

# Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

## Telecommunication Systems and Computer Networks

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15101>

УДК 621.371.3

### МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ КАРТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ ОЧЕНЬ НИЗКИХ ЧАСТОТ

А.А. Типикин<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Военно-морская академия им. адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ [alextip@mail.ru](mailto:alextip@mail.ru)

**Аннотация.** Проводимость и диэлектрическая проницаемость подстилающей поверхности входят в состав исходных данных, необходимых для расчета энергетических параметров радиотрасс. Отсутствие полных сведений об электрических характеристиках земной поверхности свидетельствует об актуальности исследований. Методика формирования глобальных цифровых карт электрических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне очень низких частот включает в себя два основных аспекта: формирование сведений об электрических характеристиках континентальной и океанической частей земной поверхности. Глобальная карта проводимости континентальной части земной поверхности получена путем оцифровки атласа проводимости почвы. Вычислена регрессионная функция, на основе которой сформирована глобальная карта диэлектрической проницаемости почвы. С помощью методик, описанных в рекомендациях МСЭ, на основе данных о температуре и солёности мирового океана получены глобальные карты проводимости и диэлектрической проницаемости океанической части земной поверхности. С помощью разработанного алгоритма консолидации данных промежуточные результаты преобразованы в глобальные цифровые карты электрических характеристик земной поверхности в диапазоне очень низких частот.

**Ключевые слова:** электрические характеристики, подстилающая поверхность, проводимость, диэлектрическая проницаемость, очень низкие частоты

**Для цитирования:** Типикин А.А. Методика формирования глобальных цифровых карт электрических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне очень низких частот // Computing, Telecommunications and Control. 2022. Т. 15, № 1. С. 7–18. DOI: 10.18721/JCSTCS.15101

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15101>

UDC 621.371.3

## METHOD OF OBTAINING GLOBAL DIGITAL MAPS OF UNDERLYING SURFACE ELECTRIC CHARACTERISTICS IN THE VERY LOW FREQUENCY BAND

A.A. Tipikin<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov,  
St. Petersburg, Russian Federation

✉ [alextip@mail.ru](mailto:alextip@mail.ru)

**Abstract.** The conductivity and dielectric permittivity of the underlying surface are part of the initial data necessary for calculating the energy parameters of radio tracks. The lack of complete information about the electrical characteristics of the Earth surface indicates the relevance of the researches. The technique of forming global digital maps of the electrical characteristics of the underlying surface in the very low frequency range points to two main aspects: the formation of information about the electrical characteristics of the continental and oceanic parts of the Earth surface. We obtained the global conductivity map of the continental part of the Earth surface by digitizing the soil conductivity atlas. We calculated a regression function, on the base of which a global map of the dielectric permittivity of the soil has been formed. Using the methods described in the ITU recommendations, we obtained global maps of the conductivity and permittivity of the oceanic part of the Earth surface based on data of the temperature and salinity of the world ocean. With the help of the developed data consolidation algorithm, we transformed the intermediate results into global digital maps of electrical characteristics of the Earth surface in the very low frequency range.

**Keywords:** electrical characteristics, underlying surface, conductivity, dielectric permittivity, very low frequencies

**Citation:** Tipikin A.A. Method of obtaining global digital maps of underlying surface electric characteristics in the very low frequency band. *Computing, Telecommunications and Control*, 2022, Vol. 15, No. 1, Pp. 7–18. DOI: 10.18721/JCSTCS.15101

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

### Введение

Определение характеристик подстилающей поверхности на трассе распространения радиоволн – одна из важнейших проблем прогнозирования энергетических параметров радиотрасс. От проводимости и диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности напрямую зависит дальность распространения радиоволн, особенно диапазона очень низких частот (ОНЧ), занимающего промежуток частот от 3 до 30 кГц. В модели распространения радиоволн ОНЧ-диапазона поверхность Земли и ионосфера образуют сферический волновод, поэтому для наиболее адекватного прогнозирования энергетических параметров радиотрасс необходимо как можно точнее знать характеристики стенок этого волновода. Если для ионосферы получена и периодически уточняется международная эталонная модель ионосферы, находящаяся в свободном доступе [1–3], то для земной поверхности подобные сведения неполные [4–7].

