurement probe. Such a micro-satellite makes periodic movements near the main spacecraft, moving away or approaching it. This paper is devoted to numerical modeling of the process of measuring the low-frequency field strength of the specific active experiment using such a sub-satellite. It is proposed to use a 20 m loop as a transmitting antenna. The results of the simulation

can help, in particular, in a correct choice of the onboard transmitting antenna orientation. It is shown that in case of a high latitude orbit of the satellite, a choice of orientation of the loop antenna parallel to this orbit plane can make it very difficult to measure field strength in the far zone of the transmitter. Such measurements are only possible in a relatively narrow low latitude range when the sub-satellite is inside the Storey cone of the transmitter. All calculations were performed in linear approximation using the cold magneto-active plasma model.

Key words: ionosphere, on-board low-frequency transmitter, sub-satellite, plasma resonances, Storey cone.

Введение

Научные программы «активных» экспериментов в ионосфере и магнитосфере Земли традиционно включают в себя изучение характеристик распространения низкочастотных (НЧ) электромагнитных волн в этих средах и условий их взаимодействия с потоками энергичных заряженных частиц радиационных поясов. Создание мощных наземных излучающих вверх НЧ-антенн затруднено из-за их относительно больших размеров и высокой проводимости поверхности земли на низких частотах. Это обстоятельство постоянно стимулирует поиски физических механизмов, позволяющих обойти указанную трудность. В настоящее время предпочтение отдают технологии создания НЧ-источников на основе демодуляции мощного модулированного коротковолнового излучения наземных передатчиков, расположенных в северных приполярных районах и входящих в состав станций активного воздействия на ионосферу [1]. Возможно также использование бортовых НЧ-передатчиков средней мощности [2,3]. На примере работы американской станции HAARP было показано, что оба способа генерации НЧ-поля в нижней ионосфере дают сходные значения напряженности поля [3]. Были также проведены оценки величины напряженности поля таких источников на поверхности земли [4].

Одна из основных трудностей в оценке структуры волновых полей и эффективности в целом бортовых НЧ-излучателей состоит в отсутствии регулярных управляемых средств контроля параметров излучения на разных расстояниях от источника в различных условиях его работы. Например, в условиях эксперимента [2] грузовой корабль с блоком антенн удалялся от станции «Мир» и сгорал в атмосфере. Прием сигнала осуществлялся относительно короткое время на единственной трассе распространения сигнала. В случае станции HAARP спутниковые измерения проводились при помощи аппаратуры, установленной на европейском спутнике DEMETER [5]. Спутник выполнял совершенно другую научную программу, поэтому измерения носили неуправляемый и ограниченный по времени характер.

Методика таких измерений должна учитывать сложный резонансный характер пространственного распределения НЧ-излучения в неоднородной магнитоактивной плазме ионосферы и магнитосферы (см., например, [6-9]). Для проведения измерений в таких условиях неоднократно предлагалось использовать дополнительный малый суб-спутник с приемной аппаратурой на борту. Некоторые из таких проектов доведены до стадии действующих (см. обзоры [10-12]).

Цель данной работы – численное моделирование процесса измерения напряженности поля бортовой НЧ рамочной антенны с использованием суб-спутника на основе проекта АУОС-3-АВ-ИК, разработанного в КБ "Южное" им. М.К. Янгеля [12]. Такое моделирование может помочь учесть влияние основных физических особенностей излучения и распространения НЧ-волн в ионосферной плазме на методику проведения измерений, в частности, на определение циклограммы работы передатчиков и на выбор наземных приемных пунктов.

1. Резонансные явления при распространении НЧ волн в магнитосфере

В этом разделе кратко описаны те резонансные явления, которые могут проявиться в процессе измерений величины напряженности поля НЧ-источника вплоть до дальней зоны. За основу взято традиционно применяемое

приближение «холодной плазмы» [13]. Введем понятия плазменной частоты электронов

$$f_{pe} = (e^2 \cdot N_e / 4\pi^2 \epsilon_0 m_e)^{1/2} \approx 8,97 N_e^{1/2} \text{ кГц}, \quad (1)$$

и gyro-частоты электронов

$$f_{He} = eB_0 / 2\pi m_e \approx 876,0 (1+h / R_0)^{-3} (1 + 3\sin^2 \Phi)^{1/2} \text{ кГц}, \quad (2)$$

где плотность свободных электронов N_e измеряется в см^{-3} ; e , m_e – заряд и масса электрона; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; R_0 – средний радиус Земли (~ 6370 км), h – высота над поверхностью земли, B_0 – индукция геомагнитного поля, Φ – геомагнитная широта.

В максимуме слоя F2 ионосферы имеем днем $f_{pe} \approx 10$ МГц; ночью $f_{pe} \approx 2 \dots 5$ МГц в зависимости от условий (времени суток, сезона, географического положения и активности Солнца). Для ионов сорта $k = 1, 2, \dots$ в формулах (1) и (2) следует использовать соответствующую концентрацию N_k и массу m_k (ионы предполагаются однозарядными, а плазма в целом – квазинейтральной). Правая часть формулы (2) предполагает использование дипольной модели геомагнитного поля, которая непригодна для анализа результатов измерений напряженности поля НЧ источника в ионосфере. Однако, понятие геомагнитной широты сохраняется. Действительно, в северном полушарии вектор \vec{B}_0 направлен к земле к северу, и составляет с вертикалью острый угол $\chi > 0$:

$$\text{ctg } \chi = 2\text{tg } \Phi. \quad (3)$$

и выражение (3) можно считать определением локальной величины Φ для не дипольной модели геомагнитного поля.

