

# Нейронные сети и интеллектуальные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2024-3-53-61

УДК 621.396.67

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

**Матюков Максим Андреевич**

магистрант кафедры радиотехники Муромского института<sup>1</sup> (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых». E-mail: [maks.matyukov@mail.ru](mailto:maks.matyukov@mail.ru)

**Федосеева Елена Валерьевна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института<sup>1</sup> (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: [elenafedoseeva@yandex.ru](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)

**Ростокин Илья Николаевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления и контроля в технических системах Муромского института<sup>1</sup> (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: [rostockin.ilya@yandex.ru](mailto:rostockin.ilya@yandex.ru)

**Холодов Иван Юрьевич**

магистрант кафедры радиотехники Муромского института<sup>1</sup> (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых». E-mail: [johncold511@gmail.com](mailto:johncold511@gmail.com)

**Щукин Георгий Георгиевич**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского)<sup>2</sup>; научный руководитель лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» Муромского института<sup>1</sup> (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: [ggshchukin@mail.ru](mailto:ggshchukin@mail.ru)

<sup>1</sup>Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

<sup>2</sup>Адрес: 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы выбора нейронной сети и оценки эффективности её работы для решения задачи краткосрочного прогнозирования метеопараметров приземного слоя атмосферы по результатам СВЧ радиометрического зондирования атмосферы. Определены задачи и последовательность нейросетевого прогнозирования метеопараметров по результатам многочастотного СВЧ радиометрического зондирования атмосферы. Рассмотрены три варианта программ формирования нейронной сети, имеющих в открытом доступе. Выполнено обучение и тестирование нейронных сетей прогнозирования метеопараметров приземного слоя атмосферы по выходным сигналам одиннадцати каналов четырёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы и данным с метеостанции, расположенных в г. Муром. Предложено формирование обучаемой выборки для нейронной сети с перемешиванием данных для исключения влияния временных тенденций изменения метеопараметров. Получены численные оценки эффективности работы нейронных сетей прогнозирования метеопараметров — коэффициента корреляции и среднего отклонения и сформулированы выводы по сравнительному анализу работы нейронных сетей.

**Ключевые слова:** СВЧ радиометрическая система, нейронная сеть, краткосрочное прогнозирование метеопараметров атмосферы, радиотепловое излучение, зондирование.

### Введение

В настоящее время одним из быстроразвивающихся направлений разработки систем прогнозирования по результатам дистанционных измерений является включение в состав систем нейронной сети, которая, обученная на выборке результатов ранее выполненных измерений, формирует прогноз развития ситуации по данным текущих измерений [1, 2].

Дистанционное СВЧ радиометрическое зондирование атмосферы основано на измерении мощности радиотеплового излучения, создаваемого атмосферой в области расположения СВЧ радиометрической системы, как интегральной величины, зависящей от метеопараметров атмосферы, её пространственно-временной однородности и технических характеристик самой системы [3–5]. Выполнение указанных СВЧ радиометрических измерений при обеспечении полной калибровки системы и компенсации влияния фоновых шумов, с последующим решением обратных задач по известным алгоритмам с необходимой корректировкой в зависимости от географического месторасположения зондирующей системы и условий проведения измерений, позволяет оценивать метеопараметры: температуру, влажность, интегральное влаго- и водосодержание, интенсивность осадков [4–5]. Поэтому оценка состояния атмосферы и её метеопараметров по данным микроволновых радиометрических измерений даже в ограниченной области требует значительных технических и временных затрат, что обосновано при реализации задач масштабных исследований атмосферных процессов в условиях базирования СВЧ радиометрических систем на оборудованных метеополígонах.

При решении задачи своевременного выявления условий развития опасных метеоявлений необходимо краткосрочное прогнозирование по данным дистанционного зондирования атмосферы, что может быть выполнено по результатам предшествующих измерений при анализе измерительной информации текущего момента за определённый промежуток времени. В такой

ситуации возможно использование нейронных сетей, которые показали свою высокую эффективность при прогнозировании на коротких отрезках времени [8–11].

В данной работе анализируются условия применения трёх разных нейронных сетей, находящихся в открытом доступе, с адаптацией под задачу прогнозирования метеопараметров по результатам многочастотного СВЧ радиометрического зондирования атмосферы [12–14].