В работе [8] приведены данные о проводимости континентальной части земной поверхности в диапазоне ОНЧ на основе геологической структуры грунта, подобные сведения имеются в Мировом атласе проводимости почвы [5], где проводимость океанической части земной по-

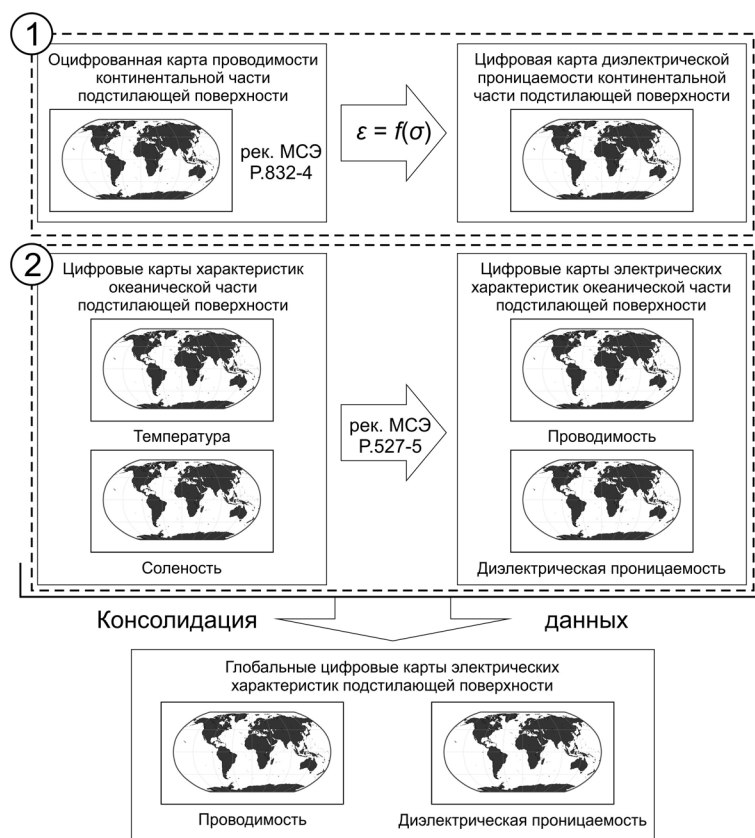


Рис. 1. Обобщенная блок-схема методики формирования глобальных цифровых карт подстилающей поверхности  
Fig. 1. Method of obtaining global digital maps of underlying surface electric characteristics, generalized block diagram

верхности принята равной 4 См/м. В обоих источниках отсутствуют сведения о диэлектрической проницаемости земной поверхности, но в [8] указано, что следует использовать усредненное значение, равное 10.

Таким образом, необходимо создать цифровую карту проводимости и диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности, которая могла бы служить источником исходных данных для формирования профиля подстилающей поверхности на трассе распространения радиоволн ОНЧ-диапазона. Данная задача может быть разделена на две подзадачи, заключающиеся в определении электрических характеристик подстилающей поверхности континентальной и океанической частей земной поверхности. Методика формирования глобальных цифровых карт электрических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне ОНЧ в виде обобщенной блок-схемы представлена на рис. 1.

В работе [9] показано, что электрические характеристики континентальной части земной поверхности могут быть получены на основе рекомендаций МСЭ-R P.527-5 [10] из данных о гранулометрическом составе почвы и удельной плотности грунта на основе цифровой карты и базы данных [11] и данных о содержании воды в почве на основе цифровых карт проекта TerraClimate [12]. Однако для этого требуется предварительно вычислить эффективную глубину проникновения электромагнитных волн (ЭМВ) ОНЧ-диапазона в процессе их распространения в сферическом волноводе Земля-ионосфера. В качестве эффективной глубины проникновения ЭМВ в почву может быть принят скин-слой  $\delta$  [13], который рассчитывается в соответствии с формулой [10]:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} - \epsilon_r'}} \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина ЭМВ;  $\epsilon_r'$  и  $\epsilon_r''$  – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости.

В соответствии с рекомендациями МСЭ-R P.527-5 выполнены расчеты величины  $\delta$  для 12 различных типов почв в диапазоне температур от  $-10$  до  $+30$  °С и влажности почвы от 0,01 до 50 %. Плотность грунта для расчетов взята из базы [11] по координатам центроидов почвенных многоугольников на треугольнике Гиббса-Розебома, удельные веса сухой смеси составляющих почвы рассчитаны с помощью интерполяционной функции, полученной в [9]. Исходные данные о плотности грунта  $\rho_d$ , удельном весе сухой смеси составляющих почвы  $G_s$  и координатах центроидов представлены в табл. 1. Результаты расчетов величины  $\delta$  сведены в табл. 2.

