

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1087-1093

## COMPARATIVE ANALYSIS OF S, X, $K_a$ FREQUENCY SHIP'S RADARS

**A. P. Gorobtsov, A. N. Marinich, Y. M. Ustinov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The article is devoted to comparative analysis of ship's radars designed for the S and X band. In addition, an assessment was effected of the prevalence of radars transmitting in the Ka band. Ka-radars are generally used for ship ice operations, on-shore infrastructure of vessel traffic management systems, security of ports and terminals, and for research. The task of selecting shipborne radar stations is relevant for shipowners in the process of acquiring new ships or updating the ship's navigation equipment. The capabilities of shipborne radars can be to a certain extent adapted to the conditions of the radar observation of the ship's navigation areas. This is primarily applicable to vessels designed to operate in specific navigation areas, for example, icebreakers.*

*Radar analysis shown that S-radars have greater target detection range, more powerful transmitter and larger size of antennae for the equivalent polar diagrams. Length of antennae is proportional to wavelength of appropriate frequency. Proportion between the target detection range and output power of transmitter for existing radars does not neatly conform the main radar equation. It is evident due to attenuation of signal power in conformity to wavelength in the Earth Standard Atmosphere and weather conditions, and influence of radar waves refraction (propagation conditions) are not taken into account. Regarding Ka-radar it needed to note that trials are still in force now. The decision about a ship to be equipped with Ka-radar can be accepted after additional tests with shorter duration of impulses and increase in demand for ship operations in ice conditions.*

*Keywords: S-radar, X-radar, Ka-radar, radar detection range, output power of transmitter, size of antennae, influence of meteorological conditions, radio wave refraction.*

### For citation:

Gorobtsov, Alexander P., Alexander N. Marinich, and Yury M. Ustinov. "Comparative analysis of S, X, Ka frequency ship's radars." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1087–1093. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1087-1093.

УДК 629.052.3, 629.058

## СОПОСТАВЛЕНИЕ СУДОВЫХ РАДАРОВ, РАБОТАЮЩИХ В S-, X-, $K_a$ -ДИАПАЗОНАХ

**А. П. Горобцов, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье проводится сравнительный анализ судовых радиолокационных станций (РЛС), работающих в S- и X-диапазонах. Кроме того, дана оценка распространенности РЛС, излучающих в  $K_a$ -диапазоне, которые используются при работе судов во льдах, на береговых объектах управления движением судов (для защиты портов и терминалов), а также в исследовательских разработках. Задача выбора судовых радиолокационных станций актуальна для судовладельцев при оснащении новых судов или обновлении навигационного оборудования судна. Возможности судовых РЛС могут быть в определенной степени адаптированы к условиям радиолокационного наблюдения районов плавания судна. В первую очередь это применимо к судам, спроектированным для работы в конкретных районах плавания, например, к ледоколам.*

*Из сопоставления РЛС следует, что S-радары имеют большую дальность обнаружения целей, большую мощность передатчиков и большие размеры антенн при одинаковой их направленности. Длины антенн пропорциональны длине волны используемых диапазонов частот. Показано, что соотношение между дальностью обнаружения целей и выходной мощностью эксплуатируемых РЛС не соответствует основному уравнению радиолокации, так как в уравнении не учитываются ослабление мощности зондирующих сигналов в стандартной атмосфере Земли и при различных погодных условиях, а также изменение дальности в условиях рефракции радиоволн. Для повышения эффективности радиолокационного наблюдения*

предлагается размещать на судах  $K_a$ -радары, находящиеся в опытной эксплуатации, после дополнительных испытаний с меньшей длительностью зондирующих импульсов при условии повышения спроса на работу судов в ледовых условиях.

*Ключевые слова:* S-радар, X-радар,  $K_a$ -радар, дальность обнаружения цели, выходная мощность передатчика, длина антенны, влияние погодных условий, рефракция радиоволн.

**Для цитирования:**

Горобцов А. П. Сопоставление судовых радаров, работающих в S-, X-,  $K_a$ -диапазонах / А. П. Горобцов, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1087–1093. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1087-1093.