Волновой вектор \vec{k} перпендикулярен фазовому фронту волны и связан с фазовым показателем преломления n очевидным образом: $|\vec{k}| = k_0 n$, где волновое число $k_0 = 2\pi f/c$; f – частота волны, c – скорость света в вакууме. Для модели локально однородной холодной плазмы величина n зависит от взаимной ориентации локальных векторов \vec{B}_0 и \vec{k} [13]. На рис.1 приведена схематическая

диаграмма фазового показателя преломления для двух характерных случаев: $f > f_{\text{НГР}}$ (a) и $f < f_{\text{НГР}}$ (b), где $f_{\text{НГР}}$ – частота нижнего гибридного резонанса.

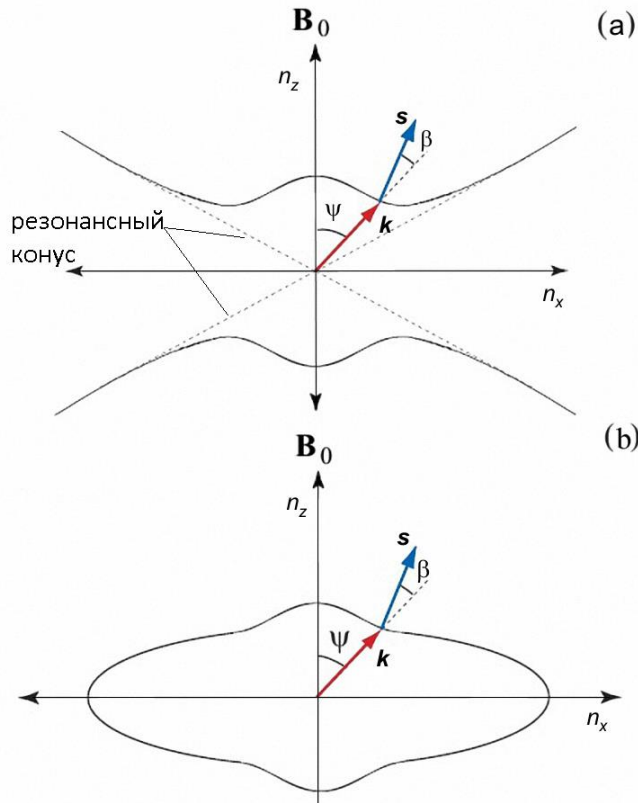


Рис.1. Два топологически различных вида диаграммы фазового показателя преломления n .

Пусть $\vec{k} \equiv \vec{k}/k_0$. Тогда диаграмму n можно определить как геометрическое место концов вектора \vec{k} с началом в заданной точке при изменении его угла ψ с вектором \vec{B}_0 . Поскольку этот объект есть поверхность вращения с осью \vec{B}_0 , то принято изображать произвольное осевое сечение этой поверхности (рис.1). Для удобства введена условная прямоугольная декартова система координат с осью z вдоль геомагнитного поля. Диаграмма $n(\psi)$ обладает важным свойством: для любого допустимого направления \vec{k} нормаль \vec{s} к кривой $n(\psi)$ дает направление соответствующего луча (см. рис.1). Пусть β – угол между \vec{k} и \vec{s} .

На рис.2 приведена зависимость $\psi(\beta)$ для случая замкнутой кривой (рис.1b). Видно, что в анизотропной плазме эта зависимость неоднозначна. Одному направлению луча может соответствовать до трех направлений \vec{k} .

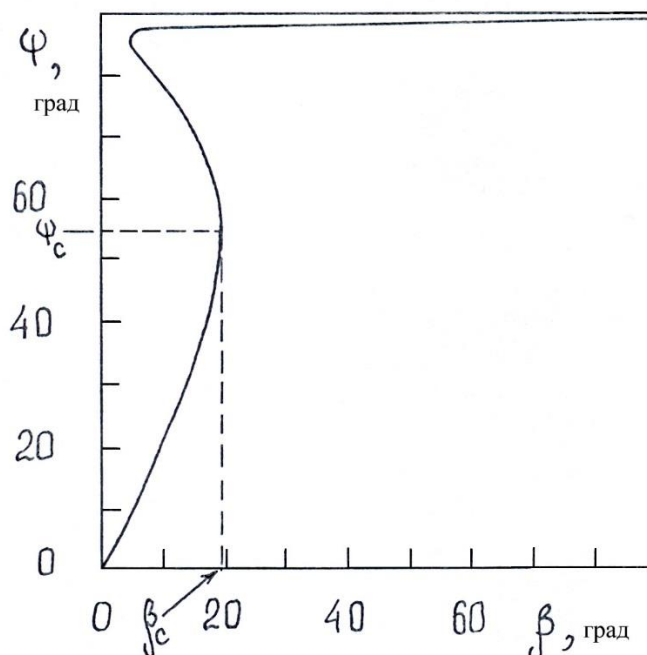


Рис.2. Иллюстрация неоднозначного соответствия направлений волновой нормали и луча.

На рис.1 (а) и (б) можно заметить точку перегиба, наличие которой означает, что направления лучей в окрестности этой точки находятся внутри конической поверхности с осью, совпадающей с направлением \vec{B}_0 . Это свойство диаграммы фазового показателя преломления НЧ-волн в ионосферной плазме является достаточно общим в широком интервале частот (от ~ 1 кГц до $f_{He}/2$). Этот интервал часто называют «свистовым», а фокусирующий конус – конусом Стори (по имени его первооткрывателя). Именно этот механизм ответствен за «канализацию» свистящих атмосфериков магнитным полем на протяжении их распространения в ионосфере и магнитосфере из полушария в полушарие Земли.

