

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.874.4

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).422-441

Поступила в редакцию / Received 30.06.2025

ГРНТИ 47.49.27

Специальность ВАК 2.2.13.; 2.2.16.

Принята к публикации / Accepted 24.09.2025

Научная статья

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Михайлов В. Н.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
имени В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия)*

Аннотация. Интенсивность отраженных от морской поверхности сигналов зависит от большого количества различных факторов, определяемых как конструкцией радиотехнического средства, так и состоянием моря. Основным параметром, определяющим интенсивность отражения, является удельная эффективная поверхность рассеяния морской поверхности. В статье рассмотрены различные модели удельной эффективной поверхности рассеяния для малых углов скольжения, при различных условиях наблюдения, показаны границы их применимости. Произведен анализ точности относительно экспериментальных данных. На основе расчетов автор представил достаточно прозрачную методику оценки соответствия результатов использования моделей полученным эмпирическим данным.

Ключевые слова: *удельная эффективная поверхность рассеяния, морская поверхность, модель отражения, угол скольжения, угол визирования*

Для цитирования: Михайлов В. Н. Обзор моделей удельной эффективной поверхности рассеяния морской поверхности при малых углах скольжения // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 422–441. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).422-441

Research Article

REVIEW OF THE SEA NORMALIZED RADAR REFLECTIVITY AT LOW GRAZING ANGLES

Mikhailov V. N.

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (Saint Petersburg, Russia)

Abstract. The intensity of the signals reflected from the sea surface depends on the sea state, collection geometry, wind speed, direction, and radar frequency. The main parameter determining the intensity of reflection is the sea normalized radar reflectivity. The article discusses various models mean backscatter models at low grazing angles, under different observation conditions, and shows the limits of their applicability. The accuracy of the experimental data is analyzed. Based on the calculations, the author presented a fairly transparent methodology for assessing the compliance of the results of using models with the empirical data obtained.

Keywords: *normalized radar reflectivity, mean backscatter models, sea state, grazing angle, wind aspect*

For citation: Mikhailov V. N. Review of the sea normalized radar reflectivity at low grazing angles // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 422–441. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).422-441

Введение

На сегодняшний день существуют достаточно много моделей удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) морской поверхности, большинство из которых построены на основе экстраполяции экспериментальных данных. В прошлом проводилось много экспериментальных исследований по измерению УЭПР морской поверхности, наиболее обширные результаты были представлены в [1]. В литературе они получили название таблиц Натансона.

Если обратиться к обзорам моделей УЭПР за последних десять лет, например, [2–7] и др., то можно выделить несколько часто используемых. Сравним наиболее известные модели удельной ЭПР взволнованной морской поверхности при малых углах скольжения. Сначала определимся, какие углы будем считать малыми. Для этого обратимся к зависимости удельной ЭПР от угла скольжения. Эта зависимость имеет сложную форму и условно разделяется на три области: область квазизеркального отражения, область плато и область интерференции [3, 8, 9]. Также эти области называются областями больших, средних и малых углов [3, 4]. Все указанные источники сходятся в том, что границей между большими и средними углами является переходный угол, примерно равный 60 градусам. Критический угол, разделяющий средние и малые углы, зависит от длины радиоволны и высоты морских волн [9]. В [3, 4] указано, что критический угол приблизительно равен 10 градусам, источник [8] соглашается с ними, но отмечает, что он зависит от волнения моря. В статье также будем считать, что малые углы скольжения простираются до 10 градусов, что, как будет показано в дальнейшем, хорошо соотносится с областью применения моделей.

Заметим, что в литературе часто возникает путаница из-за того, что существует несколько шкал оценки интенсивности морского волнения. Большинство существующих моделей удельной ЭПР морской поверхности, как и экспериментальные данные Натансона используют оценку волнения по шкале Дугласа. Она интересна тем, что не только оценивает волнение, но и показывает его связь с параметрами ветра. В дальнейшем также будем придерживаться этой шкалы (таблица 1) [1, 8]. При составлении таблиц Натансона, а также в некоторых других источниках шкала Дугласа была дополнена состоянием моря в ноль баллов, которая соответствует значимой высоте волн менее 0,25 футов (8 см) и скорости ветра менее 4 узлов (2 м/с) [1, 10, 11]. В оригинальной шкале значения высоты волн и скорости ветра приведены в футах и узлах, соответственно. Для удобства в таблице 1 эти значения приведены так же в международной системе исчисления.

Таблица 1. Интенсивность волнения по шкале Дугласа

Состояние моря, баллы	Описание волнения	Значимая высота волн		Скорость ветра		Разгон ветра		Время действия ветра, часы
		футы	метры	узлы	метры в секунду	морские мили	километры	
1	Отсутствует	< 1	< 0,3	0 – 6	0 – 3,1			
2	Слабое	1 – 3	0,3 – 0,9	6 – 12	3,1 – 6,2	50	93	5
3	Умеренное	3 – 5	0,9 – 1,5	12 – 15	6,2 – 7,7	120	222	20
4	Жесткое	5 – 8	1,5 – 2,4	15 – 20	7,7 – 10,3	150	278	23
5	Очень жесткое	8 – 12	2,4 – 3,7	20 – 25	10,3 – 12,9	200	370	25
6	Сильное	12 – 20	3,7 – 6,1	25 – 30	12,9 – 15,4	300	556	27
7	Очень сильное	20 – 40	6,1 – 12,2	30 – 50	15,4 – 25,7	500	926	30
8	Исключительное	> 40	> 12,2	> 50	> 25,7	700	1296	35

Описание моделей

RRE (Royal Radar Establishment) model была разработана в 70-х годах 20 века в исследовательском центре Объединенного Королевства «Royal Radar Establishment». В 1974 году результаты исследований были сведены в работу «RRE σ_0 sea clutter model», которая так и не была опубликована [8]. Модель охватывает частотный диапазон от 9 до 10 ГГц при углах скольжения до 10 градусов.

$$\sigma_{RRE}^0 = \begin{cases} a_{RRE} + b_{RRE} \log_{10}(\Theta_d), & \Theta_d \leq 1^\circ \\ a_{RRE} + c_{RRE} \log_{10}(\Theta_d), & 1^\circ < \Theta_d < 10^\circ \end{cases} \quad (1)$$

где σ_{RRE}^0 – удельная ЭПР морской поверхности в децибелах, $a_{RRE}, b_{RRE}, c_{RRE}$ – коэффициенты, зависящие от состояния моря и поляризации (таблица 2), Θ_d – угол скольжения в градусах.

Таблица 2. Коэффициенты модели RRE

Поляризация	Коэффициенты	Состояние моря (SS), баллы					
		1	2	3	4	5	6
Вертикальная	a_{RRE}	-52	-46	-42	-39	-37	-35,5
	b_{RRE}	21	17,5	12,5	10,5	7	3,5
	c_{RRE}	1,015	3,39	2,03	1,35	2,03	2,37
Горизонтальная	a_{RRE}	-51,5	-45,5	-41	-38,5	-36	-34,5
	b_{RRE}	15	12	11,5	11	9,5	8
	c_{RRE}	8,2	9,5	8	7,5	7	6,5

Формула (1) позволяет вычислить среднее значение удельной ЭПР. В случае зондирования против ветра значение σ_{RRE}^0 увеличивается на 3 дБ, при зондировании по ветру – уменьшается на 3 дБ. На рисунке 1 показано сравнение данных из таблиц Натансона и модели RRE при различном волнении (SS). Сплошными линиями показаны значения, полученные с помощью модели RRE, крестиками – данные Натансона.