Таблица 1

**Исходные данные для расчетов действительной и мнимой частей комплексной относительной электрической проницаемости грунта**

Table 1

**Initial data for calculations of the real and imaginary parts of the complex relative permittivity of the soil**

Тип почвы по механическому составу	Плотность грунта $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	Удельный вес сухой смеси составляющих почвы $G_s$	Координаты центроидов	
			Песок, %	Глина, %
Песок	1,79	2,65	91,67	3,33
Супесь	1,66	2,65	81,67	5,83
Песчаный суглинок	1,60	2,66	64,60	10,35
Суглинок	1,58	2,70	41,04	18,73
Илистый суглинок	1,58	2,59	21,42	13,41
Ил	1,46	2,68	7,35	5,30
Песчаный глинистый суглинок	1,40	2,69	59,94	27,13
Глинистый суглинок	1,31	2,69	32,50	33,75
Илистый глинистый суглинок	1,27	2,59	10,00	33,75
Песчаная глина	1,32	2,73	51,67	41,67
Илистая глина	1,48	2,56	6,67	46,67
Глина	1,20	2,74	19,52	62,93

Как видно из табл. 2, медианный скин-слой на нижней границе диапазонов средних, низких и очень низких частот составляет от 8 до 80 м, что делает невозможным расчет проводимости и диэлектрической проницаемости почвы по рекомендациям МСЭ-R P.527-5, т. к. данные по нижнему горизонту почвы в базе HWSO приведены для глубин до 3 м [11]. Таким образом, методику определения почвенного профиля на трассе распространения радиоволн [9] допустимо использовать только для ЭМВ частотой от 3 МГц и выше.

Таблица 2

## Результаты расчета скин-слоя почвы

Table 2

## Results of calculation of the skin layer of the soil

Длина волны $\lambda$ , м	Скин-слой $\delta$ , м		
	Максимальное значение	Минимальное значение	Медианное значение
$10^5$	202,5	34,7	81,1
$10^4$	64,1	11,0	25,6
$10^3$	20,5	3,5	8,2
$10^2$	7,3	1,1	2,7
10	9,2	0,5	1,4
1	6,3	0,2	0,9

Результаты расчета медианного значения глубины скин-слоя в грунте приводят к выводу, что составление цифровых карт проводимости и диэлектрической проницаемости континентальной части поверхности Земли в ОНЧ-диапазоне возможно путем прямой оцифровки атласа проводимости почвы, представленного в рекомендациях МСЭ-R P.832-4, или на основе подходов, изложенных в [8]. В соответствии с указанными подходами и разработанной обобщенной методикой (рис. 1) составлена карта проводимости почвы в диапазоне ОНЧ, которая не учитывает сезонные изменения из-за отсутствия необходимых исходных данных.

Кроме проводимости, другой неотъемлемой электрической характеристикой почвы является её диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость в диапазоне ОНЧ может быть получена на основе частотных зависимостей электрической проницаемости различных геологических пород по данным цифровых геологических карт. Однако подобные сведения носят несистематизированный и фрагментарный характер, поэтому в настоящий момент реализовать подобный подход не представляется возможным. По этой причине, например, в исследовании [8], посвященном цифровому картографированию электрических характеристик грунта в диапазоне ОНЧ, принято среднее значение относительной диэлектрической проницаемости для всех типов геологических пород,  $\varepsilon = 10$ .

Альтернативным способом составления цифровой карты диэлектрической проницаемости грунта является выявление регрессионной зависимости значений данного параметра от значений проводимости грунта. Это может быть выполнено с помощью статистического подхода на основе моделей, представленных в рекомендации МСЭ-R P.527-5.

Для реализации данного подхода проведены расчеты для всех возможных типов почв по их механическому составу с относительной долей влажности от 0,01 до 50 % в диапазоне температур от  $-10$  до  $+30$  °С. Полученные значения проводимости сгруппированы в соответствии с данными табл. 1 в рекомендациях [10], после чего каждой группе поставлено в соответствие усредненное значение диэлектрической проницаемости, на основе которых построено регрессионное уравнение

$$\varepsilon = 58,55\sigma^{0,4733} + 1,695. \quad (2)$$

График регрессионной функции проводимости грунта в диапазоне ОНЧ и усредненные статистические данные показаны на рис. 2.

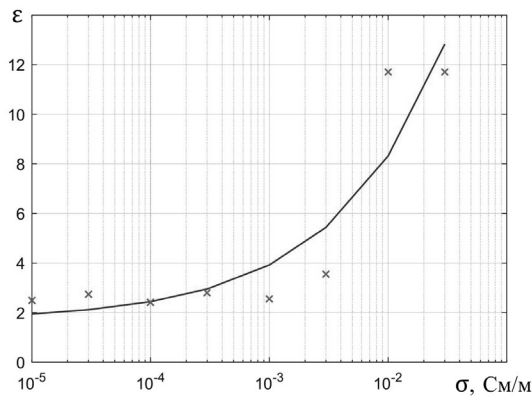


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости от проводимости грунта в диапазоне ОНЧ: (—) – регрессионная функция; маркеры – усредненные расчеты по рекомендациям МСЭ-R P.527-5

Fig. 2. Soil dielectric permittivity versus conductivity in the very low frequency band: (—) – regression; markers – ITU-R P.527-5 calculation averaged values

Значения относительной диэлектрической проницаемости, полученные на основе регрессии (2), представлены в табл. 3. С помощью табл. 3 из цифровой карты проводимости сформирована карта диэлектрической проницаемости континентальной части земной поверхности в диапазоне ОНЧ, которая, как и карта проводимости почвы, не учитывает сезонные изменения электрических характеристик.

