

DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-20-28

УДК 621.396.67

## НЕЙРОННАЯ СЕТЬ В ЗАДАЧАХ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

**Федосеева Елена Валерьевна**

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

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 (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

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

**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 (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

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

**Ростокина Елена Анатольевна**

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

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

**Матюков Максим Андреевич**

магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

**Холодов Иван Юрьевич**

магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

<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 включения нейронной сети в процедуру обработки результатов СВЧ радиометрического зондирования атмосферы для решения задачи краткосрочного прогнозирования изменения состояния приземного слоя атмосферы. Показано отличие подходов к применению данных СВЧ радиометрического дистанционного зондирования при масштабных исследованиях атмосферных процессов путём решения обратных задач оценки метеопараметров и при решении задачи краткосрочного прогнозирования изменения метеопараметров приземного слоя атмосферы в заданном районе по результатам работы трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы путём включения в её состав нейронной сети, обучаемой на результатах суточных измерений. Представлена информация по техническим вопросам СВЧ радиометрического зондирования атмосферы. Рассмотрены особенности обучения нейронной сети для решения задачи прогнозирования метеопараметров — температуры, влажности и интенсивности осадков приземного слоя атмосферы. Указан способ получения последовательности значений метеопараметров и формирования массивов результатов СВЧ радиометрических измерений в трёх частотных диапазонах разной продолжительности. Приведены результаты тестирования нейронной сети на интервале времени от момента завершения обучаемого массива до июля 2023 года. Показаны результаты обучения и тестирова-

ния работы нейронной сети по прогнозированию трёх метеопараметров — температуры, интенсивности осадков и влажности, и выполнен их количественный анализ по среднему отклонению прогнозируемых значений метеопараметров от регистрируемых контактными способами в приземном слое атмосферы..

*Ключевые слова:* СВЧ радиометрическая система, нейронная сеть, краткосрочное прогнозирование метеопараметров атмосферы, обучение нейронной сети, зондирование атмосферы.

### **Введение**

Микроволновое радиометрическое зондирование атмосферы позволяет дистанционно оценивать её метеопараметры: температуру, влажность, интегральное влаго- и водосодержание, интенсивность осадков [1–5]. Решение указанных задач оценки метеопараметров предполагает выполнение полной, включая антенну, периодически выполняемой калибровки микроволновой радиометрической системы, формирование массивов результатов измерений радиояркой температуры, наличие алгоритмов решения обратных задач по оценке значений метеопараметров по величине радиояркой температуры. Таким образом, оценка состояния атмосферы по данным микроволновых радиометрических измерений требует значительных технических и временных ресурсов, что обосновано при реализации задач масштабных исследований атмосферных процессов.

Другим направлением микроволнового исследования состояния атмосферы является вариант включения в состав системы обработки данных дистанционных измерений нейронных сетей, в результате работы которых формируется весовая функция на основе ранее полученных данных для выполнения прогнозирования развития ситуации по вновь получаемым результатам [6–8], в том числе и для оценки метеопараметров [9–10].

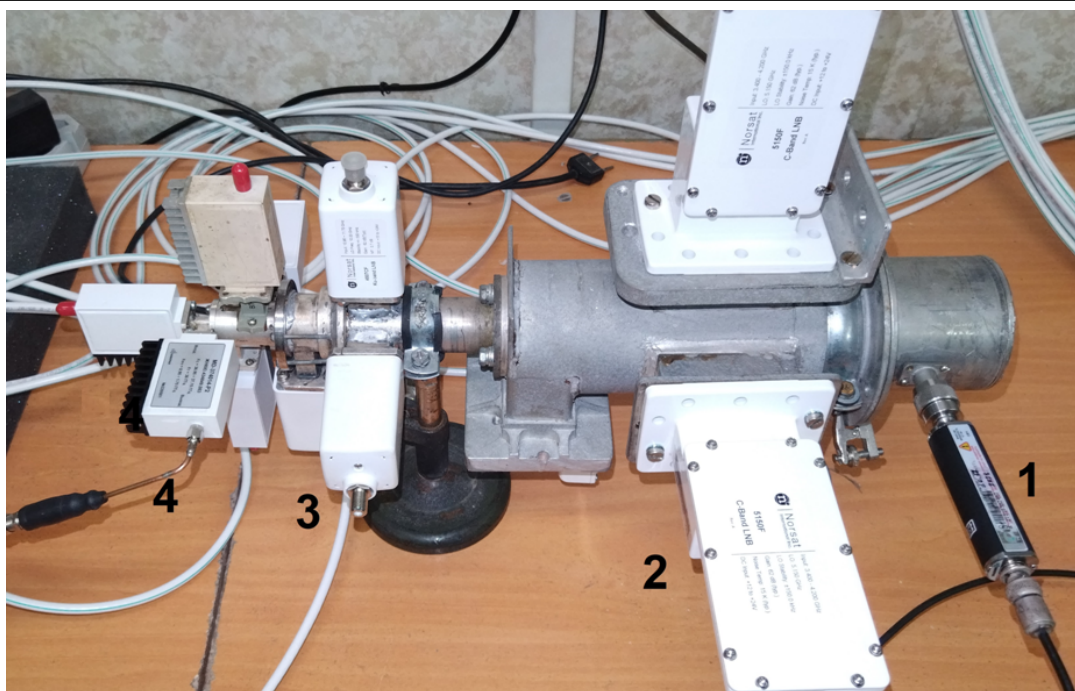
В данной работе рассматривается вариант решения задачи краткосрочного прогнозирования изменения метеопараметров приземного слоя атмосферы по результатам работы трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы путём включения в её состав нейронной сети, обучаемой на результатах измерений, выполняемых в заданном направлении. Возможность выполнения нейросетевого моделирования метеопараметров обоснована проведением корре-

