

Степанцова А.М., Петухов А.Г., Делог А.Н., Степанцов С.В.

DOI: 10.14529/secur220103

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНОСФЕРНОГО ЛУЧА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

На сегодняшний день можно отметить возрастание интереса обеспечения безопасности информации в области развития радиосвязи декаметрового диапазона (ДКМ), основанной на распространении радиоволн за счет отражения их от ионосферы. Внимание к ДКМ обусловлено активным развитием цифровых технологий и методов цифровой обработки информации, передачи сигналов. Любая организация приема-передачи сигналов строится на трех основных пунктах: 1 – устройство передачи, 2 – принимающее устройство, 3 – линии соединения (промежуточное звено). В радиосистеме роль промежуточного звена играет среда, в которой распространяются радиоволны. Вопрос исследования распространения электромагнитных волн в слоях верхней и нижней атмосферы является актуальным и определяется потребностью решения проблем дальней радиосвязи, радиолокации и радионавигации, при этом не следует забывать о проблеме изучения структуры среды передачи. В статье рассматривается строение ионосферы, преломление и отражение в ней радиоволн и выбор рабочих частот для связи ионосферным лучом.

Ключевые слова: радиоволны, ионосфера, ионизация, атмосфера, рабочая частота, напряжение поля, путь пространственной волны, безопасность информации.

Stepancova A.M., Petukhov A.G., Delog A.N., Stepancov S.V.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE IONOSPHERIC BEAM ON THE PROPAGATION OF RADIO WAVES

To date, it can be noted that there is an increasing interest in ensuring the security of information in the field of the development of decameter radio communications (DCM), based on the propagation of radio waves due to their reflection from the ionosphere. Attention to DCM is due to the active development of digital technologies and methods of digital information processing and signal transmission. Any organization of signal reception and transmission is based on three main points: 1 – transmission device, 2 – receiving device, 3 – connection lines (intermediate link). In a radio system, the medium in which radio waves propagate plays the role of an intermediate link. The issue of studying the propagation of electromagnetic waves in the layers of the upper and lower atmosphere is relevant and is determined by the need to solve the problems of long-range radio communication, radar and radio navigation, while one should not forget about the problem of studying the structure of the medium transmission. The article discusses the structure of the ionosphere, the refraction and reflection of radio waves in it and the choice of operating frequencies for ionospheric beam communication.

Keywords: radio waves, ionosphere, ionization, atmosphere, operating frequency, field voltage, spatial wave path, information security.

Изучая вопрос распространения радиоволн ионосферным лучом помимо учебной литературы для анализа и определения актуальности тематики статьи были приняты во внимание публикации по темам: «Эффект анизотропии ионосферных неоднородностей при регистрации сбоев фазовых измерений

ГНСС» (2019 г., И. В. Безлер, А. Б. Ишин, Е.В. Конечкая, М. В. Тинин), «Результаты исследования пространственно-корреляционных характеристик однолучевого ионосферного декаметрового канала связи» (2020 г., И.М. Орошук, И.Е. Гуреев, А.Н. Сучков, М.В. Соловьев), «Полугодовая вариация космических лучей

и ионосферы» (2020 г., В. Л. Янчуковский, А. Ю. Белинская), «Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем декаметрового радиосвязи: современное состояние и перспективы развития» (2020 г., С.А. Коваль).

В своих работах авторы рассматривают ионосферу: как явление, подверженное влиянию внешних факторов, таких как освещенность атмосферы, времени суток и времени года, магнитного поля Земли; как среду, по своему строению не однородную, так как в каждом из слоев своя электрическая концентрация.

Освещена проблема намеренного создания искусственных возмущений ионосферы силами противника, с целью разрушения радиоканалов связи, находящихся в определенных диапазонах частот (создание в них замираний, помех и затуханий). Проведен анализ способов мониторинга ионосферы для сбора данных о ее состоянии, с целью определения возможностей развития измерения параметров ионосферы и радиолиний, использования собранных сведений для проектирования адаптивных систем декаметрового радиосвязи.