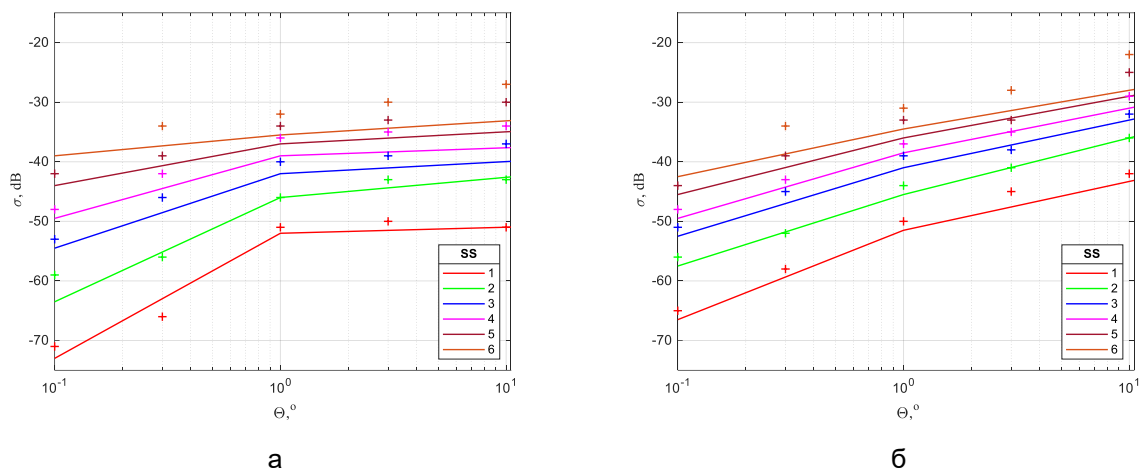


Рисунок 1. Сравнение данных Натансона и модели RRE:
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

Sittrop's model предложена в 1977 году [12]. Она позволяет рассчитать среднюю ЭПР при углах скольжения $0,1^\circ < \Theta < 10^\circ$ в диапазонах волн X (9-12 ГГц) и Ku (12–18 ГГц).

$$\sigma_{Sit}^0 = a_{Sit} + b_{Sit} \log_{10} \left(\frac{\Theta_d}{\Theta_0} \right) + \left(c_{Sit} \log_{10} \left(\frac{\Theta_d}{\Theta_0} \right) + d_{Sit} \right) \log_{10} \left(\frac{U}{U_0} \right),$$

где σ_{Sit}^0 – удельная ЭПР морской поверхности в децибелах, $a_{Sit}, b_{Sit}, c_{Sit}, d_{Sit}$ – коэффициенты, зависящие от состояния моря, поляризации, скорости и направления ветра (таблица 3), Θ_d – угол скольжения в градусах, U – скорость ветра м/с, $\Theta_0 = 0,5$, $U_0 = 5$ м/с – эталонные угол скольжения и скорость ветра, соответственно [2].

Таблица 3. Коэффициенты модели Ситтропа

Частотный диапазон	Поляризация	Направление зондирования	a_{Sit}	b_{Sit}	c_{Sit}	d_{Sit}
X	вертикальная	против ветра	-50	12,6	-13,2	34
		поперек ветра	-53	6,5	0	34
	горизонтальная	против ветра	-49	17	-12,4	30
		поперек ветра	-58	19	-33	50
Ku	вертикальная	против ветра	-46	13,6	-10	26
		поперек ветра	-48	13	-6,6	21
	горизонтальная	против ветра	-46	17	-9	22
		поперек ветра	-47	13	-8,4	22

Скорость ветра в соответствии со шкалой Дугласа до состояния сильного волнения хорошо аппроксимируется степенной функцией. Часто в литературе используется аппроксимация вида: $U = 3.16 \cdot SS^{0.8}$ [2] (красная линия на рисунке 2).

Однако лучшее приближение обеспечивает следующее соотношение:

$$U = 2.15 \cdot SS^{1.04}, \quad (2)$$

использованное при расчетах в [10] (синяя линия). При моделировании так же будем использовать это соотношение. Черными треугольниками показаны граничные значения скорости ветра в соответствии со шкалой Дугласа, черными кругами – среднее ее значение.

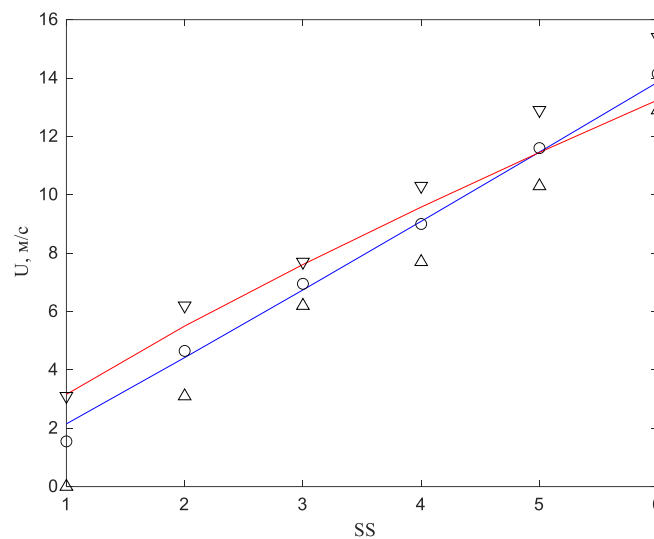


Рисунок 2. Связь используемой при расчетах скорости ветра с состоянием моря

На рисунках 3 и 4 показано сравнение данных Натансона и модели Ситтропа при зондировании поперек ветра для диапазонов X и Ku, соответственно.

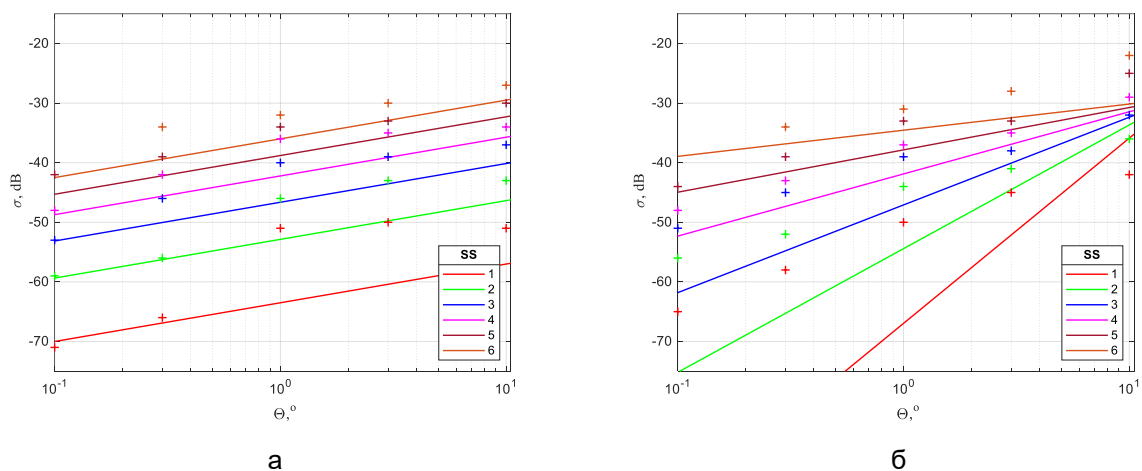


Рисунок 3. Сравнение данных Натансона (9,3 ГГц) и модели Ситтропа в X-диапазоне
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

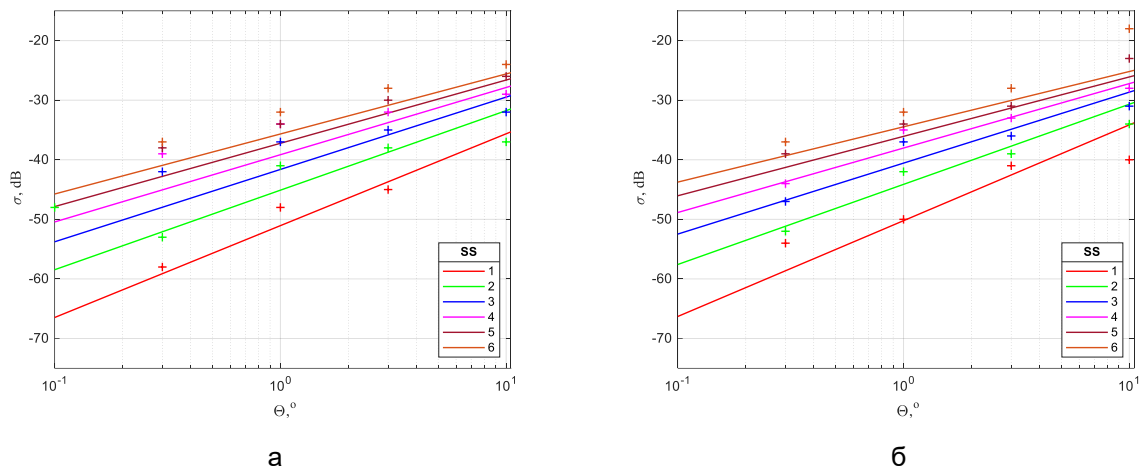


Рисунок 4. Сравнение данных Натансона (17 ГГц) и модели Ситтропа в Ку-диапазоне
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

