

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОЧАСТОТНОГО КОГЕРЕНТНОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

А.А. Романов, А.В. Новиков, А.А. Романов
(ОАО «РКС»)

Приведен теоретический метод определения абсолютного полного электронного содержания (ПЭС) на основе обработки фазы многочастотных немодулированных когерентных сигналов. Представлен расчет величин фазовой неоднозначности и разрешающей способности в терминах ПЭС. Обоснована комбинация частот когерентных сигналов, используя которую можно восстановить абсолютное ПЭС ионосферы Земли, при использовании несложной приемной аппаратуры.

Ключевые слова: ионосфера, электронная плотность ионосферы, полное электронное содержание.

Введение

Исследования ионосферы Земли серьезно осложняются недостаточным количеством специализированной аппаратуры, предназначенной для определения вертикального распределения электронной концентрации.

Навигационные системы являются мощным инструментом для изучения процессов, протекающих в верхней атмосфере. Навигационные системы первого поколения излучают узкополосные когерентные сигналы на двух частотах 150 и 400 МГц [1]. Современные глобальные спутниковые навигационные системы используют два диапазона с центральными частотами около 1,2 и 1,6 ГГц [2]. На основе анализа разности фаз, принимаемых на двух частотах сигналов, можно восстановить полное электронное содержание (ПЭС) в ионосфере Земли с точностью до константы [3].

Поскольку из непосредственных измерений можно определить только относительное ПЭС, на последующих этапах обработки информации необходимо определить количество полных циклов фазы сигнала или дифференцировать сигнал, исключив, таким образом, константу [3].

Подобный подход позволяет восстанавливать градиенты электронной концентрации в ионосфере, но не позволяет получать фоновое распределение. Следовательно, при использовании разностных методов возникает необходимость в начальном приближении [3, 4]. Схема измерений, позволяющая получить абсолютные значения ПЭС с точностью, приемлемой для решения обратной задачи реконструкции вертикального распределения электронной концентрации, позволила бы отказаться от использования априорных данных.

В [5] приведено описание метода расчета ПЭС на основе трехчастотной комбинации когерентных сигналов, использующихся спутниковой сис-

темой FORMOSAT-3/COSMIC. Авторами описан подход обработки трехчастотных фазовых данных, позволяющий увеличить величину минимальной неоднозначности определения ПЭС до четверти физически возможного диапазона значений, т. е. для интерпретации данных нужно выбрать одно из четырех разнесенных по диапазону значений.

В данной работе предлагается метод обработки многочастотных немодулированных когерентных радиосигналов, позволяющий довести величину неоднозначности до значений, превосходящих ширину диапазона, т. е. дать возможность однозначной интерпретации измерений абсолютного значения ПЭС вдоль луча, соединяющего передатчик и приёмник.

Метод определения ПЭС из многочастотных фазовых измерений

Приведем расчет оптимального метода обработки четырехчастотного немодулированного сигнала, дающий наилучшее разрешение при максимальной величине неопределенности.

Набег фазы радиосигнала, прошедшего через ионосферу, можно описать формулой [6]

$$P = (S - \int \frac{\epsilon N}{f^2} ds) \frac{f}{c}, \quad (1)$$

где S – геометрический путь, пройденный лучом; $\epsilon = 40,3$; f – частота несущей сигнала; $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; ds – элемент пути луча; $\int N ds$ – ПЭС.

В этой формуле единицей измерения фазы предполагается число циклов периодического процесса частоты f .

Разность фаз для сигналов частот несущих f_a и f_b с учетом формулы (1) имеет вид:

$$\Delta P_{ab} = P_a - P_b \frac{f_a}{f_b} = \frac{(f_b - f_a)(f_b + f_a) \varepsilon}{c f_b^2 f_a} \int N ds.$$

Рассмотрим случай четырех когерентных частот, причём соседние частоты отличаются в n_2/n_1 раз, где n_2 и n_1 целые. Частоты, соответствующие этому случаю, можно выразить через основную частоту f_0 :

$$\begin{aligned} f_1 &= n_1^3 f_0; \\ f_2 &= n_1^2 n_2 f_0; \\ f_3 &= n_1 n_2^2 f_0; \\ f_4 &= n_2^3 f_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда разность фаз для каждой пары частот можно записать так:

$$\begin{aligned} a) \quad \Delta P_{12} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon}{n_1^3 n_2^2 c f_0} \int N ds; \\ б) \quad \Delta P_{13} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon}{n_1^3 n_2^4 c f_0} \int N ds; \\ в) \quad \Delta P_{14} &= \frac{(n_2^6 - n_1^6) \varepsilon}{n_1^3 n_2^6 c f_0} \int N ds; \\ г) \quad \Delta P_{23} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon}{n_1^2 n_2^3 c f_0} \int N ds; \\ д) \quad \Delta P_{24} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon}{n_1^2 n_2^5 c f_0} \int N ds; \\ е) \quad \Delta P_{34} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon}{n_1 n_2^4 c f_0} \int N ds. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как фаза всегда определена с точностью до константы, разность фаз можно представить в виде неизвестной целой и измеряемой дробной части:

$$\Delta P_{ab} = K_{ab} + \Delta \varphi_{ab}. \quad (4)$$

При записи этой формулы и далее по тексту будем считать, что разность фаз измеряется в долях цикла частоты f_a . Целая часть разности фаз может быть определена путем разрешения фазовой неоднозначности. При двухчастотных измерениях неоднозначность ПЭС соответствует целому числу полных циклов фазы. Т. е. шаг неоднозначности соответствует $\Delta P = 1$ (углу поворота фазы в 2π рад). Величины неоднозначностей имеют вид:

$$\begin{aligned} a) \quad \Delta_{12} \int N ds &= n_1^3 n_2^2 c f_0 / (n_2^2 - n_1^2) \varepsilon = \\ &= 7,44 \cdot 10^6 f_0 n_1^3 n_2^2 / (n_2^2 - n_1^2) m^{-2} = \\ &= 7,44 \cdot 10^{-10} f_0 n_1^3 n_2^2 / (n_2^2 - n_1^2) \text{ TECU}; \\ б) \quad \Delta_{13} \int N ds &= n_1^3 n_2^4 c f_0 / (n_2^4 - n_1^4) \varepsilon = \\ &= 7,44 \cdot 10^6 f_0 n_1^3 n_2^4 / (n_2^4 - n_1^4) m^{-2} = \\ &= 7,44 \cdot 10^{-10} f_0 n_1^3 n_2^4 / (n_2^4 - n_1^4) \text{ TECU}; \\ в) \quad \Delta_{14} \int N ds &= n_1^3 n_2^6 c f_0 / (n_2^6 - n_1^6) \varepsilon = \\ &= 7,44 \cdot 10^6 f_0 n_1^3 n_2^6 / (n_2^6 - n_1^6) m^{-2} = \\ &= 7,44 \cdot 10^{-10} f_0 n_1^3 n_2^6 / (n_2^6 - n_1^6) \text{ TECU}; \\ г) \quad \Delta_{23} \int N ds &= n_1^2 n_2^5 c f_0 / (n_2^2 - n_1^2) \varepsilon = \\ &= 7,44 \cdot 10^6 f_0 n_1^2 n_2^5 / (n_2^2 - n_1^2) m^{-2} = \\ &= 7,44 \cdot 10^{-10} f_0 n_1^2 n_2^5 / (n_2^2 - n_1^2) \text{ TECU}; \\ д) \quad \Delta_{24} \int N ds &= n_1^2 n_2^5 c f_0 / (n_2^4 - n_1^4) \varepsilon = \\ &= 7,44 \cdot 10^6 f_0 n_1^2 n_2^5 / (n_2^4 - n_1^4) m^{-2} = \\ &= 7,44 \cdot 10^{-10} f_0 n_1^2 n_2^5 / (n_2^4 - n_1^4) \text{ TECU}; \\ е) \quad \Delta_{34} \int N ds &= n_1 n_2^4 c f_0 / (n_2^2 - n_1^2) \varepsilon = \\ &= 7,44 \cdot 10^6 f_0 n_1 n_2^4 / (n_2^2 - n_1^2) m^{-2} = \\ &= 7,44 \cdot 10^{-10} f_0 n_1 n_2^4 / (n_2^2 - n_1^2) \text{ TECU}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для простоты будем считать точность определения разности набегов фаз одинаковой для каждой пары каналов и равной $\delta\varphi$. В этом предположении из формул (3) нетрудно заметить, что раз-

решение будет пропорционально $\delta\varphi$ минимальной неопределенности, т. е.:

$$\delta_{ij} \int N ds = \Delta_{ij} \int N ds \delta\varphi.$$

Поскольку измерения на всех частотах производятся в один момент времени, значения ПЭС для всех трех случаев должны быть одинаковы. Следовательно, формулы (3) можно преобразовать в пропорцию:

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon}{c f_0} \int N ds = \\ & = \Delta P_{12} / \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^2} = \Delta P_{13} / \frac{n_2^4 - n_1^4}{n_1^3 n_2^4} = \Delta P_{14} / \frac{n_2^6 - n_1^6}{n_1^3 n_2^6} = \\ & = \Delta P_{23} / \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^2 n_2^5} = \Delta P_{24} / \frac{n_2^4 - n_1^4}{n_1^2 n_2^5} = \Delta P_{34} / \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1 n_2^4}. \end{aligned}$$

Вынесем общий для всех членов множитель из знаменателей. Для этого умножим все части на $n_2^2 - n_1^2 / n_1^3 n_2^6$:

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon}{c f_0} \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^6} \int N ds = \frac{\Delta P_{12}}{n_2^4} = \frac{\Delta P_{13}}{n_2^2 (n_2^2 + n_1^2)} = \\ & = \frac{\Delta P_{14}}{n_2^4 + n_1^2 n_2^2 + n_1^4} = \frac{\Delta P_{23}}{n_1 n_2^5} = \frac{\Delta P_{24}}{n_1 n_2 (n_2^2 + n_1^2)} = \frac{\Delta P_{34}}{n_1^2 n_2^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из приведенных равенств можно составить пятнадцать различных комбинаций. Выведем общий для этих комбинаций алгоритм разрешения неоднозначностей и записи формулы для ПЭС. Выберем два члена пропорции, участвующих в рассматриваемой комбинации (ΔP_{ij} и ΔP_{kl}), они могут быть представлены в виде:

$$\frac{\varepsilon}{c f_0} \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^6} \int N ds = \frac{\Delta P_{ij}}{N_{ij} M_{ijkl}} = \frac{\Delta P_{kl}}{N_{kl} M_{ijkl}}. \quad (7)$$

Здесь N_{ij} , N_{kl} и M_{ijkl} – натуральные числа. Умножим все три части на M_{ijkl} :

$$\frac{\varepsilon}{c f_0} \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^6} M_{ijkl} \int N ds = \frac{\Delta P_{ij}}{N_{ij}} = \frac{\Delta P_{kl}}{N_{kl}}. \quad (8)$$

Перепишем правое равенство в виде:

$$\Delta P_{ij} N_{kl} = \Delta P_{kl} N_{ij}. \quad (9)$$

С учетом формулы (4)

$$(K_{ij} + \Delta\varphi_{ij}) N_{kl} = (K_{kl} + \Delta\varphi_{kl}) N_{ij}; \quad (10)$$

$$K_{ij} N_{kl} - K_{kl} N_{ij} = \Delta\varphi_{kl} N_{ij} - \Delta\varphi_{ij} N_{kl}. \quad (11)$$

Заметим, что правая часть уравнения (11) – целое число, значит, левая часть тоже должна быть целой. Определим два новых неизвестных целых числа x_{ij} и x_{kl} , как минимальные по модулю решения целочисленного уравнения:

$$x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij} = 1. \quad (12)$$

Теперь можно выразить K_{12} и K_{13} :

$$a) K_{ij} = [\Delta\varphi_{kl} N_{ij} - \Delta\varphi_{ij} N_{kl}] x_{ij} + k N_{ij}; \quad (13)$$

$$б) K_{kl} = [\Delta\varphi_{kl} N_{ij} - \Delta\varphi_{ij} N_{kl}] x_{kl} + k N_{kl}.$$

где k – произвольное целое число.

Запишем значения абсолютных фаз, с учётом уравнений (13):

$$\begin{aligned} a) \Delta P_{ij} &= K_{ij} + \Delta\varphi_{ij} = \\ &= [\Delta\varphi_{kl} N_{ij} - \Delta\varphi_{ij} N_{kl}] x_{ij} + k N_{ij} + \Delta\varphi_{ij}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} б) \Delta P_{kl} &= K_{kl} + \Delta\varphi_{kl} = \\ &= [\Delta\varphi_{kl} N_{ij} - \Delta\varphi_{ij} N_{kl}] x_{kl} + k N_{kl} + \Delta\varphi_{kl}. \end{aligned}$$

Заменим множитель 1 при последних членах уравнений (14) на выражение $x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij}$:

$$\begin{aligned} a) \Delta P_{ij} &= [\Delta\varphi_{kl} N_{ij} - \Delta\varphi_{ij} N_{kl}] x_{ij} + \\ &+ k N_{ij} + [x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij}] \Delta\varphi_{ij}; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} б) \Delta P_{kl} &= [\Delta\varphi_{kl} N_{ij} - \Delta\varphi_{ij} N_{kl}] x_{kl} + \\ &+ k N_{kl} + [x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij}] \Delta\varphi_{kl}. \end{aligned}$$