### Введение (Introduction)

В соответствии с Резолюцией А.477 (XII) ИМО все судовые радары должны при нормальных условиях рефракции радиоволн обеспечивать четкую индикацию следующих объектов:

- береговой черты при высоте берега 60 м на расстоянии 20 морских миль и при высоте берега 6 м — на удалении семи морских миль;
- судов вместимостью 5000 на удалении семи морских миль и судов с вместимостью 200 — на удалении двух морских миль.

В судовой радиолокации, в отличие от систем спутниковой связи, уже в течение нескольких лет параллельно развиваются, конкурируя друг с другом, три направления разработки РЛС [1]–[4]:

- S-радары, работающие в диапазоне 3 ГГц;
- X-радары, работающие в диапазоне 9 ГГц;
- $K_a$ -радары, работающие в диапазоне 33 ГГц.

Судовые S- и X-радары многих типов выпускаются в России и за рубежом. Среди отечественных радаров широкую известность получили РЛС типа «Галс», «Лиман», «Наяда», «Океан», «Ряд», «Обзор» и др. Среди зарубежных фирм, выпускающих радары, наиболее известными являются: FURUNO, JRC, KODEN, SI-TEX (Япония), SIMRAD/ANRITSU (Норвегия), Litton Marine Systems (Великобритания).

Задача выбора судовых радиолокационных станций, соответствующих особенностям района плавания судна, является, в первую очередь, актуальной для судов специального назначения: ледоколов, исследовательских судов, а также судов обеспечения морских операций на шельфе. Создание «автономных» или «безэкипажных» судов, на которых отсутствуют члены экипажа, также формирует новый вызов для радиолокационной техники, выбора оптимальных диапазонов ее работы, размещения антенн или сенсоров на судне и т. д. Для решения задачи выбора РЛС необходимо выполнить объективное сопоставление судовых радаров.

В современных судовых РЛС приемопередатчик совместно с антенной устанавливаются на специальной площадке судовой мачты [5]. Приемопередатчик в герметичном кожухе устройства сканирования размещается непосредственно под антенной. При таком размещении волноводный тракт сокращается до минимума, потери мощности значительно сокращаются. При наличии антенно-волноводного тракта от антенны до приемопередатчика внутри судна потери составляют до 50 %. Качество герметизации и надежность элементов позволяют создавать приемопередатчики, которые в течение нескольких лет работают без ремонта и обслуживания.

Трехсантиметровые X-радары входят в состав обязательного оборудования для судов валовой вместимостью более 300, на суда с вместимостью более 3000 должны устанавливаться две РЛС, одна из которых может быть S-радаром.  $K_a$ -радары (длина волны 0,9 см) находятся в опытной эксплуатации и в настоящее время на судах широко не применяются [5], [6].

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Из сопоставления характеристик выпускаемых типов S- и X-радаров можно сделать следующий вывод: S-радары имеют большую выходную мощность, большую дальность обнаружения целей и большие размеры антенн. По рекомендациям ИМО, допустимая ширина диаграммы на-

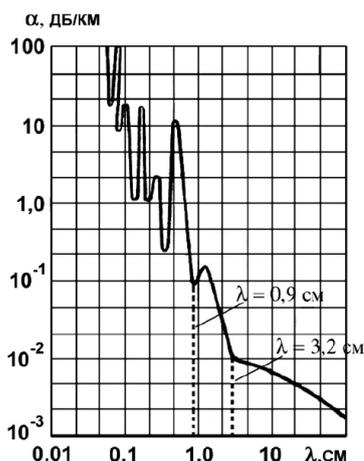


Рис. 1. Зависимость погонного затухания сигнала  $\alpha$  в атмосфере Земли при нормальных погодных условиях от длины волны  $\lambda$