GIT (Georgia Institute of Technology) model предложена в Технологическом институте Джорджии в 1978 году [13] (иногда в литературе встречается другое сокращение для модели – GTI [11]). Она охватывает диапазон от 1 до 100 ГГц и угол скольжения от 0,1 до 10 градусов. Для горизонтальной поляризации средняя удельная ЭПР будет выражаться:

$$\sigma_{GIT,HH}^0 = \begin{cases} 10 \log_{10}(3,9 \cdot 10^{-6} \lambda \Theta^{0,4} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}), & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ 10 \log_{10}(5,78 \cdot 10^{-6} \lambda \Theta^{0,547} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}), & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases}$$

или, что то же самое:

$$\sigma_{GIT,HH}^0 = \begin{cases} 10 \log_{10}(\lambda \Theta^{0,4} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}) - 54,089, & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ 10 \log_{10}(\lambda \Theta^{0,4} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}) - 54,381, & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases} \quad (3)$$

При вертикальной поляризации УЭПР будет выражаться следующим образом:

$$\sigma_{GIT,VV}^0 = \begin{cases} \sigma_{GIT,HH}^0 - 1,73 \ln(\bar{h} + 0,015) + 3,76 \ln(\lambda) + \\ + 2,46 \ln(\Theta + 0,0001) + 22,2, & 1 \leq f_{RF} < 3 \\ \sigma_{GIT,HH}^0 - 1,05 \ln(\bar{h} + 0,015) + 1,09 \ln(\lambda) + \\ + 1,27 \ln(\Theta + 0,0001) + 9,7, & 3 \leq f_{RF} < 10 \\ \sigma_{GIT,HH}^0 - 1,38 \ln(\bar{h} + 0,015) + 3,43 \ln(\lambda) + \\ + 1,31 \ln(\Theta) + 18,55, & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases},$$

где $\sigma_{GIT,HH}^0, \sigma_{GIT,VV}^0$ – средняя удельная ЭПР на горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно, дБ; λ – длина волны РЛС, м, f_{RF} – несущая частота,

ГГц; Θ – угол скольжения, радианы; a_{GIT} – коэффициент многолучевого распространения радиоволн; b_{GIT} – коэффициент направления морских волн; c_{GIT} – коэффициент скорости ветра, $\bar{h} = 4,52 \times 10^{-3} U^{2,5}$ – средняя высота морских волн, U – скорость ветра (м/с) в соответствии с (2).

Коэффициенты модели вычисляются по следующим формулам.

$$a_{GIT} = a^4 / (1 + a^4),$$

где

$$a = (14,4\lambda + 5,5)\Theta\bar{h} / \lambda \quad (4)$$

$$b_{GIT} = \begin{cases} \exp\left[0,2 \cos \psi_0 \cdot (1 - 2,8\Theta)(\lambda + 0,015)^{-0,4}\right], & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ \exp\left[0,25 \cos \psi_0 \cdot (1 - 2,8\Theta)(\lambda + 0,015)^{-0,33}\right], & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases},$$

где ψ_0 – угол между направлением против ветра и линией визирования.

В ряде источников, например, в [2, 10], формула (4) представлена в виде:

$$a = (14,4\lambda + 5,5)\Theta\bar{h} / (\lambda + 0,015),$$

однако, последнее выражение дает худшее соответствие экспериментальным результатам, в дальнейшем при расчетах будем использовать выражение (4).

$$c_{GIT} = \begin{cases} \left(\frac{1,94U}{1 + U/15,4}\right)^{1,1(\lambda + 0,015)^{-0,4}}, & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ \left(\frac{1,94U}{1 + U/15,4}\right)^{1,93\lambda^{-0,04}}, & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases} \quad (5)$$

Данная модель хорошо описывает удельную ЭПР при волнении моря в 4 и более баллов, однако, при волнении моря 3 балла и ниже наблюдаются значительные расхождения с экспериментальными данными [2, 11].

На рисунках 5–7 показано сравнение данных Натансона и модели GIT при зондировании против ветра для частот 3, 9, 3 и 17 ГГц, соответственно.

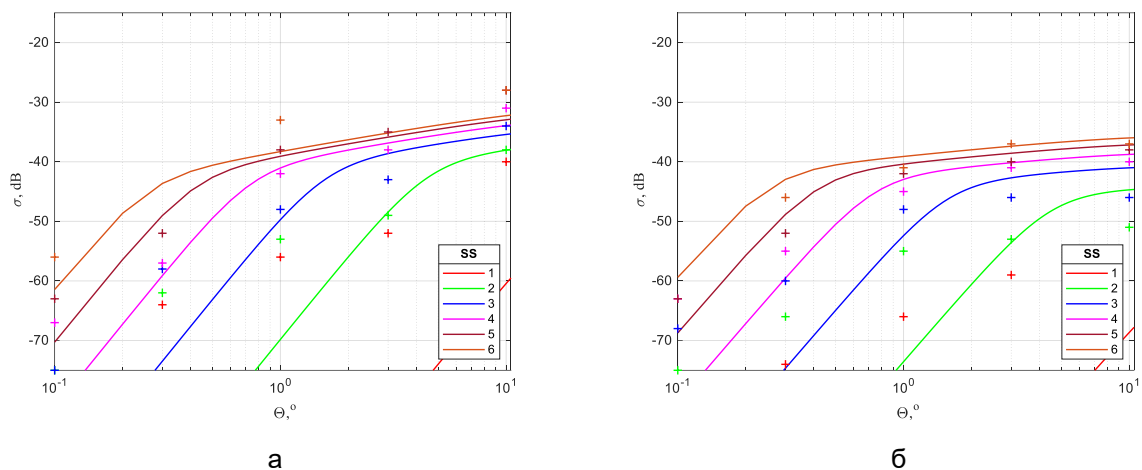


Рисунок 5. Сравнение данных Натансона и модели GIT, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

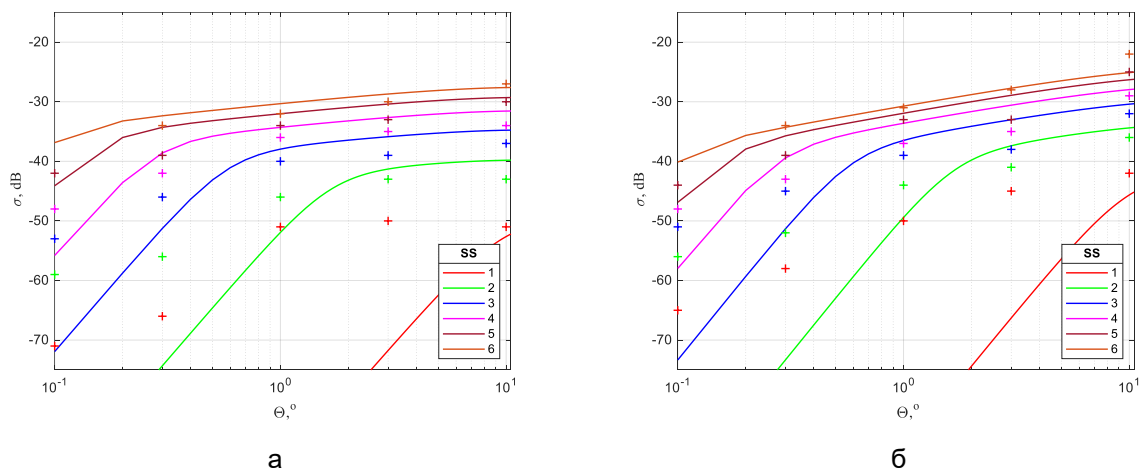


Рисунок 6. Сравнение данных Натансона и модели GIT, частота 9,3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