Заметим, что для не слишком высоких частот относительно частоты f_{HGR} плазменные резонансные эффекты вида рис.1а имеют место для углов ψ вблизи 90° . Поэтому для оценки параметров конуса Стори мы вправе использовать квазипродольное приближения для зависимости $n(\psi)$ [14]:

$$n^2(\psi) \approx 1 + f_{pe}^2 / f(f_{He} \cos \psi - f).$$

Пользуясь этим приближением, легко получить, что $\beta \approx \psi - \arctg(0.5\text{tg}\psi)$, а для точки перегиба получим:

$$d\beta/d\psi = 1 - 2/(1 + 3\cos^2\psi) = 0,$$

откуда для угла ψ_c , соответствующего углу образующей конуса Стори β_c , получим: $\text{tg}\psi_c = 2^{1/2}$; $\text{tg}\beta_c = 0.25\text{tg}\psi_c$, то есть, $\psi_c \approx 54.7^\circ$ и $\beta_c \approx 19.5^\circ$ (рис.2).

Конус Стори не только ограничивает значительную часть лучей для разных направлений \vec{k} . Из смысла точки перегиба ясно, что малая вариация направлений \vec{k} в ее окрестности «породит» пучок фактически параллельных друг другу когерентных лучей. Образуется каустическая лучевая коническая поверхность. На практике это означает, что внутри и вне конуса Стори с вершиной у источника, НЧ-электромагнитное поле имеет не только разную структуру, но и существенно разную величину напряженности [15]. Из рис.2 видно, что вблизи частоты $f_{\text{НГР}}$ могут существовать один или два луча при $\psi \sim 90^\circ$, которым соответствует луч при некотором малом значении ψ . Эти лучи имеют малый угол с направлением геомагнитного поля и формируют внутри конуса Стори дополнительные резонансные конусы [7,15].

2. Численное моделирование измерений

Как следует из изложенных выше особенностей распределения поля НЧ-источника в магнитоактивной плазме, для достоверной оценки напряженности такого поля, регистрируемой на суб-спутнике, необходимо достаточно точно знать взаимное расположение спутника и суб-спутника в ходе полета, в частности, наиболее важной является информация о взаимной ориентации излучающей и приемной антенн. Излучающая рамочная антенна диаметром 20 м установлена на борту основного спутника и имеет рабочую частоту 10 кГц. Высота полета спутника находится в пределах 500...2500 км при наклонении орбиты 82.5° . Сеансы излучения для приема сигнала на поверхности земли предполагается производить над Европейской частью РФ в ночное время при высоте полета спутника ≈ 1000 км. Оптимальной с точки зрения излучения

является ориентация оси рамочной антенны вдоль локального направления \vec{B}_0 [7,15].

При движении спутника вдоль указанной орбиты для частоты излучения $f = 10$ кГц реализуется как случай $f > f_{\text{HГР}}$, так и случай $f < f_{\text{HГР}}$. Кроме того, очевидно, что при движении спутника величина угла θ между \vec{B}_0 и направлением излучатель-приемник может меняться в широких пределах. Поэтому в ходе моделирования необходимо как можно точнее контролировать значения величин $f_{\text{HГР}}$ и θ . Это возможно с использованием стандартной международной модели IGRF (см. ниже). Для вычисления величины $f_{\text{HГР}}$ в ходе измерений необходимо, вообще говоря, знать ионный состав плазмы [13]. Учтем тот факт, что на высотах более ~ 800 км начинают доминировать ионы водорода. На высотах 500 км и выше присутствуют ионы гелия, концентрация которых относительно мала и падает с высотой; и ионы кислорода высокой концентрации. Но ионы кислорода существенно массивнее ионов водорода, так что практически вдоль всей орбиты движения спутника можно использовать «одноионное» приближение для вычисления $f_{\text{HГР}}$:

$$f_{\text{HГР}} \approx \{f_{\text{He}}f_{\text{H}_i} \times [1 + (f_{\text{He}}/f_{pe})^2]^{-1}\}^{1/2}, \quad (4)$$

где f_{H_i} – гирочастота ионов водорода. Основной переменной величиной в (4) является, очевидно, плазменная частота f_{pe} , которая зависит от значения концентрации электронов в текущей точке орбиты (см. выражение (1)). Величины гирочастот пропорциональны индукции B_0 и также изменяются вдоль орбиты (см. выражение (2)).

На рис.3 схематически изображены используемые системы координат. Пусть основной спутник движется вдоль орбиты (ось x_c) со скоростью v_0 . Ось z_c направлена к центру Земли. В данном эксперименте рамочная антенна развернута так, что ее плоскость приближенно совпадает с плоскостью орбиты. Дипольный магнитный момент рамки \vec{M} , тем самым, почти перпендикулярен плоскости орбиты.