### Задачи нейронной сети в составе СВЧ радиометрической системы

При выборе нейронной сети, используемой в СВЧ радиометрической системе, необходимо предусмотреть возможность краткосрочного прогнозирования развития состояния атмосферы, например, путём прогнозирования значений метеопараметров приземного слоя атмосферы. Решение указанной задачи — многоэтапный процесс, связанный, как с подготовкой данных по результатам измерений и сбора метеорологической информации для формирования обучающей выборки, так и организацией работы нейронной сети. Были сформулированы задачи и цели для каждого этапа.

1. Анализ и предобработка данных измерений многодиапазонной СВЧ радиометрической системой, с целью извлечения информативных признаков о состоянии атмосферы.

2. Прогнозирование динамики изменения основных метеопараметров: температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, облачности, наличия и интенсивности осадков.

3. Верификация результатов прогноза на основе данных дополнительных источников наблюдений с целью адаптивной настройки параметров нейросетевой модели.

4. Расчёт показателей качества и надёжности прогноза метеопараметров для оценки эффективности предложенного подхода.

Для корректного выполнения указанных задач в первую очередь определялась структура нейронной сети. Были использованы программы, имеющиеся в открытом доступе. Рассмат-

Таблица 1. Сравнение программ-конструкторов нейросетей

Параметр \ Программа	Neural Excel 6.2.6	Нейросимулятор 5.0	Neurosolutions 7.1.1
Дата выпуска	29.08.2020[16]	12.08.2014[17]	03.10.2016[18]
Разработчики	Филимонов Андрей Викторович	Черепанов Ф.М., Ясницкий Л.Н.	15 человек
Поддерживаемые структуры (топологии)	Многослойный перцептрон	Многослойный перцептрон	17 вариантов
Максимальное количество скрытых слоёв	10	100	неограниченно
Методы обучения	1 - Rprop	7 методов	6 методов
Особенности	Выполнена в виде надстройки к программе MS Excel	Исполняемый Exe файл, есть интеграция с MS Excel	Комплекс подпрограмм, основа – exe файл, есть дополнение в виде надстройки MS Excel
Цена	Бесплатно	Бесплатно	295\$

ривались три различные программы, каждая из которых предлагает свой подход в формировании нейросети. Это программы — «Neural Excel 6.2.6», «Нейросимулятор 5.0» и «NeuroSolutions» [15–18]. Они позволяют конфигурировать и обучать многослойные нейронные сети, используя программу Microsoft Excel.

#### Анализ свойств и условий функционирования программ создания нейронных сетей для краткосрочного прогнозирования метеопараметров

Для определения условий наиболее эффективного функционирования нейронных сетей в процессе прогнозирования метеопараметров по данным СВЧ радиометрических измерений были проанализированы свойства ранее указанных программ «Neural Excel 6.2.6», «Нейросимулятор 5.0» и «NeuroSolutions». В таблице 1 приведены информация по разработке программ и функциональные особенности программ — «конструкторов» нейросетей.

В программах Neural Excel 6.2.6 и Нейросимулятор 5.0 структура сети одинаковая — многослойный перцептрон — multilayer perceptron (MLP). Программа Neurosolutions 7.1.1 предлагает несколько вариантов структуры сети.

Для определения эффективности работы указанных программ после ввода исходных данных обучались все варианты нейронных сетей, что позволило провести сравнение их между собой.

В частности, при использовании данных многочастотных СВЧ радиометрических измерений августа–сентября 2023 года при решении задачи дополнения значений метеопараметров в промежуточные моменты времени наилучший результат показали обобщенные сети прямой связи (Generalized feedforward nets), которые являются частным случаем многослойных перцептронов с возможностью соединения нейронов через один или несколько слоёв. При этом в базовом отчёте программа выполняет сравнение до 7 различных структур нейросетей (рис. 1).

#### Результаты тестирования нейронных сетей прогнозирования метеопараметров

В результате проведённых измерений в августе–декабре 2023 года были сформированы массивы данных измерений, представляющие собой значения выходных сигналов одиннадцати каналов СВЧ радиометрической системы на частотах 4 ГГц, 10 ГГц, 22 ГГц и 37 ГГц, регистрируемые через 0,1 с на выходе многоканального квадратичного детектора [12–14].