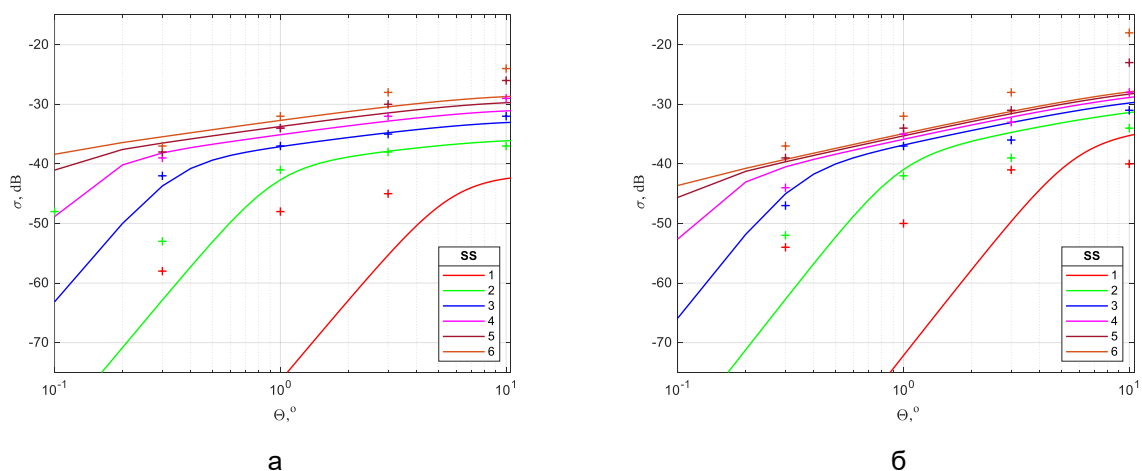


Рисунок 7. Сравнение данных Натансона и модели GIT, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

Гибридная модель, *Hybrid model (HYB model)* была предложена в 1990 и сочетает в себе элементы модели GTI и данные таблиц Натансона [14]. Она основана на корректировках эталонного обратного рассеяния σ_{ref} , соответствующего волнению моря 5 баллов, углу скольжения $0,1^\circ$, направлению зондирования против ветра и вертикальной поляризации. Также в неявной форме учитывается влияние атмосферного волновода.

$$\sigma_{Hyb}^0 = \sigma_{ref} + K_g + K_s + K_p + K_d,$$

где K_g, K_s, K_p, K_d – параметры, зависящие, соответственно, от угла скольжения, состояния моря, поляризации и угла между направлением ветра и углом наблюдения. Перечисленные переменные определяются выражениями:

$$\sigma_{ref} = \begin{cases} 24,4 \log_{10}(f_{RF}) - 65,2, & 0,5 \leq f_{RF} < 12,5 \\ 3,25 \log_{10}(f_{RF}) - 42, & 12,5 \leq f_{RF} < 35 \end{cases}$$

где f_{RF} – частота радиолокатора, ГГц.

$$\Theta_t \geq \Theta_{ref}, K_g = \begin{cases} 0, & \Theta \leq \Theta_{ref} \\ 20 \log_{10}(\Theta / \Theta_{ref}), & \Theta_{ref} < \Theta \leq \Theta_t \\ 20 \log_{10}(\Theta_t / \Theta_{ref}) + 10 \log_{10}(\Theta / \Theta_t), & \Theta_t < \Theta \leq 30^\circ, \end{cases}$$

где Θ – угол скольжения, $\Theta_{ref} = 0,1^\circ$ – эталонный угол, Θ_t – переходный угол, равный: $\Theta_t = \arcsin(0,66\lambda / \sigma_h)$ [14], также в литературе встречается следующие выражения для переходного угла [2]: $\Theta_t = \arcsin(0,066\lambda / \sigma_h)$ и [15]:

$$\Theta_t = \arcsin(0,0632\lambda / \sigma_h) \quad (6)$$

где λ , м – длина волны радиолокатора, σ_h – среднеквадратичная высота волн, вычисляемая как $\sigma_h = 0,031 \cdot SS$ [2, 14, 15]. Для дальнейших вычислений будем использовать формулу (6), как обеспечивающую лучшее соответствие экспериментальным данным.

$$\Theta_t < \Theta_{ref}, K_g = \begin{cases} 0 & \Theta \leq \Theta_{ref} \\ 10 \log_{10}(\Theta / \Theta_{ref}) & \Theta > \Theta_{ref} \end{cases}$$

$$K_s = 5(b_m - 5)$$

$$K_p = \begin{cases} 0, & VV \\ 1,7 \ln(\bar{h} + 0,015) - 3,8 \ln(\lambda) - 2,5 \ln(\Theta + 0.0001) - 22,2, & 0,5 \leq f_{RF} < 3 \\ 1,1 \ln(\bar{h} + 0,015) - 1,1 \ln(\lambda) - 1,3 \ln(\Theta + 0.0001) - 9,7, & 3 \leq f_{RF} < 10 \quad HH \\ 1,4 \ln(\bar{h}) - 3,4 \ln(\lambda) - 1,3 \ln(\Theta) - 18,6, & 10 \leq f_{RF} < 35 \end{cases}$$

$$\bar{h} = 0,08 \cdot SS^2$$

$$K_d = (2 + 1,7 \log_{10}(0,1/\lambda))(\cos \psi - 1)$$

На рисунках 8 и 9 показано сравнение данных Натансона и гибридной модели при зондировании по ветру на частотах 3 и 17 ГГц, соответственно.

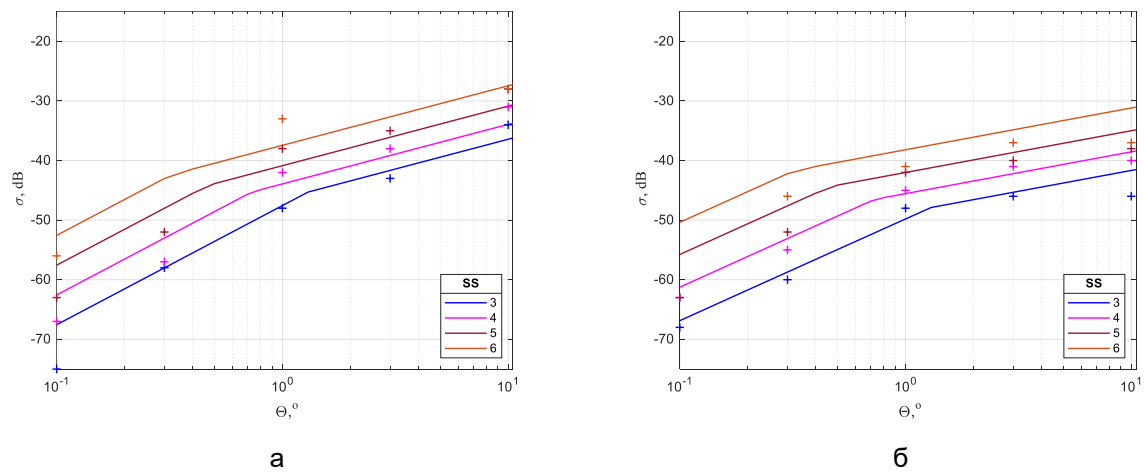


Рисунок 8. Сравнение данных Натансона и гибридной модели, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

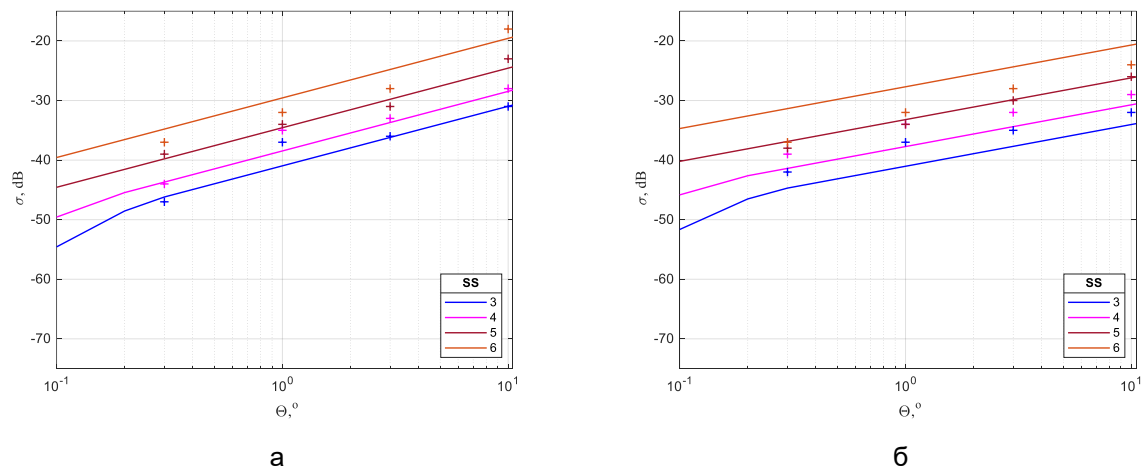


Рисунок 9. Сравнение данных Натансона и гибридной модели, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