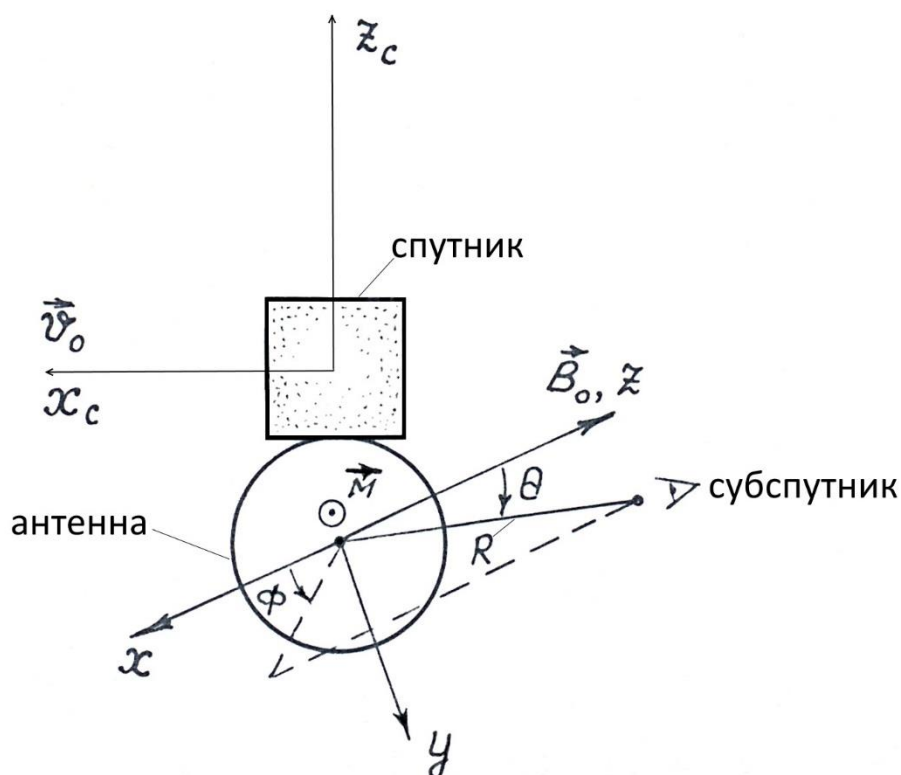


Рис.3. Схема систем координат спутника и суб-спутника.

Введем систему координат наблюдателя (суб-спутника) $\{x, y, z\}$. Направим ось z вдоль локального направления \vec{B}_0 ; ось x направим так, чтобы магнитный момент рамки лежал в плоскости xz . Угол между \vec{M} и \vec{B}_0 обозначим как γ_a . Ось y дополняет тройку до правой. Положение суб-спутника в системе координат $\{x, y, z\}$ будем характеризовать сферическими координатами $\{R, \theta, \phi\}$, смысл которых ясен из рис.3. Эти координаты, на наш взгляд, удобнее для восприятия при отображении положения суб-спутника на графиках.

Движение объекта в целом моделировалось при помощи простейших кинематических уравнений движения тела вокруг сферической Земли для заданных перигея (500 км) и апогея (2500 км). Очевидно, что наиболее сложной задачей является определение взаимного расположения спутника и суб-спутника. Разработчики объекта считают, что суб-спутник будет относительно медленно отходить от основного спутника в плоскости орбиты вдоль вектора скорости \vec{v}_0 (рис.3), совершая одновременно движение вдоль эллипса с

полуосями 200 и 400 м. При этом суб-спутник будет удаляться от спутника на расстояние от 1 до 10 км и возвращаться обратно за период ~ 15 дней, причем, отклонение суб-спутника от плоскости орбиты спутника не превышает ~ 100 м.

Длина волны частоты 10 кГц составляет в пустом пространстве 30 км. В верхней ионосфере и магнитосфере показатель преломления такой волны может быть относительно велик, и длина волны, в зависимости от гео- и гелиофизических условий, может изменяться от 1 до нескольких километров. В этом случае при удалении суб-спутника на расстояние более 1 км вполне можно пренебречь его относительно малыми циклическими смещениями, как и отклонениями от плоскости орбиты. Кроме того, с точки зрения изменения напряженности НЧ-поля наиболее важным является изменение величины угла θ . При его вычислении на расстояниях $R > 1$ км также можно пренебречь указанными мелкомасштабными отклонениями. При $R \lesssim 1$ км, напротив, предполагаем, что отклонения суб-спутника вдоль оси z_c и от плоскости орбиты максимальны (200 и 100 м соответственно).

Пусть T_c – характерное время движения суб-спутника от минимального ($R \sim 1$ км) до максимального ($R \sim 10$ км) расстояния от основного спутника ($2T_c \approx 15$ дней). Таким образом, за время T_c отклонения суб-спутника от курса объекта уменьшатся практически до нуля. С точки зрения удобства расчетов напряженности поля можно предположить, что указанные выше величины отклонений суб-спутника меняются линейно от максимальных значений до нуля в течение интервала времени T_c . Теперь учтем, что за это время основной спутник совершит значительное число витков вокруг Земли. Следовательно, на протяжении одного витка суб-спутник можно считать неподвижным в системе координат спутника. Воспользуемся этим, и для наглядности результатов сократим объем получаемых данных - «сожмем» реальное время. Будем считать, что величина T_c приблизительно равна четверти периода обращения основного спутника вокруг Земли. Это позволит исследовать практически все основные качественно различные особенности регистрации сигнала при движении объекта от экватора к полюсу («восходящий» виток) и обратно

(«нисходящий» виток). При этом число графиков представления данных сводится к минимуму.

Поскольку выбор конкретных восходящего и нисходящего витков произволен, выберем два витка, проходящих в окрестности Москвы и одновременно через Карелию, где возможен выбор наземных измерительных пунктов с относительно низким уровнем шумов. На рис.4 схематически изображен фрагмент карты земной поверхности, на который нанесены выбранные витки (кривые 1 и 2).