Таблица 3

**Результаты расчета относительной электрической проницаемости по регрессионной модели**

Table 3

**Results of calculation of relative permittivity by regression model**

Относительная электрическая проницаемость $\epsilon$	Проводимость $\sigma$ , См/м
1,9	0,00001
2,1	0,00003
2,4	0,0001
3,0	0,0003
3,9	0,001
5,4	0,003
8,3	0,01
12,8	0,03

Кроме электрических характеристик континентальной следует также определить электрические характеристики океанической (морской) части земной поверхности. Для расчета проводимости и диэлектрической проницаемости морской воды должны быть приняты во внимание сведения об её температуре и солености. Указанные параметры непостоянны не только по широте и долготе места, но и по глубине водной массы. Чтобы учитывать влияние воды на распространение радиоволн, следует определить глубину скин-слоя морской воды. Расчеты в соответствии с формулой (1) для морской воды соленостью от 10 до 40 ‰ и температурой от 0,1 до 30 °С представлены в табл. 4.

Таблица 4

## Результаты расчета скин-слоя морской воды

Table 4

## Results of calculation of the skin layer of seawater

Длина волны $\lambda$ , м	Скин-слой $\delta$ , м		
	Максимальная	Минимальная	Медианная
$10^5$	9,58	3,58	5,26
$10^4$	3,03	1,13	1,66
$10^3$	0,96	0,36	0,53
$10^2$	0,31	0,11	0,17
10	0,10	0,04	0,05
1	0,05	0,01	0,02

Как видно из таблицы, для учета влияния морской воды на распространение радиоволн необходимо принимать во внимание характеристики воды на глубине до 5 м. Такие сведения могут быть получены из модели [14] и затем использованы для проведения расчетов в соответствии с моделями, представленными в рекомендации МСЭ-R P.527-5.

Так как Балтийское, Каспийское, Черное, Азовское и Аральское моря, а также ряд соленых озер не вошли в модель [14], то характеристики земной поверхности в данных районах в соответствии с рекомендациями МСЭ-R P.832-4 и данными [15, 16] приняты равными  $\sigma = 4$  См/м и  $\epsilon = 80$ .

В работе [17] показано, что в диапазоне от 0,05 до 100 кГц проводимость пресной воды постоянна и составляет 0,036 См/м. В соответствии с исследованиями [18] пресная вода при температуре 26 °С меняется в диапазоне от 65 до 50 единиц на частотах от 2 до 10 кГц соответственно. Так как проводимость оказывает более существенное влияние на распространение радиоволн, то для пресной воды в качестве электрических параметров могут быть приняты значения, указанные в рекомендациях МСЭ R P.527-5, которые составляют  $\sigma = 0,01$  См/м,  $\epsilon = 80$ . Районам пресной воды соответствуют наиболее крупные озера: Байкал, Онежское, Ладожское, Виктория и ряд др.

Полученные цифровые карты электрических характеристик океанической части подстилающей поверхности Земли учитывают сезонные и климатические изменения, т. к. базируются на исходных данных, представляющих собой месячные карты глобального охвата, со значениями, усредненными по результатам наблюдений с 2008 по 2017 г. [14].

С помощью программного обеспечения Matlab цифровые карты электрических характеристик континентальной и океанической частей земной поверхности объединены в общую карту с учетом отдельных морских районов, не вошедших в океаническую часть, и ряда внутренних морей и озер. Для выполнения данной операции составлена вспомогательная карта типов подстилающей поверхности, включающих четыре класса: континентальный район, океанический район, морской район или внутреннее море, озеро. Блок-схема алгоритма консолидации данных показана на рис. 3.

После ввода исходных данных в блоке 1 открываются два вложенных цикла по частоте (значения 3, 10, 30 кГц) и по месяцам года (с января по декабрь) – блоки 2 и 3. В блоках 4.1 и 5.1 с помощью функции `fillmissing` заполняются отсутствующие данные, обусловленные несоответствием географических областей определения входных массивов данных, а в блоках 4.2 и 5.2 данные интерполируются и приводятся к единой координатной сетке. С помощью массива типов подстилающей поверхности данные из различных массивов консолидируются в два мас-