При рассмотрении характеристик направленного действия передающих антенн было установлено, что в вертикальной плоскости излучение энергии происходит под разными углами к горизонту. Энергия радиоволн, излучаемая под большими углами к горизонту (больше $10\text{--}15^\circ$), отрывается от поверхности земли и в создании поля земной волны не участвует. Однако эта часть энергии может быть использована для передачи сигналов, благодаря наличию в верхних слоях атмосферы ионизированных областей. Они обладают способностью отражать радиоволны.

Радиоволны, отраженные от ионосферы, называют ионосферными. Связь, осуществляемую с помощью этих волн, называют связью ионосферным (пространственным) лучом [1]. При связи ионосферным лучом, радиоволны, распространяясь от передающей станции А к приемной В, проходят путь АВВ, показанный на рис. 1 стрелками. Как видно из рисунка, ионосферные волны на всем протяжении от передатчика до приемника распространяются вдали от земли. Напряженность поля в точке приема В зависит только от электрических свойств ионизированных слоев атмосферы.

Строение ионосферы. До недавнего времени считалось, что земная атмосфера простирается на высоту до $800\text{--}1000$ км. Однако согласно данным, полученным при запуске советских искусственных спутников Земли и Солнца, стало известно, что земная атмосфера простирается гораздо выше. Благодаря существованию восходящих воздушных потоков верхний слой атмосферы имеет такой же состав газов, что и у поверхности земли. На больших высотах происходит расслоение атмосферы, причем молекулы более легких газов, составляющих атмосферу, располагаются преимущественно в вышележащих слоях. С удале-

нием от поверхности земли изменяется и давление, а следовательно, и плотность атмосферы (число молекул, приходящихся на 1 см^3). Так, у поверхности Земли число молекул в 1 см^3 достигает $2,7 \cdot 10^{19}$, а на высоте 250 км, где давление ориентировочно равно $2 \cdot 10^{-11}$ миллиметров ртутного столба, плотность составляет всего лишь $7 \cdot 10^5$ молекул в 1 см^3 [2].

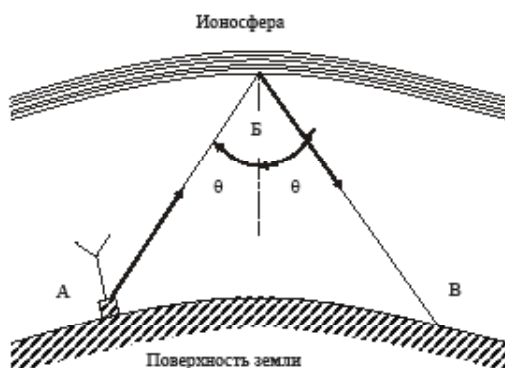


Рис. 1. Ход луча радиоволн при распространении ионосферным лучом

Земная атмосфера непрерывно находится под воздействием космических излучений различного происхождения в виде электромагнитных волн и частиц энергии (корпускул), которые достигая атмосферы земли, сталкиваются с молекулами или атомами газов, расщепляют их, отдавая им часть своей энергии. При этом из атомов и молекул выделяются свободные электроны и положительно заряженные частицы – ионы. С течением времени свободные электроны и ионы могут сталкиваться друг с другом и создавать снова нейтральные атомы и молекулы. Процесс отрывания от атомов и молекул свободных электронов называют ионизацией, а процесс воссоединения электронов с ионами – рекомбинацией. Основным источником ионизации земной атмосферы являются ультрафиолетовые лучи, испускаемые солнцем.

Из физики известно, что для ионизации молекул того или иного газа требуется определенная энергия, различная для разных газов. Учитывая это, а также указанное выше распределение газов в атмосфере по высоте, можно ожидать наличия в ней областей с максимумом и минимумом ионизации [3]. Такое предположение подтверждается многочисленными экспериментами, в том числе и результатами, добытыми при запуске искусственных спутников Земли. В настоящее время установлено существование в атмосфере четырех явно выраженных слоев (максимумов) ионизации, обозначаемых буквами D, E, F₁ и F₂. Примерное удаление этих слоев от земли показано на рис. 2.

Основной характеристикой слоев ионизации является количество свободных электронов в одном кубическом сантиметре – так называемая электронная концентрация.