Упростим выражения:

$$\begin{aligned}
 a) \Delta P_{ij} &= [x_{ij}\Delta\varphi_{kl} - x_{kl}\Delta\varphi_{ij} + k]N_{ij}; \\
 б) \Delta P_{kl} &= [x_{ij}\Delta\varphi_{kl} - x_{kl}\Delta\varphi_{ij} + k]N_{kl}.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Множитель перед скобками в формуле (17) представляет собой величину минимальной неоднозначности, так как является множителем, стоящим перед произвольной константой k :

Выразим ПЭС из формулы (8):

$$\begin{aligned}
 \int Nds &= \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{\Delta P_{ij}}{N_{ij} M_{ijkl}} = \\
 &= \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{\Delta P_{kl}}{N_{kl} M_{ijkl}} =
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$\Delta_{ijkl} \int Nds = \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}}. \tag{18}$$

Если предположить, что точность измерения разности фаз для любых пар частот одинакова и равна $\delta\varphi$, то точность измерения ПЭС будет пропорциональна $\delta\varphi$, т. е.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}} [x_{ij}\Delta\varphi_{kl} - x_{kl}\Delta\varphi_{ij} + k]. \\
 \delta_{ijkl} \int Nds &= \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}} \sqrt{x_{ij}^2 + x_{kl}^2} \delta\varphi. \tag{19}
 \end{aligned}$$

Расчет величин неоднозначностей и точностей определения ПЭС

i, j	k, l	x_{ij}	x_{kl}	$\Delta_{ijkl} \int Nds$ [TECU]	$\delta_{ijkl} \int Nds / \delta\varphi$ [TECU/°]
1; 2	1; 3	-7	-8	8,31	0,25
	1; 4	-399	-463	532	903
	2; 3	-21	-1	1,04	0,014
	2; 4	-173	-74	66,56	34,7
	3; 4	-7	-1	8,31	0,16
1; 3	1; 4	-1615	-1643	532	3389
	2; 3	-3	-1	8,31	0,073
	2; 4	3	1	66,56	0,58
	3; 4	-8	-1	8,31	0,19
1; 4	2; 3	-1934	-625	532	3000
	2; 4	-1956	-721	532	3083
	3; 4	1180	143	532	1756
2; 3	2; 4	-7	-8	22,2	0,66
	3; 4	3	1	2,77	0,024
2; 4	3; 4	-3	-1	22,2	0,19

Численный расчет характеристик

Для спутниковых передатчиков, предназначенных для исследований ионосферы, выделены частоты 150 и 400 МГц, т. е. частоты кратные 50 МГц с коэффициентами $n_1 = 3$ и $n_2 = 8$. Рассмотрим случай четырехчастотного передатчика, расчетные формулы для которого были выведены выше. Выразим из первой формулы (2) значение f_0 и приведем значения других несущих:

$$\begin{aligned} f_0 &= f_1 / n_1^3 = 5, (5) \text{ МГц}; \\ f_1 &= 150 \text{ МГц}; \\ f_2 &= n_1^2 n_2 f_0 = 400 \text{ МГц}; \\ f_3 &= n_1 n_2^2 f_0 = 1066, (6) \text{ МГц}; \\ f_4 &= n_2^3 f_0 = 2844, (4) \text{ МГц}. \end{aligned}$$

Рассчитаем минимальные неопределенности для всех пар частот по формулам (5):

$$\begin{aligned} a) \Delta_{12} \int Nds &= \frac{n_1^3 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \epsilon} \approx 0,13 \text{ TECU}; \\ б) \Delta_{13} \int Nds &= \frac{n_1^3 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \epsilon} \approx 0,11 \text{ TECU}; \\ в) \Delta_{14} \int Nds &= \frac{n_1^3 n_2^6 c f_0}{(n_2^6 - n_1^6) \epsilon} \approx 0,11 \text{ TECU}; \\ г) \Delta_{23} \int Nds &= \frac{n_1^2 n_2^3 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \epsilon} \approx 0,35 \text{ TECU}; \\ д) \Delta_{24} \int Nds &= \frac{n_1^2 n_2^5 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \epsilon} \approx 0,30 \text{ TECU}; \\ е) \Delta_{34} \int Nds &= \frac{n_1 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \epsilon} \approx 0,92 \text{ TECU}. \end{aligned}$$

Проведем численный расчет по формулам (6) – (19) для всех пятнадцати частотных комбинаций, результаты сведем в таблицу.