Performance Metrics									
Model Name	Training			Cross Validation			Testing		
	RMSE	r	MAE	RMSE	r	MAE	RMSE	r	MAE
LinR-0-B-L (Linear Regression)	0.023257	0.048285	0.002686	0.025464	0.06061	0.002788	0.015732	0.054382	0.002195
MLPR-1-B-L (Regression MLP)	0.02326	0.046023	0.002748	0.025481	0.045794	0.002855	0.015768	0.019832	0.002281
PNN-0-N-N (Probabilistic Neural Network)	0.023228	0.083389	0.002589	0.025433	0.10223	0.002729	0.015698	0.090697	0.002113
RBF-1-B-L (Radial Basis Function)	0.023251	0.053695	0.002655	0.025425	0.089521	0.002809	0.015709	0.074367	0.00217
GFFR-1-B-L (Reg Gen Feedforward)	0.023118	0.119548	0.003413	0.025271	0.141093	0.003504	0.015537	0.165649	0.002946
MLPRPC-1-B-L (Reg MLP with PCA)	0.023266	0.03943	0.002666	0.025468	0.060701	0.002764	0.015742	0.041441	0.002195
MLPR-2-B-L (Regression MLP)	0.023259	0.046938	0.002728	0.025451	0.07414	0.002824	0.015747	0.040166	0.00225

Рис. 1. Отчёт, сформированный программой Neurosolutions 7.1.1 при сравнении различных структур нейросети,

В частности, для обучения нейронной сети прогнозирования метеопараметров — температуры, влажности и интенсивности осадков приземного слоя атмосферы был использованы данные с метеостанции в городе Муром, расположенной в непосредственной близости с антенной. Особенность указанных данных состоит в дискретности получения их во времени, информация доступна с периодичностью в 5 минут, что составляет 288 значений в день. Для анализа эффективности работы трёх указанных нейронных сетей первоначально решалась задача восстановления промежуточных значений метеопараметров. Для этого 50% данных - результатов измерений и метеорологической информации использовались для обучения нейросети, остальные 50% предназначались для проверки результатов прогнози-

рования по результатам измерений одиннадцати каналов СВЧ радиометра.

На рис. 2 показан пример выборки данных — результатов измерений и метеорологической информации для обучения нейросетей. В столбцах А-К находятся значения выходных сигналов одиннадцати каналов СВЧ радиометра, в столбцах L-N — данные полученные с метеостанции. Для исключения влияния последовательности данных измерений и метеопараметров, т.е. фактора их временного тренда, также был реализован алгоритм перемешивания элементов обучающей выборки с целью, получения нейросетевой модели с абсолютным алгоритмом формирования прогноза метеопараметров без относительной привязки к временному тренду этого параметра в данный период прогнозирования. С этой це-