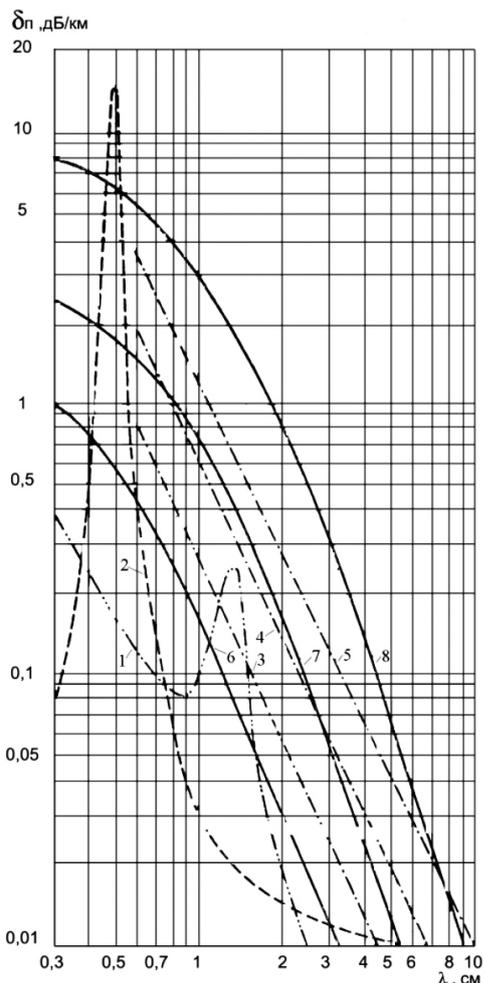


Рис. 2. Ослабление сигнала в атмосфере Земли при различных погодных условиях:

- 1 — водяной пар; 2 — кислород; 3 — туман (видимость 150 м); 4 — туман (видимость 60 м); 5 — туман (видимость 30 м); 6 — слабый дождь (1 мм/ч); 7 — средний дождь (4 мм/ч); 8 — сильный дождь (16 мм/ч)

правленности судовой антенны по горизонтали не должна превышать  $2^\circ$ , а по вертикали должна быть не менее  $20^\circ$ . Для  $S$ -радаров (длина волны 9,8 см) такие характеристики обеспечивает апертура антенны длиной 2,8 м и шириной 0,28 м. Для  $X$ -радаров длина апертуры антенны в три раза меньше и составляет 0,9 м, для  $K_a$ -радаров — 0,3 м. Коэффициент усиления таких антенн в  $S$ -,  $X$ - и  $K_a$ -диапазонах при КПД = 0,7 одинаков и равен 700.

На основании основного уравнения радиолокации расчетная формула для дальности обнаружения цели  $D$  (в свободном пространстве) имеет вид [2]:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_u G S_{\text{эф}} S_a}{16\pi^2 m P_{\text{пр min}}}}$$

где  $P_u$  — выходная мощность передатчика;  $G$  — коэффициент усиления антенны;  $S_{\text{эф}}$  — эффективная площадь рассеяния цели;  $S_a$  — площадь апертуры антенны;  $m = 10$ ;  $P_{\text{пр min}}$  — чувствительность приемника.

Из приведенного уравнения следует, что уменьшение дальности обнаружения цели в два раза происходит при уменьшении выходной мощности в 16 раз, а если условия эксплуатации позволяют уменьшить искомую дальность в три раза, то выходная мощность может быть уменьшена в 81 раз. В основном уравнении для свободного пространства отсутствует зависимость дальности обнаружения целей в атмосфере Земли от длины волны. На рис. 1 показана зависимость погонного затухания  $\alpha$  мощности сигнала в атмосфере Земли при нормальных погодных условиях от длины волны  $\lambda$ .

Соотношение между разной выходной мощностью и максимальной дальностью не соответствует основному уравнению радиолокации, так как дальность меняется в условиях земной атмосферы и при различных видах рефракции. Сложные погодные условия приводят к уменьшению дальности и, напротив, некоторые виды рефракции — к значительному увеличению дальности [7]–[12]. На рис. 2 приведены графики погонного удельного ослабления сигнала в атмосфере Земли при различных погодных условиях для различных длин волн.

На рис. 3 показано, как меняется дальность обнаружения цели  $D_{\text{max атм}}$  при различных  $\delta_n$

по сравнению с дальностью  $D_{\max}$  в стандартной атмосфере. Графики построены для случая, когда на всей трассе распространения сигнала РЛС условия одинаковы.