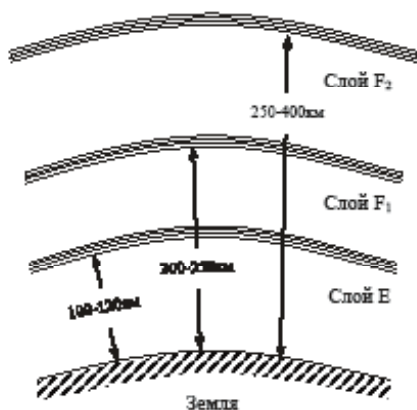


Рис. 2. Удаление ионизированных слоев атмосферы от поверхности земли; слой D располагается ниже слоя E

Электронная концентрация слоев зависит от интенсивности ионизирующих факторов, состава и плотности ионизируемого газа и скорости протекания процесса рекомбинации. Она может непрерывно изменяться как во времени, так и по месту на земном шаре, в соответствии с изменениями освещенности отдельных его областей. Наименьшая электронная концентрация наблюдается для слоя D, наибольшая – для слоя F_2 . С наступлением темноты, когда источник ионизации – солнечное излучение – экранируется землей, слой D может исчезать полностью. Слой F_1 также образуется лишь в дневное время, исчезая в ночное. Слои E и F_2 устойчиво наблюдаются в любое время суток, хотя их электронная концентрация в течение суток претерпевает значительные изменения, возрастая днем и уменьшаясь в ночное время. Исчезновение в ночное время слоев D и F_1 , а также уменьшение электронной концентрации слоев E и F_2 объясняется процессом рекомбинации, который протекает непрерывно, во время как ионизация происходит главным образом при солнечном освещении, т.е. в дневное время [4].

Преломление и отражение радиоволн в ионосфере. Ионизированные слои атмосферы могут изменять направление распространения радиоволн и поглощать большую или меньшую часть их энергии. Это можно упрощенно объяснить следующим образом. При распространении электромагнитных волн в ионосфере находящиеся в ней свободные электроны под действием поля распространяющейся волны приходят в колебательное движение и создают свое электромагнитное поле излучения.

Под действием поля колеблющихся электронов, проходящая волна изменяет свое направление в сторону уменьшения электронной концентрации слоя. Как это установлено исследованиями, электронная концентрация слоя возрастает от его нижней кромки (от границы, обращенной к земле), достигая максимума в более высоких областях. Поэтому радиоволны,

попадая в слой ионосферы, под тем или иным углом преломляются постепенно в сторону земли до тех пор, пока не выйдут из него. Это явление называют отражением радиоволн от ионосферы.

Перемещение электронов полем входящей волны связано для нее с потерей части энергии, которая возрастает с увеличением длины волны (периода колебаний), так как при этом увеличивается амплитуда перемещений электронов. Амплитуда напряженности поля, создаваемого перемещающимися электронами, а следовательно, и его влияние на поле входящей волны также возрастают с увеличением длины волны [5].

Из сказанного вытекают следующие важные заключения:

1. Чем больше в слое с заданной электронной концентрацией происходит поглощение энергии радиоволн и их преломление, тем больше длина волны.

2. Чем больше поглощение энергии радиоволн и их преломление для заданной длины волны, тем больше электронная концентрация ионизированного слоя.

Зная электронную концентрацию слоя ионизации, можно заранее определять условия поглощения и преломления в нем радиоволн той или иной длины.

Если волна очень короткая, то электронная концентрация слоя F_2 может оказаться недостаточной для их отражения. Такие волны на поверхность земли не возвращаются, они проходят через слой ионизации и уходят в мировое пространство.

Таким образом, можно наблюдать следующие особенности связи ионосферным лучом: сравнительно длинные волны в дневное время отражаются уже от слоя E. Если электронная концентрация слоя E для их отражения недостаточна, то они проходят через этот слой и отражаются от слоя F_1 или F_2 . Проходя два раза через нижележащие слои (при движении от земли к отражающему слою и от этого слоя к земле), они теряют часть своей энергии, и падают на землю ослабленными. При этом более ослабленными оказываются наиболее длинные волны. Уменьшая длину волны, можно достигнуть резкого уменьшения поглощения ее энергии в нижележащих слоях. Однако уменьшать длину волны можно лишь до тех пор, пока она еще отражается от слоя F_2 , имеющего наибольшую электронную концентрацию. Дальнейшее укорочение волны может привести к тому, что она не будет отражаться ни от одного слоя. Осуществить связь ионосферным лучом на такой волне невозможно.