TSC (Technology Service Corporation) model [16] структурно напоминает модели GIT и Gybryd, сочетает в себе составляющие для малых углов скольжения на основе модели, соответствующей таблицам Натансона и для больших углов скольжения на основе анализа экспериментальных данных и теоретических исследований. В частности, модель предполагает, что в зависимости от угла скольжения доминируют два различных механизма: квазизеркальное отражение при больших углах скольжения и диффузное рассеяние при малых углах скольжения, при этом полное обратное рассеяние представляет собой сумму этих двух составляющих. В дальнейшем [17] модель была доработана для лучшего учета направления ветра относительно наблюдателя. Первоначально модель имела вид [2, 15]:

$$\sigma_{TSC,HH}^0 = 10 \log \left(1,7 \cdot 10^{-5} \Theta_r^{0,5} G_u G_w G_a / (3,2808\lambda + 0,05)^{1,8} \right),$$

$$\sigma_{TSC,VV}^0 = \begin{cases} \sigma_{TSC,HH}^0 - 1,73 \ln(8,225\sigma_h + 0,05) + 3,76 \ln \lambda + & f_{RF} < 2 \\ +2,46 \ln(\sin \Theta_r + 0,0001) + 24,2672 & \\ \sigma_{TSC,HH}^0 - 1,05 \ln(8,225\sigma_h + 0,05) + 1,09 \ln \lambda + & f_{RF} \geq 2 \\ +1,27 \ln(\sin \Theta_r + 0,0001) + 10,945 & \end{cases} \quad (7)$$

где

$$G_u = \begin{cases} 1 & \Theta = 90^\circ \\ \exp \left(0,3 \cos \psi_0 \exp(-\Theta / 0,17) / \left(10,7636\lambda^2 + 0,005^{0,2} \right) \right) & \Theta < 90^\circ \end{cases},$$

$$G_w = ((1,9438U + 4) / 15)^A,$$

$$U = 3,189SS^{0,8} \quad (8)$$

$$A = 2,63A_1 / (A_2A_3A_4),$$

$$A_1 = \left(1 + (\lambda / 0,00914)^3 \right)^{0,1}, \quad A_2 = \left(1 + (\lambda / 0,03048)^3 \right)^{0,1},$$

$$A_3 = \left(1 + (\lambda / 0,09144)^3 \right)^{\Theta^{0,6/3}}, \quad A_4 = 1 + 0,35\Theta^{0,6},$$

$$G_a = \sigma_a^{1,5} / (1 + \sigma_a^{1,5}),$$

$$\sigma_a = 4,5416\Theta(3,2808\sigma_z + 0,25) / \lambda, \quad \sigma_z = 0,03505SS^{1,95},$$

где λ – длина волны РЛС, м, f_{RF} – несущая частота, ГГц; Θ – угол скольжения, радианы, σ_z – стандартное отклонение морской поверхности, ψ_0 – угол между направлением против ветра и линией визирования, радианы.

В последующем модель была дополнена ещё одной составляющей, учитывающей квазизеркальное отражение при больших углах скольжения:

$$\sigma_{TSC,HH}^0 = 10 \log \left(1,7 \cdot 10^{-5} \Theta^{0,5} G_u G_w G_a G_d / (3,2808 \lambda + 0,05)^{1,8} + \sigma_{qs}^0 \right),$$

$$G_d = 1 - 0,6 \sin^2(\Psi_0), \quad \sigma_{qs}^0 = \mu \cot^2(\beta) \exp \left(-\frac{\tan^2(0,5\pi - \Theta)}{\tan^2(\beta)} \right),$$

$$\text{где } \mu = \begin{cases} -5 & \lambda < 0,05 \\ -5 + 12,5(\log_{10} \lambda - \log_{10} 0,05) & \lambda \geq 0,05 \end{cases}, \quad \beta = \begin{cases} 10,1 + 1,65 S_D & S_D \leq 2 \\ 13,4 + 0,7(S_D - 2) & S_D > 2 \end{cases}.$$

Формула (8) использовалась в оригинальной модели, однако для единообразия в расчетах будем использовать формулу (2). Предварительные исследования показали, что эта замена в рассматриваемом диапазоне углов увеличивает точность модели на 0,5–1 дБ. Поскольку рассматривается только диапазон малых углов, квазизеркальное отражение не будет вносить значительный вклад, поэтому при расчетах откажемся от его учета и при моделировании будем использовать формулу (7).

Заметим, что существует форма этой модели для английской системы мер, например, в [15], и многие, представленные в литературе, например, [10] и сети Интернет программные модули базируются именно на этой форме представления, что зачастую приводит к путанице.

На рисунках 10 и 11 показано сравнение данных Натансона и модели TSC при зондировании против ветра на частотах 3 и 17 ГГц, соответственно.

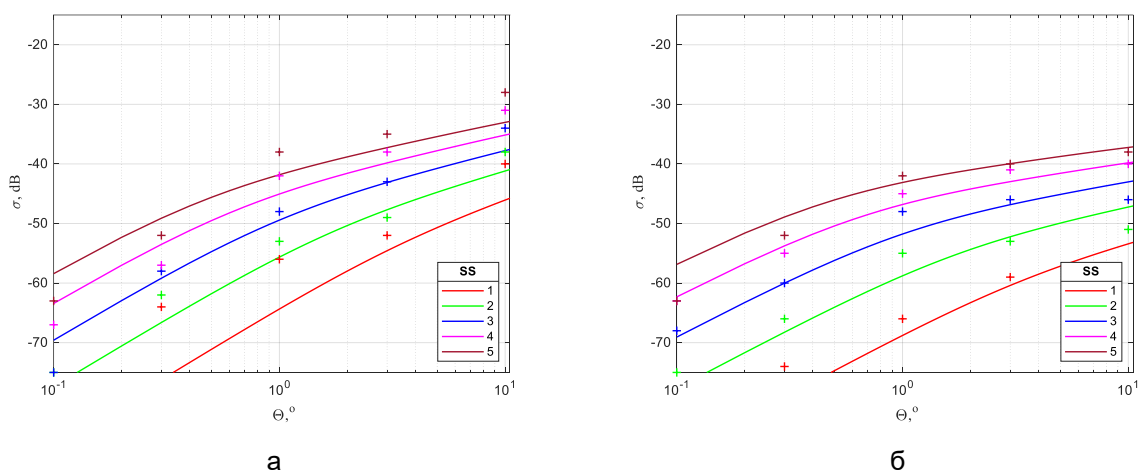


Рисунок 10. Сравнение данных Натансона и модели TSC, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

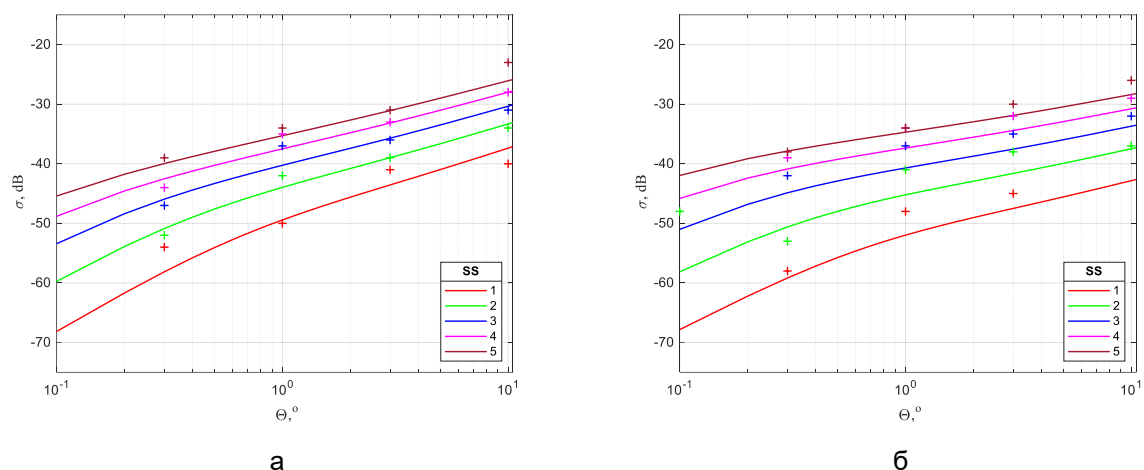


Рисунок 11. Сравнение данных Натансона и модели TSC, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