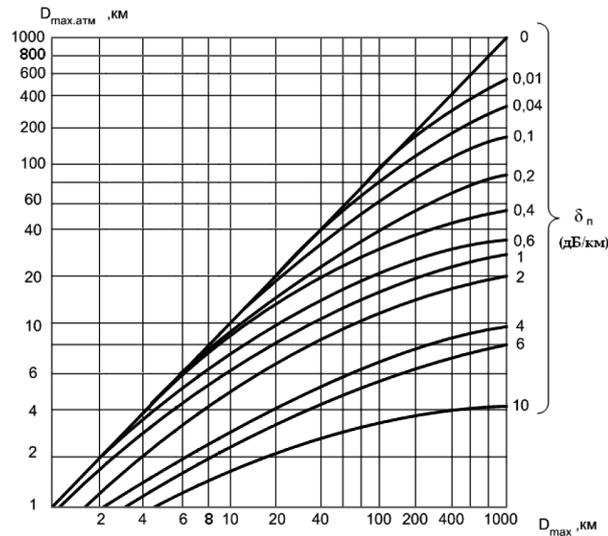


Рис. 3. Соотношение между дальностями обнаружения цели в сложных и нормальных погодных условиях в зависимости от погонного затухания сигналов в атмосфере Земли на всей длине трассы

Из рис. 3 следует, что при сильном дожде при  $\lambda = 10$  см величина  $\delta_n = 0$ , поэтому дальность обнаружения цели не меняется. Для  $\lambda = 3$  см величина  $\delta_n = 0,3$  дБ/км. Дальность обнаружения цели не меняется, если  $D_{\max} < 8$  км. Если  $D_{\max} = 200$  км, то, из-за дождя, дальность уменьшается до 50 км.

На условия прохождения зондирующих сигналов РЛС в атмосфере Земли оказывает существенное влияние рефракция сигналов. Различают четыре вида рефракции: субрефракция, стандартная рефракция, суперрефракция и сверхрефракция. Среди них «наихудшей» является субрефракция, которая возникает в полярных широтах вблизи береговой черты, когда температура водной поверхности превышает температуру нижних слоев воздуха. Явление субрефракции возникает неожиданно и может привести к аварийной ситуации, так как цели, хорошо видимые ранее, пропадают с экранов РЛС. При субрефракции траектория луча искривляется вверх и может проходить выше ранее видимых целей. Явление субрефракции проявляется независимо от длины волны зондирующих сигналов. На рис. 4 приведены области различных видов рефракции, величины изменения дальности обнаружения целей указаны в источнике [2].



Рис. 4. Области субрефракции, стандартной рефракции, суперрефракции и сверхрефракции в зависимости от изменения показателя преломления  $n$  с высотой  $h$  в нижних слоях атмосферы Земли

### Результаты (Results)

Возможность применения судовых РЛС в  $K_a$ -диапазоне определяется по результатам опытной эксплуатации  $K_a$ -радаров.  $K_a$ -радар имеет выходную мощность 8 кВт, коэффициент усиления антенны — 7000, длину антенны — 2,5 м, максимальную дальность обнаружения целей при различных погодных условиях — 6–24 км, длительность импульсов — 0,05–0,2 мкс [2], [13], [14]. Характеристика радара существенно меняется в зависимости от длительности зондирующих импульсов, так как при их уменьшении возрастает разрешающая способность по дальности и появляется возможность различать фрагменты цели по «сырому изображению» цели на экране индикатора. Кроме того, при малой длительности импульсов уменьшаются дисперсные помехи от гидрометеоров и взволнованной морской поверхности.

Возможность изменения длительности импульсов в широких пределах в  $K_a$ -радаров не реализована, кроме того,  $K_a$ -радары имеют низкую надежность, так как необходимым является размещение двух комплектов приемопередатчиков в устройстве сканирования.