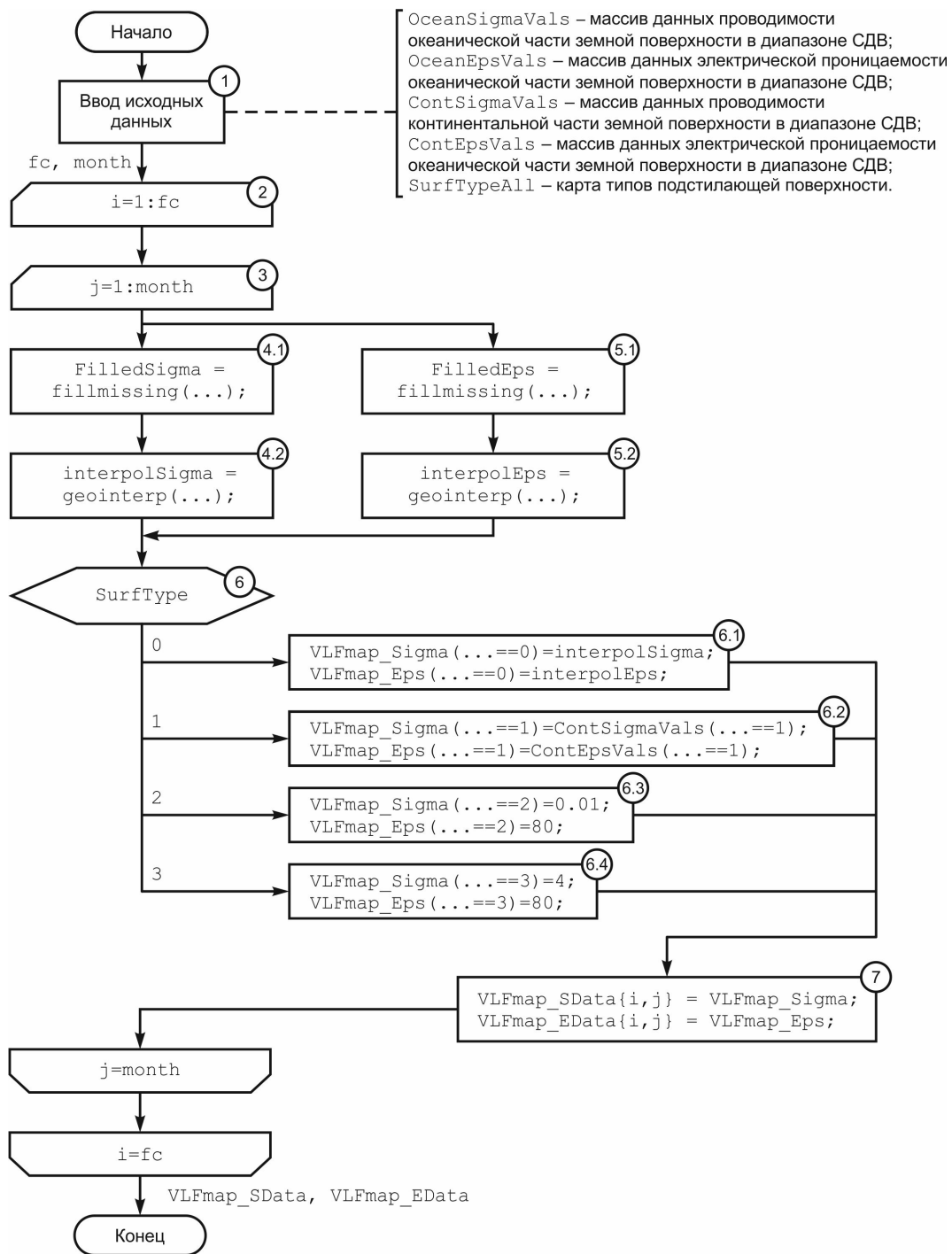


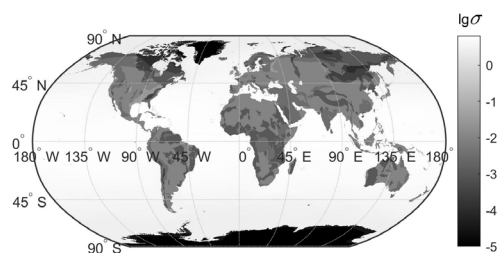
Рис. 3. Блок-схема алгоритма консолидации данных  
 Fig. 3. Block diagram of the data consolidation algorithm

сива ячеек  $VLFmap\_Sdata\{i, j\}$  и  $VLFmap\_Edata\{i, j\}$ , где  $i$  – порядковый номер частоты,  $j$  – порядковый номер месяца в году. В массиве  $VLFmap\_Sdata$  хранятся данные о проводимости земной поверхности, а в массиве  $VLFmap\_Edata$  – о диэлектрической проницаемости. Примеры консолидированных карт показаны на рис. 4 а,б.