NRL (Naval Research Laboratory) model была разработана в 2009 в военно-морской исследовательской лаборатории Вильгельмом Греггерсом–Хансеном и Рашми Митталом с целью более точного соответствия таблицам Натансона.

$$\sigma_{NRL09}^0 = c_1 + c_2 \log_{10} \sin \Theta_d + \frac{(c_3 + c_4 \Theta_d) \log_{10} f_{RF}}{1 + c_5 \Theta_d + c_6 SS} + c_7 (1 + SS)^{(2 + c_8 \Theta_d + c_9 SS)^{-1}},$$

где f_{RF} – несущая частота, ГГц; Θ_d – угол скольжения, градусы, SS – волнение моря в баллах. Значение констант $c_1 \dots c_9$ в децибелах приведены в таблице 4 [11].

Таблица 4. Константы модели NRL 2009 года

Константа	Поляризация	
	Горизонтальная	Вертикальная
c_1	-72,76	-48,56
c_2	21,11	26,30
c_3	24,78	29,05
c_4	4,917	-0,5183
c_5	0,6216	1,057
c_6	-0,02949	0,04839
c_7	26,19	21,37
c_8	0,09345	0,07466
c_9	0,05031	0,04623

Сравнение данных Натансона и модели NRL-2009 на частотах 3 и 17 ГГц показано на рисунках 12 и 13.

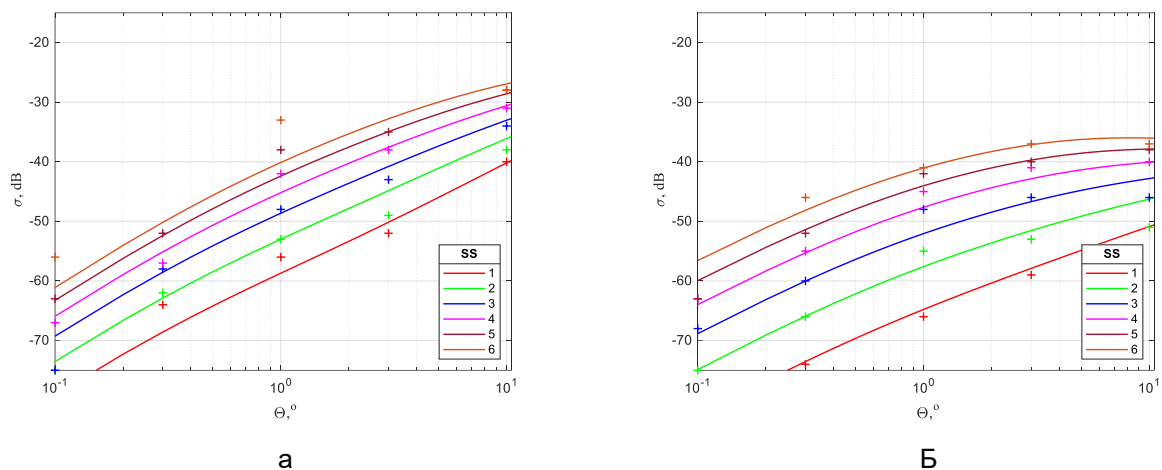


Рисунок 12. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2009 года, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

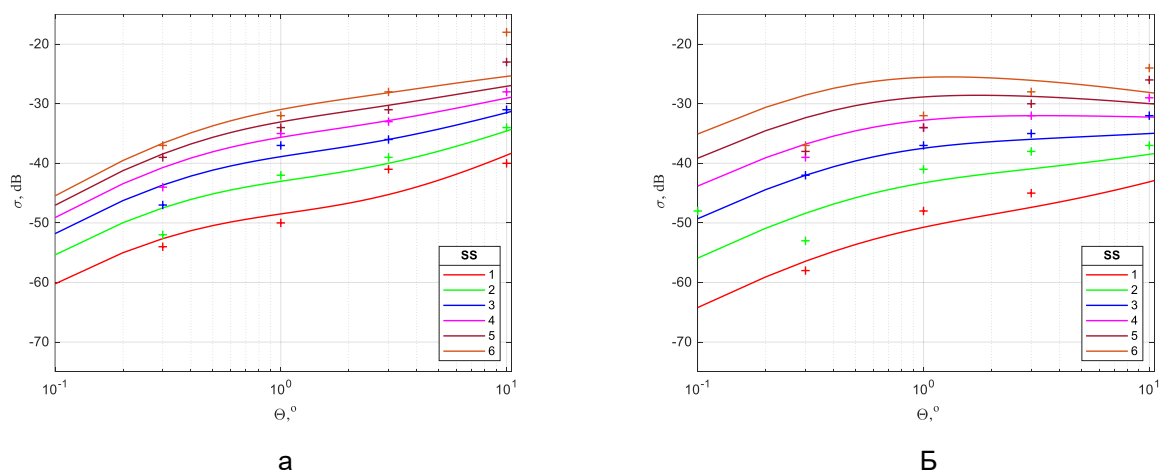


Рисунок 13. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2009 года, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

В 2012 году этими же авторами была предложена новая версия модели, отличающаяся меньшим числом констант, зависящих от поляризации:

$$\sigma_{NRL12}^0 = c_1 + c_2 \log_{10} \sin \Theta + \frac{(27.5 + c_3 \Theta) \log_{10} f_{RF}}{1 + 0.95 \Theta} + c_4 (1 + SS)^{(2 + 0.085 \Theta + 0.033 SS)^{-1}} + c_5 \Theta^2.$$

Значения соответствующих констант приведены в таблице 5 [10].

Таблица 5. Константы модели NRL 2012 года

Константа	Поляризация	
	Горизонтальная	Вертикальная
c_1	-73	-50,79
c_2	20,78	25,93
c_3	7.351	0,7093
c_4	25.65	21,58
c_5	0,00540	0,00211

Сравнение данных Натансона и модели NRL-2012 на частотах 3 и 17 ГГц показано на рисунках 14 и 15.

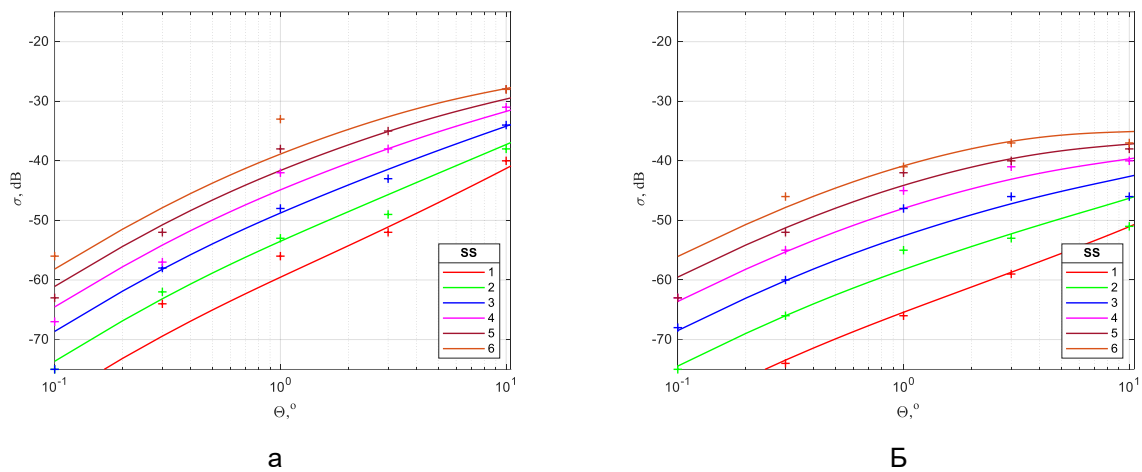


Рисунок 14. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2012 года, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