Для получения точного абсолютного значения ПЭС необходимо максимизировать неоднозначность и минимизировать ошибку определения ПЭС. Максимальная неоднозначность в 532 TECU достижима при использовании нескольких комбинаций частот, наименьшую ошибку из них дает комбинация 1214, однако, эти комбинации накладывают высокие требования на значения $\delta\phi$, т. е. на разрешающую способность приемной аппаратуры. Комбинация 1324 дает неоднозначность 66,6 TECU, что перекрывает практически весь физиче-

ски обоснованный диапазон значений ПЭС для средних широт [6].

С другой стороны, требования к точности все ещё высоки, например, для обеспечения разрешения в 1 TECU, точность определения разности фазы должна составлять $1,7^\circ$.

Требования к точности разрешения фазы можно ослабить при последовательном использовании комбинаций, дающих грубые измерения для разрешения неоднозначностей более точных. Так при разрешении неоднозначности в 22,2 TECU комбинации 2434 с помощью измерений по комбинации 1324, достаточно разрешения по фазе в 38° . Этого же разрешения достаточно для последующего перехода к комбинации 1323 (неоднозначность 8,31 TECU), затем 2334 (неоднозначность 2,77 TECU), затем 1223 (неоднозначность 1,04 TECU). Далее возможно использование простых двухчастотных комбинаций. Наибольшую, а, следовательно, легко разрешимую, неоднозначность дает комбинация 34, с помощью нее может быть разрешена неоднозначность самой точной комбинации 14. При фазовом разрешении в 38° разрешение этой комбинации составит около 0,01 TECU.

Таким образом, использование описанной выше последовательности измерений позволяет достичь неоднозначности в 66,6 TECU при точности не хуже 0,01 TECU, не предъявляя завышенных требований к приемной аппаратуре.

Заключение

В работе предложен эффективный метод определения абсолютного ПЭС в ионосфере Земли на основе просвечивания когерентными сигналами на частотах 150, 400, 1067 и 2844 МГц.

Рассмотрены несколько вариантов комбинирования частотных диапазонов, использование которых приводит к определению ПЭС с высокой точностью на основе измерения фазовых характеристик сигнала.

Использование комбинации 1214 позволяет получить величину неоднозначности в 532 TECU, что перекрывает абсолютно весь спектр физически обоснованных значений ПЭС в ионосфере Земли, но требуется обеспечить высокую точность определения фазы приемной аппаратурой (порядка десятков угловых минут).

Комбинация 1324 дает величину неоднозначности 66,6 TECU, что также позволяет говорить о восстановлении абсолютного ПЭС, а необходимая точность фазовых измерений около 1° .

Последовательное использование комбинаций, дающих грубые результаты для разрешения неоднозначностей более точных, позволяет снизить требования к точности определения фазы сигналов в приемной аппаратуре. Применение комбинаций 2434, 1323, 2334 и 1223 позволяет получить неоднозначность 66,6 TECU при точности не хуже 0,01 TECU, не требуя высокоточной приемной аппаратуры (достаточной является точность определения фазы $\sim 30^\circ$).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 08-07-12014-офи).

Литература

1. Богданов В.А. Спутниковые системы морской навигации / В.А. Богданов, В.А. Сорочинский, Е.В. Якшевич. – М.: Транспорт, 1987. – 200 с.

2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под Г-52 ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.

3. Куницын В.Е. Радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 336 с.

4. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России / А.А. Романов, С.В. Трусов, А.А. Романов [и др.] // Исследование Земли из космоса. – М., 2008. – №2. – С. 14–20.

5. Improved Ambiguity and Resolution for Total Electron Content Measured with the Three Transmitted Frequencies from the COSMIC TBB Instrument/ P. Bernhardt, C. Seifring // Joint Geosciences Assembly. – Taiwan, 2004.

6. Колосов М.А. Распространение радиоволн при космической связи / М.А. Колосов, Н.А. Арманд, О.И. Яковлев. – М.: Связь, 1969. – 155 с.

Поступила в редакцию 10.07.2009

*Александр Алексеевич Романов, канд. физ.-мат. наук,
руководитель Проекта,*

т. +7(495)673-99-34, e-mail: romulas@rniikp.ru.

Алексей Васильевич Новиков, науч. сотрудник,

т. +7(495)673-99-34, e-mail: novikovav@rniikp.ru.

*Алексей Александрович Романов, д-р техн. наук, зам. генерального
директора-генерального конструктора,*

т. +7(495)673-99-34, e-mail: romanov@rniikp.ru.