С помощью функции `mapprofile`, входящей в пакет расширения `Mapping Toolbox`, может быть построен профиль электрических характеристик подстилающей поверхности. Например,



a)



б)

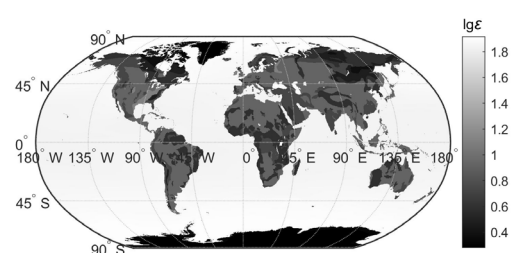


Рис. 4. Консолидированные карты электрических характеристик земной поверхности (июнь,  $f = 10$  кГц): *a* – проводимость, *б* – диэлектрическая проницаемость

Fig. 4. Consolidated maps of underlying surface electric characteristics (June,  $f = 10$  kHz): *a* – conductivity, *b* – dielectric permittivity

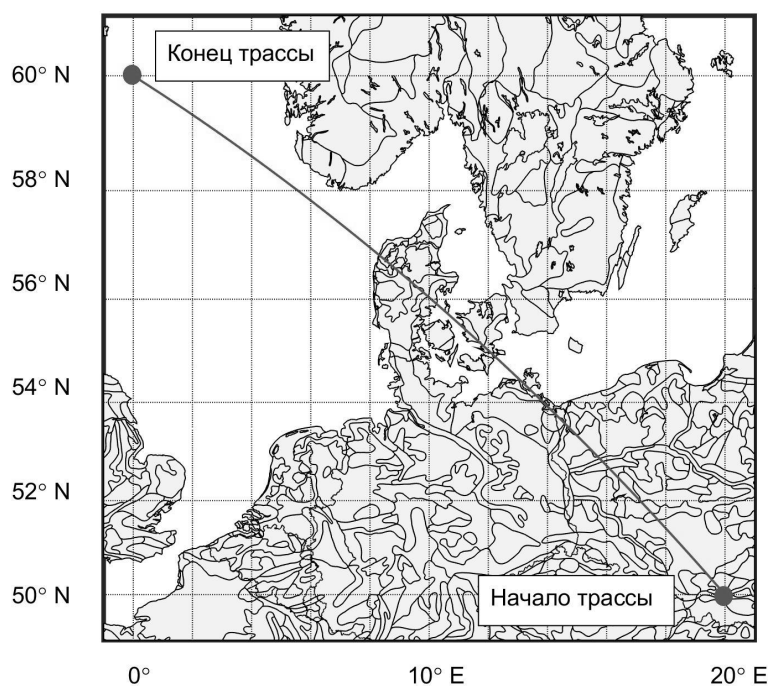


Рис. 5. Пример трассы радиосвязи

Fig. 5. Radio path example

для радиотрассы, пролегающей по дуге большого круга из точки  $50^\circ$  с. ш.,  $20^\circ$  в. д. в точку  $60^\circ$  с. ш.,  $0^\circ$  в. д. (рис. 5), электрические характеристики подстилающей поверхности показаны на рис. 6 *a, б*.

### Выводы

В ходе исследований получены глобальные цифровые карты электрических характеристик подстилающей поверхности Земли в диапазоне ОНЧ.

Для океанической части земной поверхности учитываются климатические и сезонные изменения, путем использования в качестве исходных данных месячных цифровых карт солености и температуры мирового океана, усредненных по результатам наблюдений с 2008 по 2017 г.

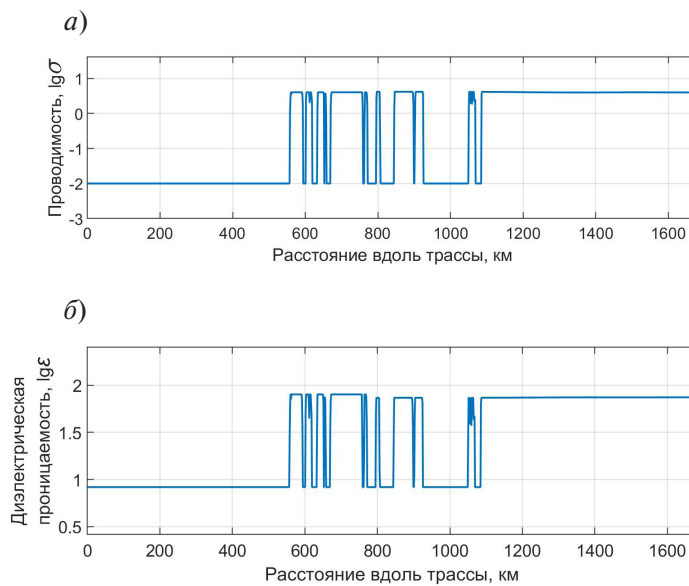


Рис. 6. Профиль подстилающей поверхности на трассе радиосвязи:  
*a* – проводимость; *б* – диэлектрическая проницаемость  
 Fig. 6. Profile of underlying surface electric characteristics on the radio path:  
*a* – conductivity; *b* – dielectric permittivity

Для континентальной части земной поверхности сезонные изменения не учитываются в связи с отсутствием необходимого объёма данных по изменениям гранулометрического состава почвы и её влажности на глубинах до 80 м.