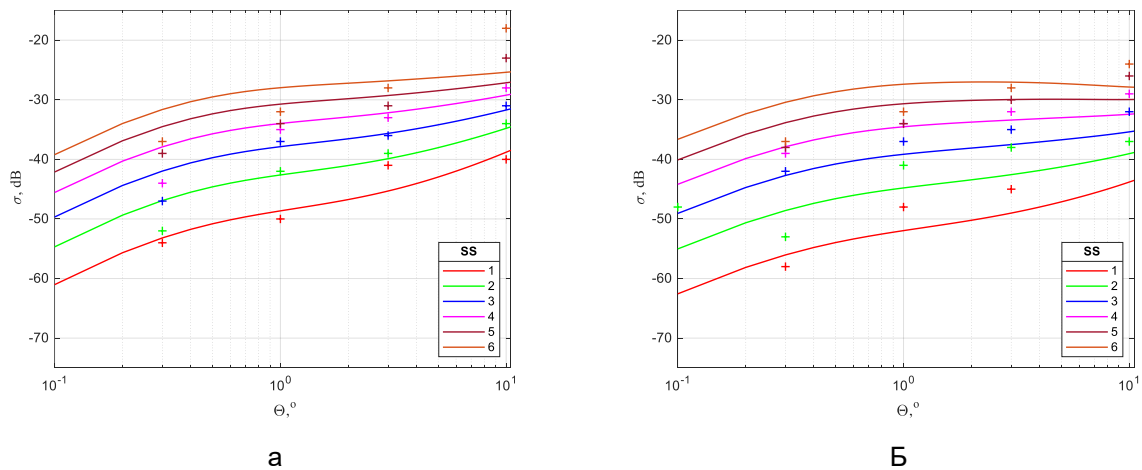


Рисунок 15. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2012 года, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

DSTG (Defence science and technology organisation) continuous model для X-диапазона была предложена в 2007 году Люком Розенбергом и Саймоном Ваттом, как расширение модели GIT на больший диапазон углов скольжения [2, 18]. В рамках модели, для малых углов скольжения (0,1–3 градуса) используется модель GIT. Удельная ЭПР морской поверхности для углов 20°–45° рассчитывается на основе модели σ_{med}^0 , предложенной в [18] по результатам обработки данных РЛС авиационного базирования Ingara [19, 20]:

$$\sigma_{med}^0(\Theta, \Psi) = \left(\frac{\Theta}{\Theta_0} \right)^\gamma [\alpha_0 + \alpha_1 \cos(\Psi) + \alpha_2 \cos(2\Psi)],$$

где $\Theta_0 = 30^\circ$ – параметр нормализации, $\gamma, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ – коэффициенты модели, зависящие от скорости ветра U и значимой высоты волны $h_{1/3}$ и определяющиеся соотношением:

$Y = b_0 + b_1 \log_{10}(U) + b_2 h_{1/3}$, где $Y \equiv [\gamma, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2]$. Значения коэффициентов модели приведены в таблице 6.

Связующая функция σ_{lin}^0 обеспечивает непрерывность значений УЭПР при промежуточных значениях углов и их рост при увеличении угла скольжения [18]. Полностью модель описывается следующими соотношениями:

$$\sigma_{DSTG}^0(\Theta, \Psi) = \begin{cases} \sigma_{GIT}^0(\Theta, \Psi) & 0,1^\circ \leq \Theta < 3^\circ \\ \sigma_{lin}^0(\Theta, \Psi) & 3^\circ \leq \Theta < 20^\circ, \\ \max\{\sigma_{med}^0(\Theta, \Psi), \sigma_{lin}^0(20^\circ, \Psi)\} & 20^\circ \leq \Theta \leq 45^\circ \end{cases}$$

где $\sigma_{lin}^0(\Theta, \Psi) = \sigma_{GIT}^0(3, \Psi) + K(\Psi)(\Theta - 3)$, $K(\Psi) = |\sigma_{med}^0(20, \Psi) - \sigma_{GIT}^0(3, \Psi)| \cdot 17^{-1}$.

Таблица 6. Коэффициенты модели DSTG

Поляризация	Коэффициенты	b_0	b_1	b_2
Горизонтальная	γ	-1,21	0,64	0,0082
	α_0	-78,74	49,42	-0,2
	α_1	11,72	-9,14	-0,012
	α_2	-0,035	2,21	-0,15
Вертикальная	γ	0,16	-0,57	0,05
	α_0	-47,78	27,15	-0,56
	α_1	-0,032	0,69	0,023
	α_2	0,51	2,31	-0,21

Сравнение данных Натансона и модели DSTG на частоте 9,3 ГГц при зондировании против ветра показано на рисунке 16.

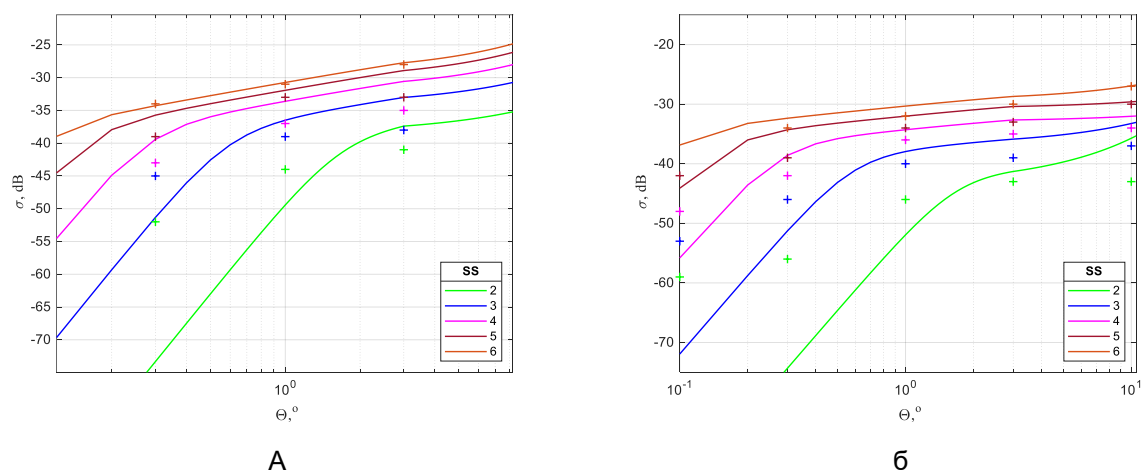


Рисунок 16. Сравнение данных Натансона и модели DSTG, частота 9,3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

Результаты

Теперь рассмотрим точность моделей относительно экспериментальных данных, приведенных в [1]. Для этого сначала оценим диапазон моделирования. Границы применимости моделей, заявленные их авторами, приведены в таблице 7. Сразу стоит отметить, что все модели охватывают диапазон углов скольжения до 10 градусов, что как раз соответствует малым углам скольжения.

Таблица 7. Список моделей и заявленные границы их применимости

Модель	Частота, ГГц	Угол скольжения, °	Волнение моря, баллы	Угол относительно направления ветра, °
RRE	9–10	0,1–10	1–6	–
Sittrop	8–18	0,1–10	1–6	против/поперек
GIT	1–100	0,1–10	0–6	0–360
Hybrid	0,5–35	0,1–30	3–6	0–360
TSC	0,5–35	0–90	0–5	0–360
NRL	0,5–35	0,1–60	0–8	–
DSTG	8–12	0,1–45	2–6	0–360

В интересующем нас диапазоне углов в таблицах Натансона представлены значения удельной ЭПР для вертикальной и горизонтальной поляризации на частотах 0,5, 1,25, 3, 5,6, 9,3, 17 и 35 ГГц при углах 0,1, 0,3, 1, 3 и 10 градусов для волнения от 0 до 6 баллов по шкале Дугласа. Для оценки точности моделей будем сравнивать среднее значение отклонения от данных таблиц Натансона в границах применимости каждой модели для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Модель GIT при волнении моря в 0 баллов, в соответствии с выражениями (2,3,5) будет принимать бесконечное значение, поэтому для нее $SS = 0$ будет исключено из расчетов. Для моделей, имеющих зависимость от угла визирования относительно направления ветра, будем считать значение для углов визирования, равных 0, 90 и 180 градусов (0 градусов соответствует направлению против ветра), а также их среднее (таблица 8). Исключением будет модель Ситтропа, в ней будем усреднять только по двум углам, представленным в модели.