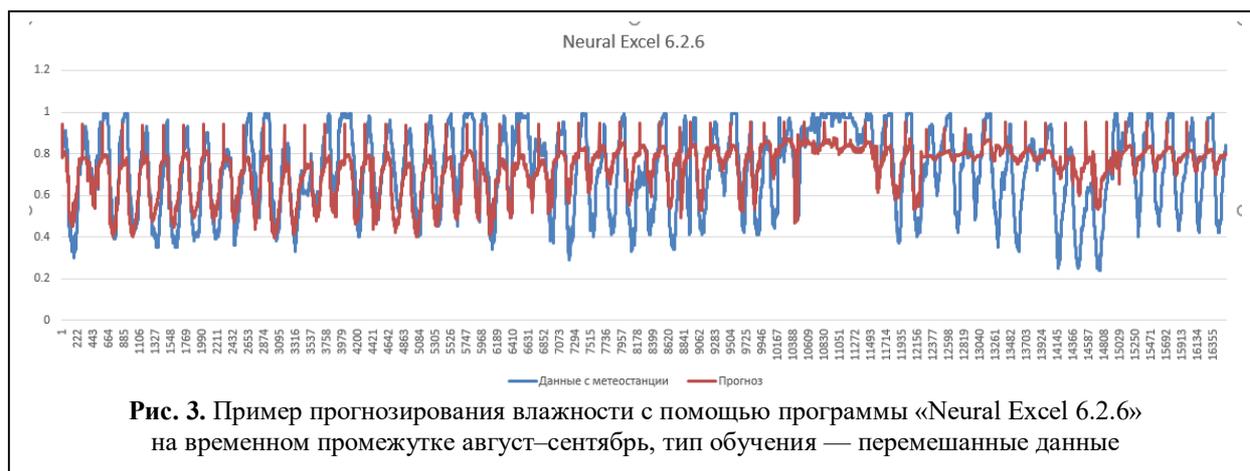
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Channel-2	Channel-3	Channel-4	Channel-5	Channel-6	Channel-7	Channel-8	Channel-9	Channel-1	Channel-1	Channel-1	Осадки	Влажн	Температура	Номер	Строка
2	-0.00179	0.01139	0.02525	0.060357	0.029982	0.044843	0.060357	0.01139	0.02525	0.02467	0.029982	0	0.95	0.694	9.79E-06	584
3	0.003659	0.018094	0.027884	0.066912	0.038986	0.003425	0.066912	0.018094	0.027884	0.029118	0.038986	0	0.85	0.658	0.000146	8945
4	0.008461	0.019292	0.0282	0.068442	0.043392	0.004496	0.068442	0.019292	0.0282	0.032635	0.043392	0	0.81	0.636	0.0002	13729
5	-0.00617	-0.00289	0.018901	0.056806	0.022441	0.054439	0.056806	-0.00289	0.018901	0.01829	0.022441	0	0.48	0.778	0.000222	4503
6	0.006421	0.009321	0.026177	0.067238	0.032904	0.004678	0.067238	0.009321	0.026177	0.030795	0.032904	0	0.31	0.75	0.000228	14469
7	0.000881	0.011096	0.021588	0.061617	0.033102	0.036931	0.061617	0.011096	0.021588	0.025236	0.033102	0	0.85	0.66	0.000248	6445
8	0.008126	0.019	0.028021	0.068192	0.042953	0.004864	0.068192	0.019	0.028021	0.032357	0.042953	0	0.79	0.639	0.000326	13721
9	0.004381	0.011321	0.022223	0.061285	0.03363	0.034984	0.061285	0.011321	0.022223	0.025648	0.03363	0	0.83	0.642	0.000353	6218
10	-0.00584	-0.00202	0.012461	0.05681	0.022733	0.036416	0.05681	-0.00202	0.012461	0.017731	0.022733	0	0.56	0.761	0.000359	3586
11	-0.00023	0.010686	0.022014	0.061165	0.029526	0.056453	0.061165	0.010686	0.022014	0.02378	0.029526	0	0.99	0.704	0.000426	898
12	-0.00969	0.000876	0.019571	0.056845	0.023692	0.028606	0.056845	0.000876	0.019571	0.019005	0.023692	0	0.5	0.774	0.000525	1963
13	0.002075	0.012137	0.026482	0.066702	0.037117	0.01054	0.066702	0.012137	0.026482	0.02849	0.037117	0	0.52	0.735	0.000788	14116
14	0.010732	0.021579	0.029858	0.069951	0.046815	0.007805	0.069951	0.021579	0.029858	0.03434	0.046815	0	0.97	0.575	0.000789	15743
15	0.003819	0.018277	0.028216	0.06758	0.038298	0.031966	0.06758	0.018277	0.028216	0.029184	0.038298	0	0.67	0.639	0.000803	8236
16	-0.00352	0.004538	0.018698	0.057331	0.026487	0.029044	0.057331	0.004538	0.018698	0.02049	0.026487	0	0.6	0.755	0.000829	5402
17	-0.0062	-0.00359	0.020074	0.058623	0.022436	0.044114	0.058623	-0.00359	0.020074	0.018995	0.022436	0	0.76	0.743	0.001032	4715
18	-0.00236	0.002314	0.024324	0.066252	0.030035	0.078583	0.066252	0.002314	0.024324	0.023191	0.030035	0	0.47	0.674	0.001075	8071
19	0.002108	0.018439	0.023018	0.065991	0.038495	0.000862	0.065991	0.018439	0.023018	0.02875	0.038495	0	0.84	0.634	0.001112	10028

Рис. 2. Пример выборки данных измерений СВЧ радиометрической системы и данных с метеостанций для обучения нейронной сети