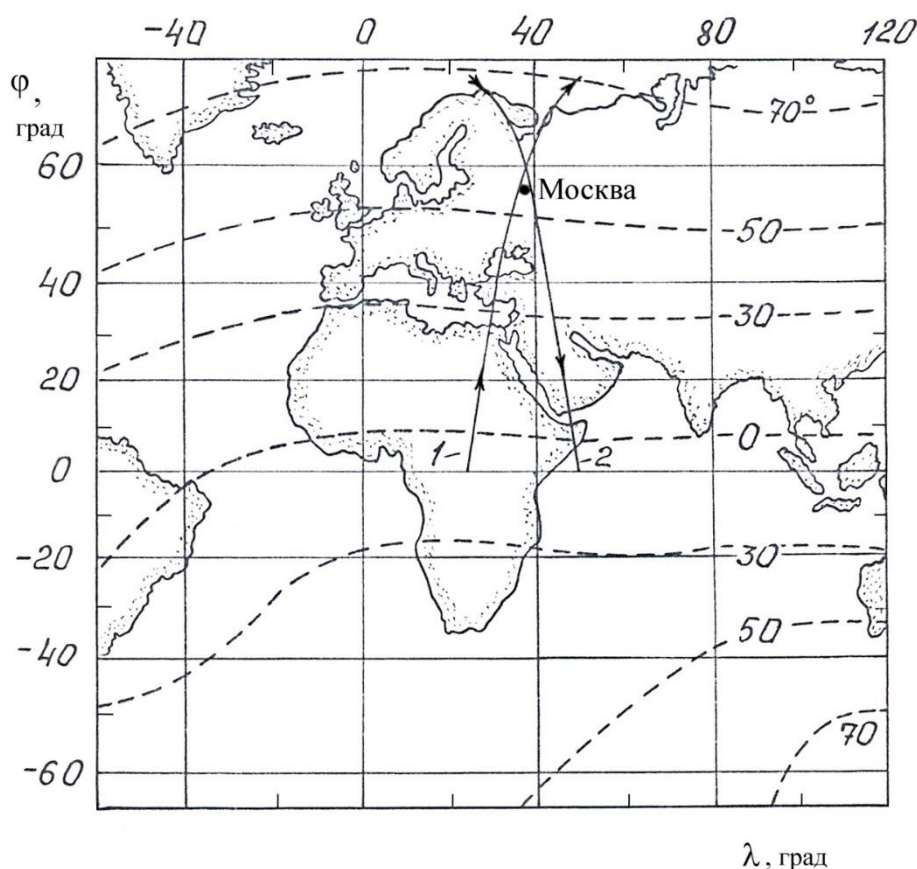


Рис.4. Фрагмент карты мира с двумя измерительными витками спутника.

Для определения величины угла θ вдоль траектории полета спутника необходимо иметь как можно более точные сведения об ориентации \vec{B}_0 . Поэтому для расчетов использовалось актуальная на момент написания данной статьи версия Международного эталонного магнитного поля (IGRF-13) с коэффициентами разложения по сферическим гармоникам, соответствующими 2020 г. [16]. На рис.4 штриховыми кривыми обозначены линии геомагнитных

широт Φ с соответствующими цифровыми обозначениями широты в градусах, рассчитанные для высоты 1000 км по формуле (3) и модели IGRF.

Из рисунка видно, что орбита с большим наклоном образует с геомагнитными широтами угол, близкий к прямому, то есть, угол γ_a также близок к $\pi/2$, и рамочная антенна практически везде имеет ориентацию, близкую к перпендикулярной. Такая ориентация является оптимальной с точки зрения приема сигнала на поверхности земли [17], однако, в случае регистрации сигнала на суб-спутнике эта ориентация является наихудшей [15]. Поэтому важно, чтобы при проведении сеансов измерений в промежуточной и дальней зоне суб-спутник находился бы внутри конуса Стори излучателя, то есть, чтобы выполнялось условие $\theta \leq \beta_c$. Поскольку \vec{B}_0 составляет относительно малый угол с плоскостью орбиты, а суб-спутник находится практически на одной горизонтали с излучателем, то условие $\theta \leq \beta_c$ будет надежно выполняться только на приэкваториальном отрезке орбиты спутника.

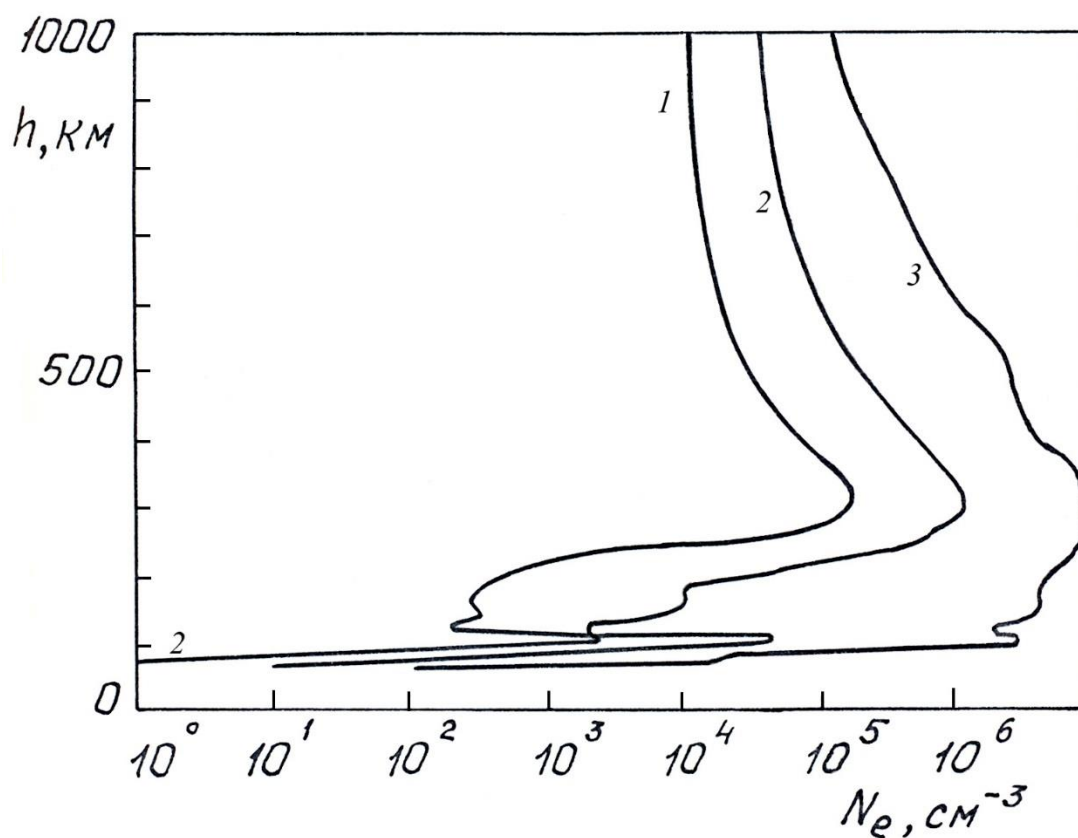


Рис.5. Эмпирические высотные профили концентрации электронов.