Полученные сведения об электрических характеристиках поверхности Земли далее могут использоваться при расчете энергетических параметров радиотрасс с помощью скачковых методов или методов волновых мод [19, 20].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bilitza D.** IRI the international standard for the ionosphere // *Adv. Radio Sci.* 2018. no. 16. Pp. 1–11. DOI: 10.5194/ars-16-1-2018
2. **Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., Hernandez-Pajares M., Reinisch B., Li Z., Kotulak K., Zakharenkova I., Cherniak I., Roma Dollase D., Wang N., Flisek P., Garcia-Rigo A.** Towards cooperative global mapping of the ionosphere: Fusion feasibility for IGS and IRI with global climate VTEC maps // *MDIP Remote Sens.* 2020. no. 12(21). 3531 p. DOI: 10.3390/rs12213531
3. **Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernandez-Pajares M., Krankowski A., Nava B., Bilitza D., Kotulak K., Flisek P., Li Z.** Global monitoring of ionospheric weather by GIRO and GNSS data fusion // *Atmosphere.* 2022. no. 13. 371 p. DOI: 10.3390/atmos13030371
4. **Morgan R.R.** World-wide VLF effective conductivity map. Westinghouse Electric Corporation, 1968. 62 p.
5. Рекомендация МСЭ-R P.832-4. Мировой атлас проводимости почвы. МСЭ, 2015.
6. **Nikolayenko A., Shvets A., Hayakawa M.** Extremely low frequency (ELF) radio wave propagation: A review // *Internat. J. of Electronics and Applied Research.* 2016. Vol. 3. no. 2. 91 p.
7. **Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Аюров Д.Б.** Результаты радиоизмерений в Белом, Баренцевом и Карском морях летом 2016 года // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: матер. XXIII Междунар. симп.* Томск: ИОА СО РАН, 2017. DOI: 10.1117/12.2287639

8. Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г., Адвокатов В.Р. Прогнозная карта геоэлектрических разрезов континентов Земли // V Междунар. науч.-техн. конф. Радиотехника, электроника и связь. Омск, ОНИИП: 2019. С. 17–24. DOI: 10.33286/978-5-6041917-2-9.17-24
9. Типикин А.А., Потапов Д.С. Методика оценки электрических характеристик почвы на трассе распространения земных радиоволн // Техника радиосвязи. 2022. № 1(52). С. 19–29.
10. Рекомендация МСЭ-R P.527-5. Электрические характеристики земной поверхности. МСЭ, 2019.
11. Nachtergaele F., van Velthuizen H.T., Verelst L., Wiberg D. Harmonized world soil database (version 1.2). Rome, FAO/IIASA, 2012.
12. Abatzoglou J., Dobrowski S., Parks S., Hegewisch K. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. 2018. DOI: 5.170191.10.1038/sdata.2017.191
13. Bradley P.A., Hanbaba R. Handbook: The ionosphere and its effects on radiowave propagation. A guide with background to ITU-R procedures for radio planners and users. Geneva, ITU, 1998. 153 p.
14. Fukumori I., Wang O., Fenty I., Forget G., Heimbach P., Ponte R.M. ECCO Consortium. Synopsis of the ECCO central production global ocean and sea-ice state estimate. Version v4r4. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.3765928
15. Gadani D.H., Rana V.A., Prajapati A.N., Bhatnagar S., Vyas A.D. Effect of salinity on the dielectric properties of water // Indian J. of Pure and Applied Physics. 2012. Vol. 50. Pp. 405–410.
16. Modi F.M., Gadani D.H., Rana V.A. Study of variation of optical and physical properties of saline water solutions with temperature // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 47. no. 2. Pp. 656–660.
17. Aldosky H., Shamdeen S. A new system for measuring electrical conductivity of water as a function of admittance // J. of Electric Bioimpedance. 2011. no. 2. Pp. 86–92. DOI: 10.5617/jeb.203
18. Sherman A., Mercado-Uribe H. Dielectric spectroscopy of water at low frequencies: The existence of an isopermittive point // Chemical Physics Letters. 2010. no. 503. Pp. 4–6. DOI: 10.1016/j.cplett.2011.01.027
19. Coleman C. Analysis and modeling of radio wave propagation. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 296 p.
20. Gonzalez G. Advanced electromagnetic wave propagation methods. Boca Raton, CRC Press, 2022. 708 p.