### Обсуждение (Discussion)

При сопоставлении РЛС  $S$ -,  $X$ - и  $K_a$ -диапазонов следует учитывать, что дальность обнаружения целей в атмосфере Земли при одинаковой мощности передатчиков будет наибольшей для  $S$ -радара. Для  $S$ -радаров при выходной мощности 30 кВт максимальная шкала дальности равна 96 или 120 морских миль (соответственно 177 или 221 км). Для  $X$ -радаров выходная мощность передатчиков для различных типов РЛС равна 2, 4, 6, 10, 25, 30 кВт. При этом максимальная шкала дальности 48, 72, 96, 120 морских миль (соответственно 88, 132, 177, 221 км).

### Заключение (Conclusion)

Сопоставление  $S$ -,  $X$ - и  $K_a$ -радаров возможно по результатам сравнения характеристик судовых РЛС. Сравнение следует проводить с учетом работы РЛС в различных погодных условиях и при различной рефракции атмосферы Земли. До принятия решения о размещении на судах  $K_a$ -радаров целесообразно выполнить оценку эффективности их работы при меньшей длительности зондирующих импульсов после повышения надежности электронных устройств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маринич А. Н.* Современные судовые и береговые радиолокационные станции (радары) отечественных и зарубежных фирм: монография / А. Н. Маринич [и др.]. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2012. — 166 с.
2. *Афанасьев В. В.* Судовые радиолокационные системы: учеб. / В. В. Афанасьев [и др.]; под ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Веленара, 2009. — 365 с.
3. *Дуров А. А.* Судовые радионавигационные приборы: учеб. / А. А. Дуров [и др.]. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2010. — Ч. 1: Радиолокационные станции. — 264 с.
4. *Горобцов А. П.* Технические средства судовождения: учебник / А. П. Горобцов [и др.]; под ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Морстар, 2016. — Т. 3: Судовые приборы электронной навигации. — 472 с.
5. *Маринич А. Н.* Радиолокационное обнаружение нефтяных пятен на взволнованной морской поверхности / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 64–69.
6. *Pasya I.* Joint direction-of-departure and direction-of-arrival estimation in an ultra-wideband MIMO radar system / I. Pasya, N. Iwakiri, T. Kobayashi // Radio and Wireless Symposium (RWS), 2014 IEEE. — IEEE, 2014. — Рр. 52–54. DOI: 10.1109/RWS.2014.6830115.
7. *Маринич А. Н.* Сравнительная оценка информативности судовой РЛС/САПП в режимах радиолокационного измерения и OVERLAY с использованием данных АИС-целей / А. Н. Маринич [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 21–23.
8. *Маринич А. Н.* Мешающее действие туманов и снежных метелей на работу РЛС на трассе Северного морского пути / А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 46–47.

9. Афанасьев В. В. Негативное влияние сложных погодных условий на работу радиолокационной станции на трассе Северного морского пути / В. В. Афанасьев, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 31. — С. 296.
10. Афанасьев В. В. Оценка мешающего действия дождя на работу 10, 3 и 0,9-см радиолокационных станций / В. В. Афанасьев, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 1 (55). — С. 21–24.
11. Lothes R. Radar Vulnerability to Jamming / R. N. Lothes, M. B. Szymansky, R. G. Wiley. — Norwood, MA, Artech House, 1990. — 258 p.
12. Шахнов С. Ф. Расчет функции ослабления поля контрольно-корректирующих станций с учетом влияния подстилающей поверхности / С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 116–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-116-123.
13. Matrosov S. Y. Prospects for Measuring Rainfall Using Propagation Differential Phase in X- and Ka-Radar Bands / S. Y. Matrosov, R. A. Kropfli, R. F. Reinking, B. E. Martner // Journal of Applied Meteorology. — 1999. — Vol. 38. — Is. 6. — Pp. 766–776. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0766:PFMRUP>2.0.CO;2.
14. Красюк В. Н. Особенности распространения радиоволн миллиметрового диапазона, перспективы их использования в современных радиотехнических системах / В. Н. Красюк, О. Ю. Платонов, А. Ю. Мельникова // Информационно-управляющие системы. — 2003. — № 4(5). — С. 33–38.