Значения концентрации на промежуточных широтах получались на заданной высоте при помощи квадратичной интерполяции десятичных логарифмов концентрации. Значения N_e на высотах $h > 1000$ км получались при помощи экспоненциального продолжения соответствующих профилей вверх. Дневные высотные профили N_e пока не рассматривались, поскольку учитывалась возможность наземного приема сигналов, которая днем затруднена из-за относительно сильного столкновительного затухания в нижней дневной ионосфере.

3. Результаты моделирования процесса измерений

Чувствительность трехкомпонентных датчиков магнитного поля НЧ-сигнала, установленных на суб-спутнике, составляет $\sim 4 \times 10^{-6}$ нТл/Гц^{1/2}, или ~ 3.2 нА/Гц^{1/2}, что в единицах электрического поля соответствует величине ~ 1.2 мкВ/м(Гц)^{1/2}. Амплитуда тока в антенне составляет ~ 100 А. Рабочая частота равна 10 кГц.

Рассмотрим восходящий виток (кривая 1 на рис.4). В этом случае в приэкваториальной области расстояние R минимально и растет по мере движения к полюсу до своего максимального значения ~ 10 км. На рис.6 приведены расчётные значения H амплитуды напряженности магнитного поля НЧ-волны в единицах электрического поля ($Z_0 = 120\pi$ – импеданс вакуума) вдоль четверти восходящего витка. На этом же рисунке приведены синхронные изменения величин R , θ и $f_{\text{НЧ}}$ в зависимости от геомагнитной Φ и соответствующей географической φ широты, приведенных на соответствующих шкалах в нижней части рисунка. Расчеты напряженности поля велись по методике, изложенной в работе [7].

Значения угла γ_a между векторами \vec{M} и \vec{B}_0 изменялись в пределах $\sim 80 \dots 87^\circ$, что соответствует, как и ожидалось, почти перпендикулярной ориентации оси рамки. На рис.6 видно, что одновременно с ростом величины R увеличивается и значение θ при движении в сторону высоких геомагнитных широт. В результате в дальней зоне источника величина θ заметно превышает значение угла Стори θ_c . В этом случае угол ψ относительно велик и волны

могут распространяться только при условии $f < f_{\text{НГР}}$ (см. рис.1). Момент нарушения этого условия отмечен на рис.6 вертикальной стрелкой. В этот момент происходит резкий спад измеряемой величины H до величины напряженности квазистатического ближнего поля рамки, которое составляет ~ 1 мкВ/м и находится на пороге чувствительности датчиков.

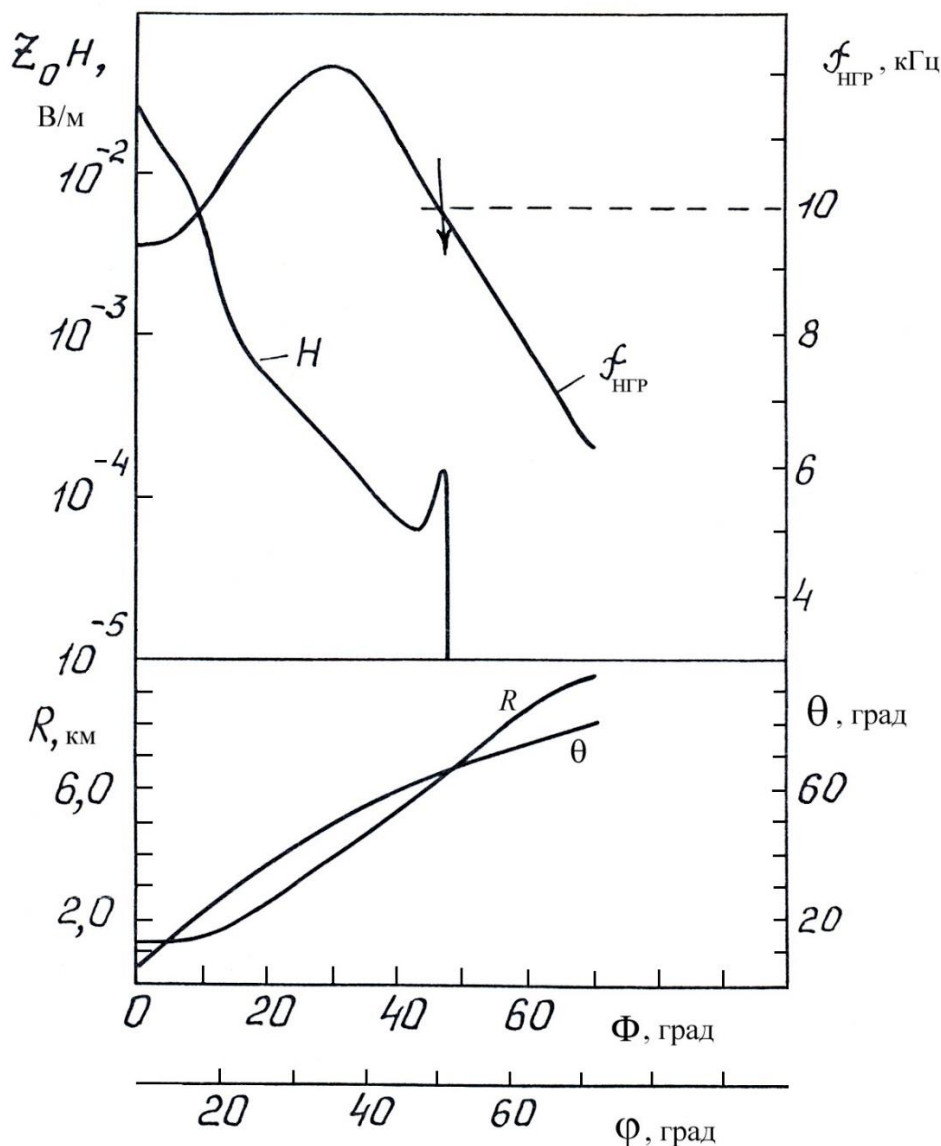


Рис. 6. Изменение величины напряженности H поля волны вдоль восходящего витка.