Таблица 8. Результат оценки точности моделей

Модель	RRE	Sittrop X/Ku	GIT	Hybrid	TSC	NRL 09/12	DSTG
Горизонтальная поляризация							
0°	–	2,44/2,51	11,03	6,96	3,86	–	5,68
90°	–	3,94/3,24	11,86	4,99	4,93	–	6,06
180°	–	–	13,46	4,16	3,42	–	7,94
Среднее	2,47	3,19/2,88	12,12	5,37	4,07	2,16/2,29	6,56
Вертикальная поляризация							
0°	–	3,91/3,32	11,6	7,13	3,80	–	6,13
90°	–	7,61/2,21	12,7	5,56	4,48	–	6,77
180°	–	–	14,4	5,17	3,25	–	8,20
Среднее	1,85	5,76/2,77	12,90	5,95	3,84	2,02/2,24	7,03

Заключение

Полученные в результате исследования значения хорошо согласуются с результатами подобных исследований, представленных, например, в источниках [3, 6, 10, 11]. Отличия обусловлены ранее рассмотренными вариациями в представлении моделей. Также в литературных источниках методика оценки, как правило, не имеет четкого описания, что не позволяет однозначно повторить полученные их авторами результаты. В данной статье была предпринята попытка представить максимально прозрачную методику оценки соответствия результатов использования моделей эмпирическим данным. Кроме того, для рассмотренных моделей для малых углов падения были исследованы различные вариации используемых коэффициентов и входных данных.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме Министерства науки и высшего образования № FSEE-2025-0006.

Список литературы

1. Nathanson F. E., Reilly J. P., Cohen M. Radar design principles. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 720 p.
2. Rosenberg L., Watts S. Radar sea clutter: modelling and target detection. London: The Institute of Engineering Technology, 2022. 349 p.
3. Yang B., Jiang M., Wang J. Performance analysis of empirical models of sea surface reflectivity based on measured data // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2290. 012098. DOI: 10.1088/1742-6596/2290/1/012098
4. Zhao J., Gao H., Jiang R., Wang X. An improved SASS model for sea clutter reflectivity // International conference on computational modeling, simulation and optimization (CMSO 2019). Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2019. 28–35. DOI: 10.12783/dtcse/cmso2019/33589
5. Watts S., Rosenberg L. Challenges in radar sea clutter modelling // IET Radar, Sonar & Navigation. 2022. 16 (9). 1403–1414. DOI: 10.1049/rsn2.12272
6. Wu G., Fan J., Zhang F., Lu F. Semi-empirical model of sea clutter based on Zero Memory Nonlinearity // IEEE Access. 2019. 7. 18125–18137. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2897781
7. Rosenberg L., Watts S. High Grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 44 p.
8. Ward K., Tough R., Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance. London: The Institute of Engineering Technology, 2006. 452 p.
9. Веремьев В. И., Воробьев Е. Н., Коновалов А. А., Кутузов В. М., Маругин А. С., Михайлов В. Н., Орлов В. К. Радиоэлектронные системы и комплексы: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. 156 с.
10. Vilhelm G.-H., Mittal R. An improved empirical model for radar sea clutter reflectivity. Washington: Naval Research Laboratory, 2012. 45 p.

11. Vilhelm G.-H., Mittal R. An empirical sea clutter model for low grazing angles // IEEE Radar Conference Proceedings. Pasadena, 2009. 1–5. DOI: 10.1109/RADAR.2009.4977006
12. Sittrop H. On the sea-clutter dependency on windspeed // IEE Radar Conference Proceedings. London: I.E.E., 1977. 110–114.
13. Horst M. M., Dyer F. B., Tuley M. T. Radar sea clutter model // IEEE International Conference on Antennas and Propagation Proceedings, Part 2. London: I.E.E., 1978. 169. 5–10.
14. Reilly J. P., Dockery G. D. Influence of evaporation ducts on radar sea return // IEE Proceedings. 1990. 137F (2). 80–88.
15. Antipov I. Simulation of sea clutter returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998. 58 p.
16. Technology service corporation. Backscatter from sea. Radar workstation, 1990. 2. 177–186.
17. Spaulding B., Horton D., Pham H. Wind aspect factor in sea clutter modeling // IEEE Radar Conference. Arlington: I.E.E., 2005. 1–4. DOI: 10.1109/RADAR.2005.1435799
18. Rosenberg L., Watts S. Continuous sea clutter models for the mean backscatter and K-distribution shape // International Conference on Radar Systems. 2017. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2017.0602
19. Rosenberg L., Watts S. High grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 85 p.
20. Rosenberg L., Watts S., Bocquet S., Ritchie M. Characterisation of the Ingara HGA dataset // IEEE national radar conference proceedings. Arlington: I.E.E., 2015. 27–32. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7130965

References

1. Nathanson F. E., Reilly J. P., Cohen M. Radar design principles. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 720 p.
2. Rosenberg L., Watts S. Radar sea clutter: modelling and target detection. London: The Institute of Engineering Technology, 2022. 349 p.
3. Yang B., Jiang M., Wang J. Performance analysis of empirical models of sea surface reflectivity based on measured data // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2290. 012098. DOI: 10.1088/1742-6596/2290/1/012098
4. Zhao J., Gao H., Jiang R., Wang X. An improved SASS model for sea clutter reflectivity // International conference on computational modeling, simulation and optimization (CMSO 2019). Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2019. 28–35. DOI: 10.12783/dtcse/cmso2019/33589
5. Watts S., Rosenberg L. Challenges in radar sea clutter modelling // IET Radar, Sonar & Navigation. 2022. 16 (9). 1403–1414. DOI: 10.1049/rsn2.12272
6. Wu G., Fan J., Zhang F., Lu F. Semi-empirical model of sea clutter based on Zero Memory Nonlinearity // IEEE Access. 2019. 7. 18125–18137. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2897781
7. Rosenberg L., Watts S. High Grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 44 p.
8. Ward K., Tough R., Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance. London: The Institute of Engineering Technology, 2006. 452 p.
9. Veremyov V. I., Vorobev E.N., Konovalov A. A., Kutuzov V. M., Marugin A. S., Mikhaylov V. N., Orlov V. K. Radioelectronic systems and complexes: textbook allowance. in 2 parts, part 1. SPb: ETU “LETI” Publ., 2022. 156 p. (In Russian).

10. Vilhelm G.-H., Mittal R. An improved empirical model for radar sea clutter reflectivity. Washington: Naval Research Laboratory, 2012. 45 p.
11. Vilhelm G.-H., Mittal R. An empirical sea clutter model for low grazing angles // IEEE Radar Conference Proceedings. Pasadena, 2009. 1–5. DOI: 10.1109/RADAR.2009.4977006
12. Sittrop H. On the sea-clutter dependency on windspeed // IEE Radar Conference Proceedings. London: I.E.E., 1977. 110–114.
13. Horst M. M., Dyer F. B., Tuley M. T. Radar sea clutter model // IEEE International Conference on Antennas and Propagation Proceedings, Part 2. London: I.E.E., 1978. 169. 5–10.
14. Reilly J. P., Dockery G. D. Influence of evaporation ducts on radar sea return // IEE Proceedings. 1990. 137F (2). 80–88.
15. Antipov I. Simulation of sea clutter returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998. 58 p.
16. Technology service corporation. Backscatter from sea. Radar workstation, 1990. 2. 177–186.
17. Spaulding B., Horton D., Pham H. Wind aspect factor in sea clutter modeling // IEEE Radar Conference. Arlington: I.E.E., 2005. 1–4. DOI: 10.1109/RADAR.2005.1435799
18. Rosenberg L., Watts S. Continuous sea clutter models for the mean backscatter and K-distribution shape // International Conference on Radar Systems. 2017. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2017.0602
19. Rosenberg L., Watts S. High grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 85 p.
20. Rosenberg L., Watts S., Bocquet S., Ritchie M. Characterisation of the Ingara HGA dataset // IEEE national radar conference proceedings. Arlington: I.E.E., 2015. 27–32. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7130965

Информация об авторе

Михайлов Вячеслав Николаевич – старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-8155-9310, vnmikhaylov@etu.ru