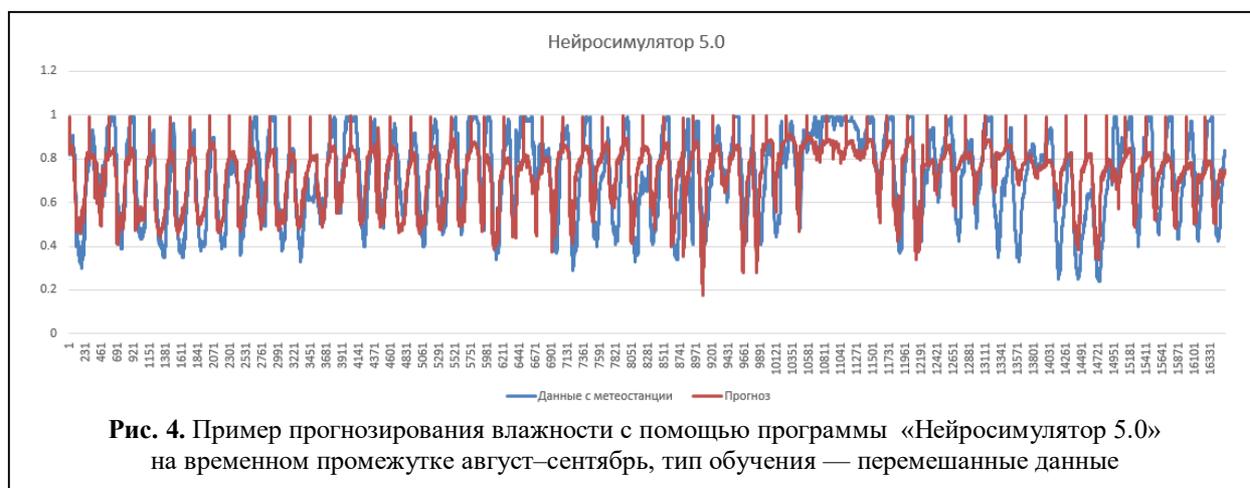
лю была введена процедура перемешивания данных обучающей и тестируемой выборки. Она реализовывалась с помощью функции «Слчисл()», для этого в столбце О генерируется уникальный идентификационный номер для каждой строки, сам номер строки предварительно записывается в столбец Р. Таким образом, выполнялось новое, случайно реализуе-

мое упорядочивание данных.

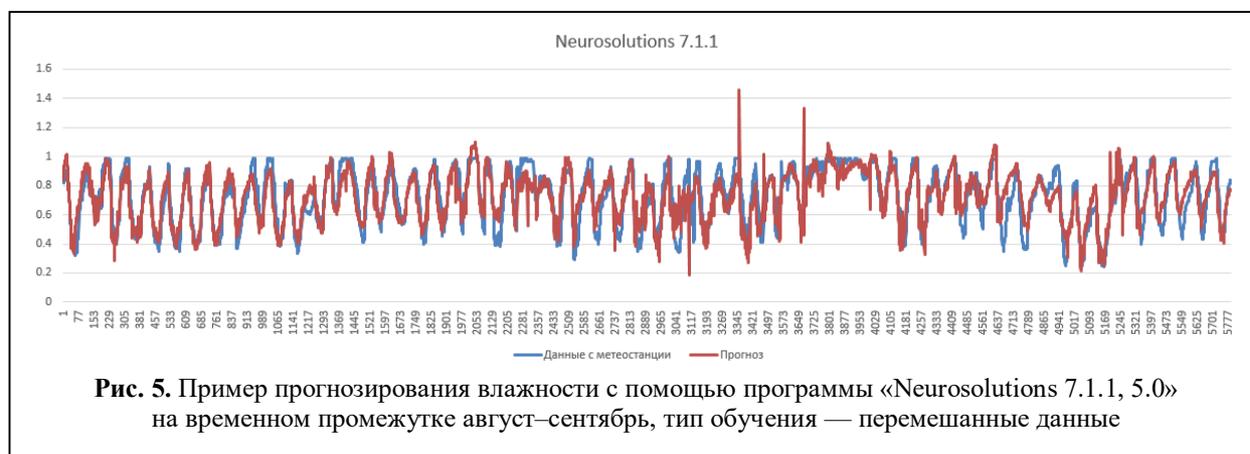
На рис. 3–5 представлен пример прогноза влажности, формируемый нейросетями, сгенерированными в разных программах. Красной линии соответствуют данные влажности с метеостанции, синей линии — прогноз нейросети. Эти рисунки соответствуют строкам 4 и 5 в таблице 2.



**Рис. 3.** Пример прогнозирования влажности с помощью программы «Neural Excel 6.2.6» на временном промежутке август–сентябрь, тип обучения — перемешанные данные



**Рис. 4.** Пример прогнозирования влажности с помощью программы «Нейросимулятор 5.0» на временном промежутке август–сентябрь, тип обучения — перемешанные данные



**Рис. 5.** Пример прогнозирования влажности с помощью программы «Neurosolutions 7.1.1, 5.0» на временном промежутке август–сентябрь, тип обучения — перемешанные данные

**Оценка результатов работы нейронной сети трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы**

Для численной оценки результатов работы нейронных сетей были рассчитаны коэффициенты корреляции  $k$ , а также среднее отклонение  $\sigma$  прогнозируемых значений метеопараметров приземного слоя атмосферы (1 — интенсивность осадков; 2 — влажность; 3 — температура) относительно их значений, полученных с метеостанции. Результаты расчёта представлены в таблице 2 и таблице 3.