## REFERENCES

1. Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere. *Adv. Radio Sci.*, 2018, no. 16, Pp. 1–11. DOI: 10.5194/ars-16-1-2018
2. Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., Hernandez-Pajares M., Reinisch B., Li Z., Kotulak K., Zakharenkova I., Cherniak I., Roma Dollase D., Wang N., Flisek P., Garcia-Rigo A. Towards cooperative global mapping of the ionosphere: Fusion feasibility for IGS and IRI with global climate VTEC maps. *MDIP Remote Sens.*, 2020, no. 12(21), 3531 p. DOI: 10.3390/rs12213531
3. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernandez-Pajares M., Krankowski A., Nava B., Bilitza D., Kotulak K., Flisek P., Li Z. Global monitoring of ionospheric weather by GIRO and GNSS data fusion. *Atmosphere*, 2022, no. 13, 371 p. DOI: 10.3390/atmos13030371
4. Morgan R.R. *World-wide VLF effective conductivity map*. Westinghouse Electric Corporation, 1968. 62 p.
5. *ITU-R Recommendation P.832-4. World atlas of ground conductivities*. ITU, 2015.
6. Nikolayenko A., Shvets A., Hayakawa M. Extremely Low Frequency (ELF) radio wave propagation: A review. *International Journal of Electronics and Applied Research (IJEAR)*, 2016, Vol. 3, no. 2, 91 p.
7. Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Ayurov D.B. Results of radio measurement in the White, Barents, and Kara Seas in the summer of 2016. *23<sup>rd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 104666C, 2017. (rus). DOI: 10.1117/12.2287639

8. **Bashkuev Yu.B., Angarkhaeva L.Kh., Buyanova D.G., Advokatov V.R.** Predictive map of geoelectric sections of continents of the world. *V International Scientific-Technical Conference on Radio Engineering, Electronics and Communications*, 2019, Pp. 17–24. (rus). DOI: 10.33286/978-5-6041917-2-9.17-24
9. **Tipikin A.A., Potapov D.S.** Method for estimating soil electrical characteristics on the ground radio waves propagation route. *Radio Communications Technology*, 2022, no. 1(52), Pp. 19–29. (rus)
10. *ITU-R Recommendation P.527-5. Electrical characteristics of the surface of the Earth*. ITU, 2019.
11. **Nachtergaele F., van Velthuizen H.T., Verelst L., Wiberg D.** *Harmonized world soil database (Version 1.2)*. Rome, FAO/IIASA, 2012.
12. **Abatzoglou J., Dobrowski S., Parks S., Hegewisch K.** *TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015*. 2018. DOI: 5.170191.10.1038/sdata.2017.191
13. **Bradley P.A., Hanbaba R.** *Handbook: The ionosphere and its effects on radiowave propagation. A guide with background to ITU-R procedures for radio planners and users*. Geneva, ITU, 1998, 153 p.
14. **Fukumori I., Wang O., Fenty I., Forget G., Heimbach P., Ponte R.M.** *ECCO Consortium. Synopsis of the ECCO central production global ocean and sea-ice state estimate. Version v4r4*, 2021. DOI: 10.5281/zenodo.3765928
15. **Gadani D.H., Rana V.A., Prajapati A.N., Bhatnagar S., Vyas A.D.** Effect of salinity on the dielectric properties of water. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 2012, Vol. 50, Pp. 405–410.
16. **Modi F.M., Gadani D.H., Rana V.A.** Study of variation of optical and physical properties of saline water solutions with temperature. *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 47, no. 2, Pp. 656–660.
17. **Aldosky H., Shamdeen S.** A new system for measuring electrical conductivity of water as a function of admittance. *Journal of Electric Bioimpedance*, 2011, no. 2, Pp. 86–92. DOI: 10.5617/jeb.203
18. **Sherman A., Mercado-Uribe H.** Dielectric spectroscopy of water at low frequencies: The existence of an isopermittive point. *Chemical Physics Letters*, 2010, no. 503, Pp. 4–6. DOI: 10.1016/j.cplett.2011.01.027
19. **Coleman C.** *Analysis and modeling of radio wave propagation*. Cambridge, Cambridge University Press, 2017. 296 p.
20. **Gonzalez G.** *Advanced electromagnetic wave propagation methods*. Boca Raton, CRC Press, 2022. 708 p.

#### INFORMATION ABOUT AUTHOR / СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Типикин Алексей Алексеевич**  
**Aleksey A. Tipikin**  
 E-mail: alextip@mail.ru

*Поступила: 03.04.2022; Одобрена: 23.05.2022; Принята: 30.05.2022.*  
*Submitted: 03.04.2022; Approved: 23.05.2022; Accepted: 30.05.2022.*