Для связи ионосферным лучом применяются преимущественно короткие волны с расчетом отражения их от слоя F_2 . Влияние на связь нижележащих слоев в этом случае сказывается лишь в том, что в них поглощается часть энергии радиоволн, причем чем больше, тем длиннее волна.

Электронная концентрация слоев ионизации колеблется в широких пределах в течение суток, време-

ни года, одиннадцатилетнего периода солнечной активности, а также географического положения наблюдаемых точек [6]. Кроме регулярных изменений состояния ионосферы, вызываемых перечисленными выше причинами, наблюдаются нерегулярные резкие изменения (ионосферные возмущения), связанные с эпизодическими вспышками солнечной активности.

Ввиду того что состояние ионосферы непрерывно меняется, естественно ожидать, что напряженность поля ионосферного луча будет меняться непрерывно. Действительно, как показывают многочисленные исследования, напряженность поля ионосферных волн с течением времени меняется в очень широких пределах.

Для получения круглосуточного устойчивого приема возникает необходимость предварительно изучать состояние ионосферы, чтобы использовать волны, которые меньше всего поглощаются в ионосфере и могут отражаться от нее.

Изучением состояния ионосферы на ответственных трассах радиосвязи занимается (в государственном или ведомственном масштабе) специальная служба, называемая ионосферной службой. В прогнозах (бюллетенях) этой службы обычно указывается: в какое время года и суток, на какие расстояния, какие волны будут наиболее эффективными, т.е. будут распространяться с наименьшим затуханием [7].

Выбор рабочих частот для связи ионосферным лучом. Самую короткую волну, которая еще может отразиться от данного слоя ионизации при излучении в зенит (рис. 3), называют критической волной, а соответствующую ей частоту $f_{кр}$ – критической частотой этого слоя. Если волны встречаются тот же ионизированный слой под некоторым углом, меньшим 90° , или, согласно рисунку 3 под углом $\theta > 0^\circ$ (наклонное падение), то от него могут отражаться волны, имеющие частоту колебаний $f_{раб}$ соответствующую более высоким частотам, чем $f_{кр}$. Зависимость $f_{раб}$ от угла падения радиоволн на слой ионосферы и от критической частоты $f_{кр}$ выражается следующим соотношением:

$$f_{раб} = \frac{f_{кр}}{\cos \theta}, \quad (1)$$

где $f_{раб}$ – рабочая частота; θ – угол падения волн на ионосферу.

Как видно, для данной $f_{кр}$ рабочая частота возрастает с увеличением θ . Волны, имеющие частоту колебаний выше найденной из соотношения (1), отражаться при падении под углом $\theta_2 < \theta_1$ не будут. Не будут отражаться и волны той же длины, но излучаемые под углом $\theta_2 < \theta_1$. Волны, имеющие частоту колебаний меньше $f_{раб}$ найденной из выражения (1), хотя и будут отражаться, но невыгодны для связи вследствие большого затухания в нижележащих слоях.

Расстояние АВ от передатчика до точки, в котором

отраженный от ионосферы луч достигает земли, называют расстоянием скачка ионосферной волны. Нетрудно определить, что это расстояние зависит от угла θ и высоты h отражающего слоя ионосферы. Так, для $\theta = 45^\circ$ и $h = 300$ км расстояние скачка $AB = 2 \cdot 300 \cdot \text{tg } 45^\circ = 600$ км. При удалении меньше указанного расстояния, поле будет сильно ослаблено или полностью отсутствовать. Зона местности между передающим и приемным пунктами, в которой прием невозможен, называется «зоной отсутствия слышимости» («мертвой зоной») [8].