В таблицах 2–3 коэффициент корреляции и среднее отклонение приведены в процентах. Для среднего отклонения величина 1% соответствует 1% влажности, 1°C, по температуре и 0,011 мм осадков.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

- обучение без перемешивания исходных данных для всех программ показало меньшее значение коэффициента корреляции, чем обучение с перемешиванием исходных данных, что позволяет говорить об эффективности процедуры перемешивания обучающей выбор-

ки и исключения при этом фактора временной зависимости;

- наилучшие результаты прогнозирования метеопараметров по величине коэффициента корреляции показала программа Neurosolutions 7.1.1, на втором месте Нейросимулятор 5.0;

- наличие наблюдаемой в отдельных случаях разной тенденции изменения коэффициента корреляции и средней ошибки прогнозирования метеопараметров (например, столбец Neurosolutions 7.1.1, строки Таблицы 2 и Таблицы: обе по влажности с перемешиванием исходных данных,  $\sigma$ , %) показывает необходимость рассматривать оба параметра для оценки эффективности работы нейронной сети в совокупности, что позволит выполнить правильную оценку результатов нейросетевого прогнозирования.

В целом анализ приведённых значений коэффициентов корреляции результатов многодиапазонного СВЧ радиометрического зондирования атмосферы и метеопараметров, прогнозируемых нейронной сетью показал, что для температуры и влажности обеспечивается хорошая точность, позволяющая с высокой

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции и среднее отклонение прогнозируемых метеопараметров по результатам измерений в августе–сентябре 2023 года

Тип обучения	Параметр оценки	Нейронная сеть / метеопараметр								
		Neural Excel			Нейросимулятор 5,0			Neurosolutions 7,1,1		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без перемешивания исходных данных	$k$ , %	-0,52	48,87	83,27	-0,93	58,80	73,96	-1,37	5,49	65,55
	$\sigma$ , %	0,19	15,01	3,33	0,30	12,30	3,47	0,11	22,43	5,54
С перемешиванием исходных данных	$k$ , %	1,32	60,77	86,9	1,70	78,21	89,36	13,57	85,39	93,72
	$\sigma$ , %	0,21	12,60	2,4	0,25	9,61	2,14	0,28	7,87	1,58

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции и среднее отклонение прогнозируемых метеопараметров по результатам измерений в октябре–ноябре 2023 года

Тип обучения	Параметр оценки	Нейронная сеть / метеопараметр								
		Neural Excel			Нейросимулятор 5,0			Neurosolutions 7,1,1		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без перемешивания исходных данных	$k$ , %	-4,91	3,64	75,11	-2,83	15,18	78,18	-5,21	-31,74	82,67
	$\sigma$ , %	1,89	10,44	4,24	0,84	11,71	3,38	1,19	10,86	8,03
С перемешиванием исходных данных	$k$ , %	4,76	34,42	85,34	6,60	50,05	90,73	11,78	71,40	96,05
	$\sigma$ , %	0,91	9,28	2,75	0,59	8,25	2,01	0,94	6,45	1,34

вероятностью определить текущие метеопараметры приземного слоя атмосферы, и есть возможность повышения эффективности прогнозирования при оптимизации структуры и принципов функционирования нейронной сети.

### Заключение

Полученные результаты оценки работы нейронных сетей по прогнозированию значений метеопараметров приземного слоя атмосферы показали их работоспособность в условиях краткосрочного прогнозирования, что может быть эффективно для выявления условий быстроразвивающихся опасных атмосферных явлений по результатам многодиапазонного СВЧ радиометрического зондирования.

Оценка погрешности нейросетевого прогнозирования при выполнении тестирования её работы выявила влияние структуры нейронной сети на точность прогнозирования для параметров — влажности и температуры, что определяет необходимость выбора наиболее успешной топологии сети для решения поставленной задачи

Таким образом, проведённые исследования показали перспективность введения нейронной сети в структуру системы обработки результатов измерений СВЧ радиометрического комплекса исследования атмосферы при решении задачи краткосрочного прогнозирования метеопараметров и выявления условий формирования опасных атмосферных явлений.

*Исследование выполнено за счёт гранта  
Российского научного фонда  
№ 21-19-00378,  
<https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.*

### Литература

1. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. СПб: Наука и техника, 2003. 380 с.
2. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
3. В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов Радиотеплолокация в метеороло-

гии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.