## REFERENCES

1. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, Yu. M. Ustinov, V. S. Kan, and A. V. Bezumov. *Sovremennye sudovye i beregovye radiolokatsionnye stantsii (radary) otechestvennykh i zarubezhnykh firm: monografiya*. Petropavlovsk-Kamchatskii: Izd-vo KamchatGTU, 2012.
2. Afanas'ev, V. V., A. N. Marinich, A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Sudovye radiolokatsionnye sistemy: uchebnik*. Edited by Yu. M. Ustinova. SPb.: Velenara, 2009.
3. Durov, A. A., V. S. Kan, A. N. Marinich, A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Sudovye radionavigatsionnye pribory. Uchebnik dlya vuzov. Chast' 1. Radiolokatsionnye stantsii*. Petropavlovsk-Kamchatskii: KamchatGTU, 2010.
4. Gorobtsov, A. P., A. N. Marinich, A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Tekhnicheskie sredstva sudovozhdeniya: uchebnik*. Tom 3. Sudovye pribory elektronnoi navigatsii. Edited by Yu. M. Ustinova. SPb.: Morstar, 2016.
5. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. "Radiolokatsionnoe obnaruzhenie neftyanykh pyaten na vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 37 (2014): 64–69.
6. Pasya, Idnin, Naohiko Iwakiri, and Takehiko Kobayashi. "Joint direction-of-departure and direction-of-arrival estimation in an ultra-wideband MIMO radar system." *Radio and Wireless Symposium (RWS), 2014 IEEE*. IEEE, 2014. 52–54. DOI: 10.1109/RWS.2014.6830115.
7. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, Y. M. Ustinov, and A. R. Shigabutdinov. "Comparative estimation of information provided by RADAR/ARPA in the modes of the radio-location measuring and OVERLAY with the use of these AIS-targets." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 21–23.
8. Marinich, A. N., and Y. M. Ustinov. "Interference of fogs and snow blizzards on RADAR operation along Northern Sea Route." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(62) (2010): 46–47.
9. Afanas'ev, V. V., A. N. Marinich, and Yu. M. Ustinov. "Negativnoe vliyanie slozhnykh pogodnykh uslovii na rabotu radiolokatsionnoi stantsii na trasse Severnogo morskogo puti." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 31 (2011): 296.
10. Afanasiev, V. V., A. N. Marinich, and Y. M. Ustinov. "Rain interference on the 10.3 and 0.9 radars performance." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(55) (2009): 21–24.
11. Lothes, Robert N., Michael B. Szymansky, and Richard G. Wiley. *Radar Vulnerability to Jamming*. Norwood, MA, Artech House, 1990.
12. Shakhnov, S. F. "Calculation of function field weakening of the control and correction stations taking into account the influence of the underlying surface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 116–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-116-123.

13. Matrosov, Sergey Y., Robert A. Kropfli, Roger F. Reinking, and Brooks E. Martner. "Prospects for measuring rainfall using propagation differential phase in X-and Ka-radar bands." *Journal of Applied Meteorology* 38.6 (1999): 766–776. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0766:PFMRUP>2.0.CO;2

14. Krasnyuk, V. N., O. Yu. Platonov, and A. Yu. Mel'nikova. "Osobennosti rasprostraneniya radiovoln milimetrovogo diapazona, perspektivy ikh ispol'zovaniya v sovremennykh radiotekhnicheskikh sistemakh." *Informatcionno-upravlyayushchie sistemy* 4(5) (2003): 33–38.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горобцов Александр Петрович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [gorobtsovap@gumrf.ru](mailto:gorobtsovap@gumrf.ru)

**Маринич Александр Николаевич** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [marinichan@gumrf.ru](mailto:marinichan@gumrf.ru)

**Устинов Юрий Матвеевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_tsn@gumrf.ru](mailto:kaf_tsn@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Gorobtsov, Alexander P.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str, St.-Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [gorobtsovap@gumrf.ru](mailto:gorobtsovap@gumrf.ru)

**Marinich, Alexander N.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str, St.-Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [marinichan@gumrf.ru](mailto:marinichan@gumrf.ru)

**Ustinov, Yury M.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str, St.-Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_tsn@gumrf.ru](mailto:kaf_tsn@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2018 г.  
Received: September 13, 2018.