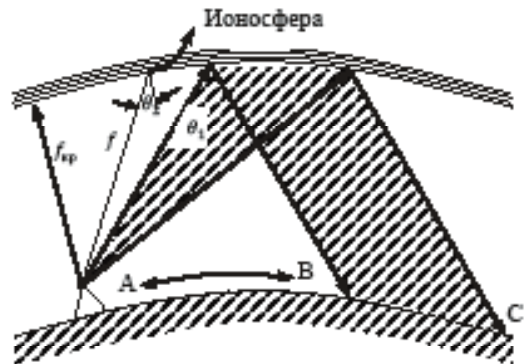


Рис. 3. Зависимость отражения радиоволн от частоты и от угла встречи радиолучей с ионизированным слоем

Критические частоты связаны с величиной электронной концентрации слоев-ионизации, поэтому их значения также меняются в широких пределах в течение суток, сезонов года и т.д. В среднем их значения колеблются в пределах: для F_2 – 4–8 МГц; для F_1 – 4–5 МГц; для E – 1–3,5 МГц.

Считая наименьший угол к горизонту, под которым радиоволны распространяются еще ионосферным лучом, равным 10° , получим расстояние скачка в 3500 км. Это расстояние и будет наибольшей дальностью действия радиостанции ионосферным лучом при однократном отражении радиоволн от ионосферы. Для получения таких дальностей при одном скачке луча в дневное время применяют волны длиной 10–25 м, в ночное время 35–100 м.

Если рабочая волна выбрана равной критической, а антенна дает излучение под любыми углами к горизонту, то отражение будет при любых углах излучения. Мертвой зоны в этом случае не будет. Для иллюстрации сказанного на рис. 4 показано примерное распределение уровней напряженности поля ионосферной волны вдоль земной поверхности, создаваемое антенной зенитного излучения. Ординаты отдельных точек кривой CD показывают в некотором масштабе величины напряженности поля по мере удаления от передатчика.

Из изложенного следует, что со стороны более высоких частот выбор рабочей волны ограничивается критической частотой или условиями отражения [9]. Волны, длиннее выбранной по критической частоте



Рис. 4. Изменение напряженности поля ионосферного луча в зависимости от удаления от передатчика

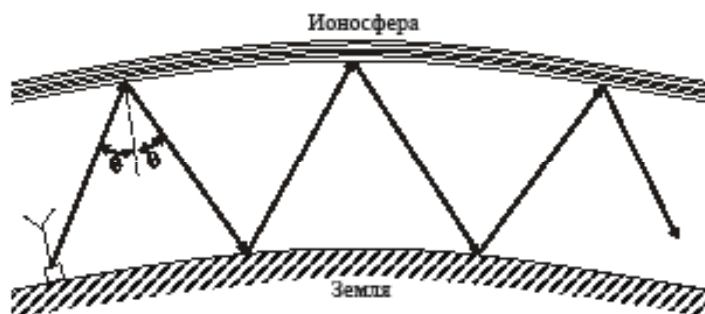


Рис. 5. Путь пространственной волны при многократном отражении от ионосферы и земли

те отражаются, но претерпевают большее поглощение в нижележащих слоях ионосферы, и поэтому их применение нецелесообразно. Следовательно, рабочие частоты со стороны низких, ограничиваются фактором поглощения.

Используя ионосферные волны, можно получать радиосвязь на весьма большие расстояния при относительно небольших мощностях передатчика и гарантированно обеспечивать безопасность каналов связи. Путь лучей радиоволн при связи на сверхдальние расстояния показан на рис. 5. После отражения от ионосферы радиоволны направляются к поверхности земли, и отражаясь от нее, снова достигают ионосферы, и после вторичного отражения направля-

ются к поверхности земли, и так до тех пор, пока энергия волны после многократных отражений не будет полностью израсходована на потери в ионосфере и в земле.

При достаточно большой мощности передатчика с применением антенн остронаправленного действия на выбранных волнах можно получить практически регулярную радиосвязь между любыми точками земного шара.

Волны порядка 7–10 м более или менее регулярно отражаются лишь от слоя F_2 в годы максимальной солнечной активности, когда резко возрастает электронная концентрация этого слоя. От других регулярных слоев, рассмотренных выше, они не отражаются [10].