4. Кутуза Б.Г., Яковлев О.И., Данилычев М.В. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Монография. М.: Ленанд, 2016. 336 с.

5. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. Монография. М.: ФГБУ «ЦАО», 2020. 271 с.

6. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Определение содержания парообразной и жидкокапельной влаги из измерений микроволнового излучения атмосферы. Известия вузов. Радиофизика, 2021. Т. 64. №12. С. 942–953.

7. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8079.

8. Postylyakov O.V., Borovski A.N., Chulichkov A.I., Nikitin S.V. On estimation of cloudiness characteristics and parameters of DOAS retrieval from spectral measurements using a neural network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 489. No. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/489/1/012031.

9. Kalchebremer N., Sonderby C. A Neural Weather Model for Eight-Hour Precipitation Forecasting [Электронный ресурс]. URL: <https://ai.googleblog.com/2020/03/a-neural-weather-model-for-eight-hour.htm> (дата обращения 03.06.2024)

10. Шаранов Р.В. Использование нейронных сетей для предсказания опасных погодных явлений // Современные наукоемкие технологии, 2023. №1. С. 78–82.

11. Каряев В.В., Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Ростокина Е.А. Нейронная сеть в СВЧ радиометрической системе мониторинга атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. №4. С. 5–14.

12. Щукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. Радиометеорологические исследования в Муромском институте: пассивно-активный радиометеорологический комплекс // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №3. С. 5–17.

13. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г., Ростокина Е.А., Матюков М.А., Холодов И.Ю. Нейронная сеть в задачах краткосрочного прогнозирования по результатам микроволнового радиометрического зондирования атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2023. №3. С. 20–28.

14. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Многочастотные исследования неоднородной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2022. №12. С. 78–87.

15. Приложение Neural Excel [Электронный ресурс]. URL: <https://freesoft.ru/windows/neural-excel> (дата обращения 03.06.2024).

16. Программа Neural Excel [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20230319133241/https://www.neurotechlab.ru/news> (дата обращения 03.06.2024).

17. Черепанов Ф.М., Ясницкий Л.Н. Нейросимулятор // Свидетельство о государственной реги-

страции программы для ЭВМ №2014618208. Дата регистрации 05.05.2014.

18. Программа NeuroSolutions 7.1.1.0 [Электронный ресурс]. URL: <http://neurosolutions.soft32download.com/> (дата обращения 03.06.2024).

Поступила 3 июня 2024 г.

English

## ON THE MATTER OF CHOOSING A NEURAL NETWORK FOR THE TASK OF SHORT-TERM FORECASTING BASED ON THE RESULTS OF MICROWAVE RADIOMETRIC SOUNDING OF THE ATMOSPHERE

**Maksim Andreevich Matyukov** — Master's Degree Student, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"<sup>1</sup>.

E-mail: [maks.matyukov@mail.ru](mailto:maks.matyukov@mail.ru)

**Elena Valeryevna Fedoseeva** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"<sup>1</sup>.

E-mail: [elenafedoseeva@yandex.ru](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)

**Ilya Nikolaevich Rostokin** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Monitoring and Control in Engineering Systems, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"<sup>1</sup>.

E-mail: [rostockin.ilya@yandex.ru](mailto:rostockin.ilya@yandex.ru)

**Ivan Yurievich Kholodov** — Master's Degree Student, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs"<sup>1</sup>.

E-mail: [johncold511@gmail.com](mailto:johncold511@gmail.com)

**Georgy Georgyevich Shchukin** — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Technologies and Army Geophysical Support Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education "Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky"<sup>2</sup>, Ministry of Defense of the Russian Federation.

E-mail: [ggshchukin@mail.ru](mailto:ggshchukin@mail.ru)

<sup>1</sup>Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya st., 23.