Кроме того, из рис.6 видно, что при изменении расстояния R от 1 до 5 км величина напряженности поля падает от $\sim 2 \times 10^{-2}$ до $\sim 10^{-4}$ В/м, то есть, не только быстрее скорости спада $1/R$, но даже быстрее, чем $1/R^3$. Такое резкое убывание величины H вообще характерно для квазипоперечного распространения НЧ-

волн. Кроме того, в данном случае при движении от экватора к полюсу синхронно с ростом величины θ убывает величина N_e , а значит, и сопротивление излучения рамки [15].

Рассмотрим особенности измерений на нисходящем витке (рис.4, кривая 2). В этом случае на высоких широтах величина R минимальна, а в приэкваториальной области соответствует приему в дальней зоне источника. Соответствующие результаты расчетов приведены на рис.7 в формате, аналогичном рис.6 с некоторыми изменениями.

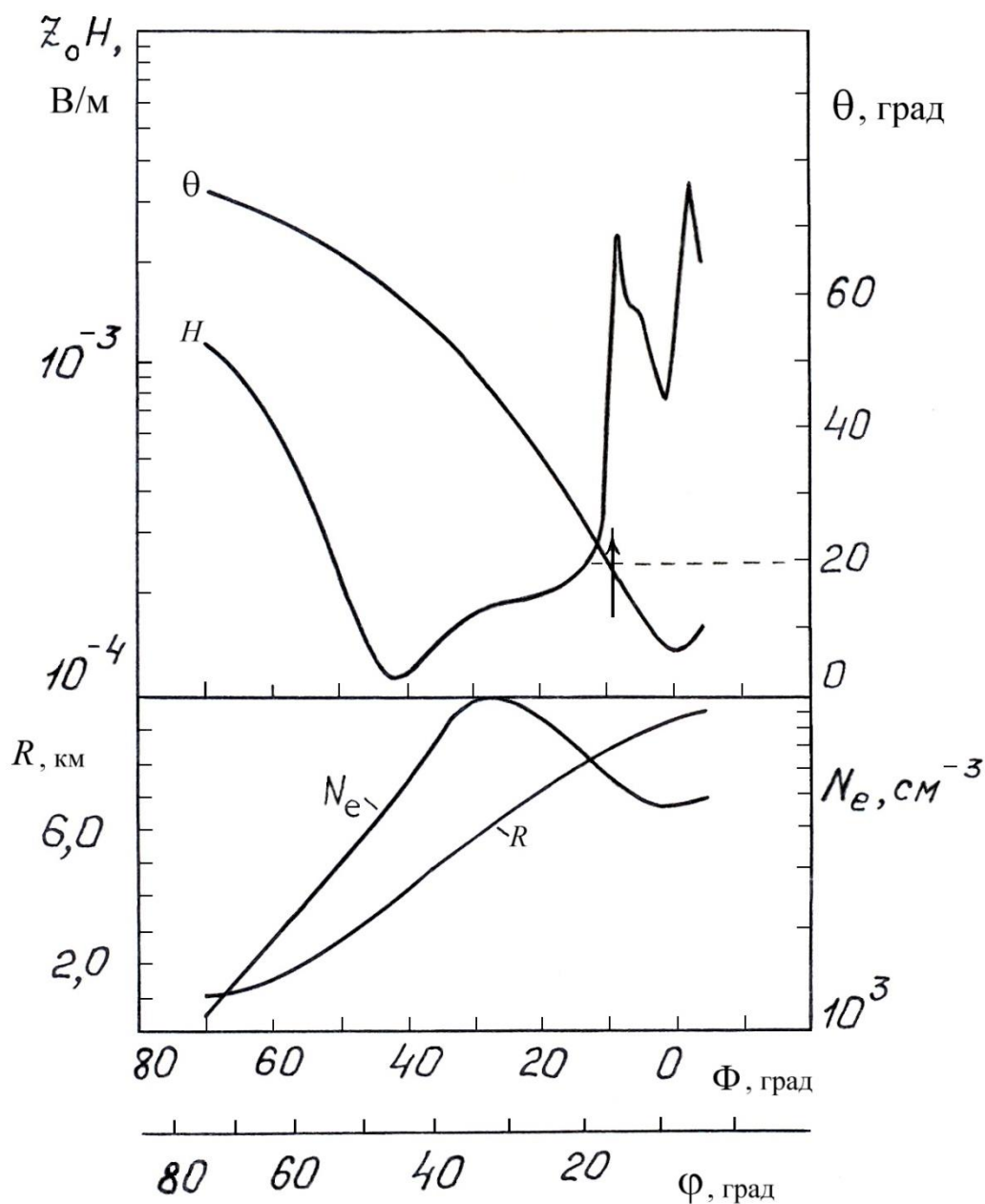


Рис. 7. Изменение величины напряженности H поля волны вдоль нисходящего витка.

Заключение

В данной работе представлены результаты численного моделирования процесса измерения величины напряженности поля бортовой НЧ рамочной антенны при помощи суб-спутника для конкретного объекта АУОС-3-АВ-ИК, разрабатывавшегося в рамках проекта «Активный» [10,12]. Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Уверенная регистрация сигнала в дальней зоне источника в области геомагнитных широт $\Phi > 40^\circ$ может быть сопряжена с большими трудностями, поскольку при квазипоперечном распространении НЧ-волн вне конуса Стори напряженность поля имеет порядок величины напряженности ближнего поля, которое, которое в дальней зоне весьма мало.