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн / С.И. Баскаков. М.: КД Либроком, 2015. 416 с.
2. Ерохин Г.А. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Г.А. Ерохин, О.В. Чернышев, Н.Д. Козырев. М.: ГЛТ, 2007. 491 с.
3. Кураев, А.А. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын. М.: НИЦ Ин-фра-М, Нов. знание, 2013. 424 с.
4. Муромцев Д.Ю. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие, доп. / Д.Ю. Муромцев, Ю.Т. Зырянов. СПб.: Лань, 2014. 448 с.
5. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. М.: КД Либроком, 2015. 544 с.
6. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов / Б.М. Петров. М.: Горячая линия - Телеком, 2014. 558 с.
7. Сомов, А.М. Распространение радиоволн и антенны спутниковых систем связи: Учебное пособие для вузов / А.М. Сомов. М.: РиС, 2015. 456 с.

8. Старостин Н. Распространение радиоволн: Учебное пособие / Н. Старостин. М.: Гелиос АРВ, 2010. 264 с.
9. Юндин, М.А. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие / М.А. Юндин, А.М. Королев. СПб.: Лань, 2014. 448 с.
10. Яковлев О.И. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. М.: Ленанд, 2017. 496 с.

References

1. Baskakov S.I. Electrodynamics and propagation of radio waves / S.I. Baskakov. - M.: CD Librocom, 2015. 416 p.
2. Erokhin G.A. Antenna-feeder devices and radio wave propagation / G.A. Erokhin, O.V. Chernyshev, N.D. Kozyrev. M.: GLT, 2007. 491 p.
3. Kuraev A.A. Electrodynamics and radio wave propagation: Textbook / A.A. Kuraev, T.L. Popkova, A.K. Sinitsyn. M.: SIC In-fra-M, Nov.knowledge, 2013.424 p.
4. Muromtsev D.Yu. Electrodynamics and propagation of radio waves: Textbook, supplement / D.Yu. Muromtsev, Yu.T. Zyryanov. St. Petersburg: Lan, 2014. 448 p.
5. Nikolsky V.V. Electrodynamics and propagation of radio waves / V.V. Nikolsky, T.I. Nikolskaya. M.: CD Librocom, 2015. 544 p.
6. Petrov B. M. Electrodynamics and propagation of radio waves: the Textbook for high schools / B. M. Petrov. M.: Goryachaya Liniya - Telekom, 2014. 558 p.
7. Somov A. M. wave Propagation and antenna channels.-output communication systems: textbook for universities / A. Somov. M.: Rice, 2015. 456 p.
8. Starostin N. Propagation of radio waves: A textbook / N. Starostin. M.: Helios ARV, 2010. 264 p.
9. Yundin M.A. Electrodynamics and radio wave propagation: A textbook / M.A. Yundin, A.M. Korolev. St. Petersburg: Lan, 2014. 448 p.
10. Yakovlev O.I. Propagation of radio waves / O.I. Yakovlev, V.P. Yakubov, V.P. Uryadov, A.G. Paveliev. M.: Lenand, 2017. 496 p.

СТЕПАНЦОВА Алёна Михайловна, студентка, «Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики». Россия, 630102, Сибирский федеральный округ, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86. E-mail: alena169vega@yandex.ru

STEPANCOVA Aljona Mihajlovna, student, "Siberian State University of Telecommunications and Informatics". Russia, 630102, Siberian Federal District, Novosibirsk region, Novosibirsk, Kirova str., 86. E-mail: alena169vega@yandex.ru

ПЕТУХОВ Александр Георгиевич, инженер, войсковая часть 15644. Россия, 416540, Астраханская обл., г. Знаменск. E-mail: putnik0879@mail.ru

PETUKHOV Alexander Georgievich, engineer, military unit 15644. Russia, 416540, Astrakhan region, Znamensk. E-mail: putnik0879@mail.ru

ДЕЛОГ Андрей Николаевич, инженер, войсковая часть 15644. Россия, 416540, Астраханская обл., г. Знаменск. E-mail: delog_mga@mail.ru

DELOG Andrey Nikolaevich, engineer, military unit 15644. Russia, 416540, Astrakhan region, Znamensk. E-mail: delog_mga@mail.ru

СТЕПАНЦОВ Сергей Валерьевич, инженер, войсковая часть 15644. Россия, 416540, Астраханская обл., г. Знаменск. E-mail: cjrjkjdj@mail.ru

STEPANCOV Sergej Valer'evich, engineer, military unit 15644. Russia, 416540, Astrakhan region, Znamensk. E-mail: cjrjkjdj@mail.ru