<sup>2</sup>Address: 197198, Russian Federation, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

**Abstract:** The article studies the matters of choosing a neural network and its operation efficiency evaluation for the short-term forecasting task of weather parameters in the ground-level air further to the results of microwave radiometric sounding of the atmosphere. The following tasks and sequence for neural network forecasting of weather parameters based on the results of multi-frequency microwave radiometric sounding of the atmosphere: analysis and measurement data preprocessing by a multi-range microwave radiometric system for the purpose of retrieving informative features about the atmospheric status; forecasting the dynamics pattern in key weather parameters: air temperature and humidity, atmospheric pressure, clouds, rain situation; predicted result verification based on data from extra observation sources for the adaptive timing purpose of neural-network model parameters; calculation of quality and reliability indicators of weather parameters prediction to assess the proposed approach efficiency. There are examined three options of neural-network development programs that are out in the open. There is performed training and testing of neural networks for forecasting weather parameters of the ground-layer air via output signals of eleven channels in the quad-band microwave radiometric system that provides measurements of thermal radio radiation in the ground-layer air in four bands with center frequencies of 4 GHz, 10 GHz, 22 GHz and 37 GHz and data from the weather station located in Murom town. There was proposed and accomplished teaching sample creation

for a neural network with data perturbation to exclude the influence of temporal trend variations in weather parameters. There are obtained numerical estimates for the neural-network operation efficiency for forecasting weather parameters - correlation factor and mean deviation. The conclusions on the comparative analysis of neural-network operation are made. The attained results manifested different problem solving efficiency of forecasting weather parameters based on microwave radiometric measurements, which enabled to conclude that it is necessary to solve the structural optimization task for the utilized neural network.

*Keywords:* microwave radiometric system, neural network, short-term forecasting of atmospheric weather parameters, thermal radio radiation, remote sensing.

*The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 21-19-00378  
(<https://rscf.ru/projekt/21-19-00378>)*

### References

1. *Nazarov A.V., Loskutov A.I.* Neural network algorithms for forecasting and optimization of systems. Saint Petersburg: Nauka i tehnika, 2003. 380 p.
2. *Osovskij S.* Neural networks for information processing. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 344 p.
3. *Stepanenko V.D., Shhukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Ju.* Radio-thermal location in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
4. *Kutuza B.G., Jakovlev O.I., Danilychev M.V.* Microwave radiometry of the atmosphere and surface: Satellite monitoring of the Earth. Moscow: Lenand, 2016. 336 p.
5. *Kadygrov E.N.* Microwave remote sensing of atmospheric temperature profiles. Moscow: FGBU "TsAO", 2020. 271 p.
6. *Karavaev D.M., Shhukin G.G.* Determination of the content of vaporous and liquid-drop moisture using the measurements of microwave atmospheric radiation. Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. Vol. 64. No. 12. Pp. 942–953.
7. *Ware R.A.* A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8079.
8. *Postylyakov O.V., Borovski A.N., Chulichkov A.I., Nikitin S.V.* On estimation of cloudiness characteristics and parameters of DOAS retrieval from spectral measurements using a neural network // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 489. No. 012031. DOI 10.1088/1755-1315/489/1/012031.
9. *Kalchebremer N., Sonderby C.* A Neural Weather Model for Eight-Hour Precipitation Forecasting [Electronic Source]. URL: <https://ai.googleblog.com/2020/03/a-neural-weather-model-for-eight-hour.htm> (access date 03.06.2024).
10. *Sharapov R.V.* Using neural networks to predict dangerous weather events. Modern scientific technologies, 2023. No. 1. Pp. 78–82.
11. *Karjaev V.V., Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A.* Neural Network in microwave radiometric monitoring system of atmosphere. Radioengineering and telecommunication systems. 2022. No. 4. Pp. 5–14.
12. *Shhukin G.G., Bulkin V.V., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.* Radio-meteorological research at Murom institute: passive-active radio-meteorological facility. Radioengineering and telecommunication systems, 2022. No. 3. Pp. 5–13.
13. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shhukin G.G., Rostokina E.A., Matjukov M.A., Kholodov I.Yu.* Neural network tasks for short-term forecasting according to results of microwave radiometric sounding of the atmosphere. Radioengineering and telecommunication systems, 2023. No. 3. Pp. 20–28.
14. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shhukin G.G.* Multi-frequency microwave radiometric studies of an inhomogeneous atmosphere. Meteorologiya i Gidrologiya, 2022. No. 12. Pp. 78–87.
15. Neural Excel [Electronic source]. URL: <https://freesoft.ru/windows/neural-excel> (access date 03.06.2024).
16. Neural Excel [Electronic source]. URL: <https://web.archive.org/web/20230319133241/https://www.neurotechlab.ru/news> (access date 03.06.2024).
17. *Cherepanov F.M., Yasnitskiy L.N.* Neuro-simulator. Certificate of state registration of a computer program No. RU2014618208. Date of registration 05.05.2014.
18. NeuroSolutions 7.1.1.0 [Electronic source]. URL: <http://neurosolutions.soft32download.com/> (access date 03.06.2024).