2. Регистрация сигнала в дальней зоне НЧ-источника наиболее благоприятна на низких геомагнитных широтах $\Phi < 10^\circ$, когда приемник находится в пределах конуса Стори источника ($\theta < \theta_c \approx 19.5^\circ$). Выводы пунктов 1 и 2 в равной степени справедливы и для южного полушария.

3. НЧ-поле внутри конуса Стори носит интерференционный характер. Малое изменение величины θ в этих условиях может привести к значительным вариациям значений H . Это обстоятельство может затруднить интерпретацию экспериментальных данных, поскольку налагает жесткие требования к точности определения положения и ориентации спутников, а также ориентации локального геомагнитного поля в ходе измерений.

4. Расчеты проводились в линейном приближении в рамках модели холодной плазмы. В случае, если нелинейные эффекты приведут к «выдуву» ионизованного газа из окрестности рамочной антенны, то необходимо для поддержания ее излучательной способности предусмотреть возможность инъекции с борта спутника в область рамки нейтрального или ионизованного газа.

5. Поскольку приемная аппаратура суб-спутника работает независимо от бортового излучателя, его можно использовать в качестве измерительного НЧ-

зонда, например, для мониторинга НЧ-излучений станций активного воздействия на ионосферу, таких, как HAARP, EISCAT, «Сура» и др.

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145-1177. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200711a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145).
2. Арманд Н.А., Семенов Ю.П., Черток Б.Е. и др. Экспериментальное исследование в ионосфере Земли излучения рамочной антенны в диапазоне очень низких частот, установленной на орбитальном комплексе «Мир-Прогресс-28-Союз ТМ-2» // Радиотехника и Электр. 1988. Т. 33, № 11, С. 2225-2233.
3. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Численное моделирование распределения низкочастотного поля, создаваемого передающей рамочной антенной, установленной на борту космического аппарата // Радиотехника и Электр. 2019. Т. 64. № 9. С. 866-873. DOI: [10.1134/S0033849419080126](https://doi.org/10.1134/S0033849419080126).
4. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Распределение на поверхности земли напряженности поля низкой частоты, демодулированного в возмущенной нижней ионосфере // Радиотехника и Электр. 2018. Т. 63. № 5. С. 409-414. DOI: [10.7868/S0033849418050030](https://doi.org/10.7868/S0033849418050030).
5. Piddyachiy D., Inan U.S., Bell T.F., Lehtinen N.G., Parrot M. DEMETER observations of an intense upgoing column of ELF/VLF radiation excited by the HAARP HF heater // J. Geophysical Res. 2008. Vol. 113. October. A10308. DOI: [10.1029/2008JA013208](https://doi.org/10.1029/2008JA013208).
6. Boswell R.W. Measurements of the far-field resonance cone for whistler mode waves in a magnetoplasma. Nature. 1975. Vol. 258. PP. 58–60.
7. Мошков А.В. Электромагнитное поле рамочной антенны, расположенной в холодной многокомпонентной магнитоактивной плазме (ионосфере). Космические Иссл. 1986. Т. 24. № 5. С.735-744.

8. Alpert Ya.L. Green, J.L. Cone structure and focusing of VLF and LF electromagnetic waves at high altitudes in the ionosphere // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99. No. A1. PP. 389-399. DOI: [10.1029/93JA01473](https://doi.org/10.1029/93JA01473)
9. James H.C. Electrostatic resonance-cone waves emitted by a dipole in the ionosphere // IEEE Tr. on Antennas and Propagation. 2000. V. 48. No. 9. PP. 1340-1348. DOI: [10.1109/8.898766](https://doi.org/10.1109/8.898766).
10. Зайцев Ю.И. На рубеже тысячелетий (Космическая программа СССР до 2000 года) // Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Космонавтика, астрономия". 1989. № 2. М.: Знание. 1989. 64 с.
11. Венера-Д. Научные эксперименты. Субспутник [электронный ресурс]. Страница сайта «Проект ВЕНЕРА-Д». Федеральная космическая программа России. Владелец сайта – лаб. 801 Института космических исследований РАН. Режим доступа: <http://www.venera-d.cosmos.ru/index.php?id=1694> (последнее посещение 16.05.2020).
12. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро "Южное" / Под общ. ред. С.Н. Конюхова. Днепропетровск, 2000 [электронный ресурс]. Владелец сайта ГКБ "Южное" им. М.К. Янгеля. Режим доступа: http://rvsn.ruzhany.info/umz_2000_00.html (последнее посещение 16.05.2020).
13. Стикс Т. Теория плазменных волн. М.: Атомиздат. 1965. 343с.
14. Budden K.G. Radio Waves in the Ionosphere. Cambridge: University Press. 1961. 542 p.
15. Акиндинов В.В., Еремин С.М., Лишин И.В. Антенны низкой частоты в магнитоактивной плазме (обзор) // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30. № 5. С. 833-850.
16. International Geomagnetic Reference Field. IGRF-13. Страница сайта Государственные центры информации об окружающей среде США (National Centers for Environmental Information, USA). Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html> (последнее посещение 05.05.2020).

17. Мошков А.В. Оценка величины напряженности поля низкочастотного ионосферного источника вблизи главного максимума распределения на поверхности земли // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 12, С. 1436-1442.

18. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К., Легенька А.Д., Соболева Т.Н. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука. 1981. 256 с.

Для цитирования:

Мошков А.В. Численное моделирование измерения напряженности поля бортового низкочастотного передатчика в ионосфере с использованием приемника, установленного на суб-спутнике. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may20/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.12