ляционного анализа результатов СВЧ радиометрических измерений и значений метеопараметров, получаемых с метеостанций, расположенных в угловой области соответствующей угловому сектору главного лепестка диаграммы направленности антенны, полученных ранее при выполнении наклонного СВЧ радиометрического зондирования атмосферы [11–14].

### **Технические вопросы СВЧ радиометрического зондирования атмосферы**

Исходные данные для обучения и тестирования нейронной сети были получены при выполнении измерений радиотеплового излучения приземного слоя атмосферы при больших зенитных углах с помощью трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы. Отличительной особенностью применяемой СВЧ радиометрической системы является выполнение приёма на общую апертуру зеркальной антенны радиусом 2400 мм в трёх частотных диапазонах (с центральными длинами волн 7,5 ГГц, 10 ГГц и 22 ГГц) с последовательной частотной селекцией сигналов в облучателе антенны. Для двух низкочастотных каналов в облучателе реализован приём на двух модах: на моде  $H_{11}$  — на двух поляризациях (вертикальной и горизонтальной) сигналов основного измерительного канала, и на моде  $E_{01}$  — дополнительного канала формирования сигнала компенсации. В алгоритме функционирования системы предусмотрено получение разностных сигналов — основного и дополнительного, что позволяет исключить составляющие, обусловленные приёмом фонового излучения окружающего антенну пространства через область рассеяния диаграммы направленности антенны.

Для каждого из семи каналов (7,5 ГГц и 10 ГГц — основной на вертикальной и горизонтальной поляризации, и дополнительный канал;



**Рис. 1.** Облучатель СВЧ радиометрической системы и комплект приёмно-усилительных блоков (ПУБ): 1 — Генератор шума (ГШ); 2 — ПУБ 7,5 см; 3 — ПУБ 3,2 см; 4 — ПУБ 1,35 см

22 ГГц — основной канал на вертикальной поляризации) сигнал поступает с облучателя на соответствующий приёмно-усилительный блок, состоящий из конвертера спутникового телевидения и малошумящего усилителя, далее через квадратичный детектор на АЦП и компьютер, где формируются массивы данных измерений. На рис. 1 показан облучатель СВЧ радиометрической системы с комплектом приёмно-усилительных блоков.

#### **Исходные данные для обучения и тестирования нейронной сети СВЧ радиометрической системы**

В результате проведённых измерений в 2022–2023 годах были сформированы массивы данных, представляющие собой значения выходных сигналов семи каналов СВЧ радиометрической системы, фиксируемые через 0,1 с на выходе многоканального квадратичного детектора.

Условия проведения полевых измерений определили ограничение на величину зенитного угла. В данном случае его значение было равно

50°, что должно быть учтено, как вид наклонного зондирования.

Для обучения нейронной сети для решения задачи прогнозирования метеопараметров — температуры, влажности и интенсивности осадков приземного слоя атмосферы — были собраны данные с метеостанций в городах, расположенных вблизи наземной проекции линии визирования антенны в пределах 200 км дальности от места базирования СВЧ радиометрической системы (Муром — удаление от места расположения СВЧ радиометрической системы 14,5 км, Выкса — 15,3 км, Касимов — 69 км, Рязань — 173 км). Особенность сбора указанных данных состояла в том, что архивная информация доступна с периодичностью через три часа в сутки, что усложняло процесс подготовки данных измерений, так как требовалась определенная выборка по измеренным значениям с переходом к времени накопления 1 с, а также приводило к существенному уменьшению объёма выборки данных для обучения нейронной сети.

Дата	Время	7,5Г	7,5В	7,5Д	3,2Г	3,2В	3,2Д	1,35Г	T_Мур	O_Мур	B_Мур	T_Вык	O_Вык	B_Вык	T_Кас	O_Кас	B_Кас	T_Ряз	O_Ряз	B_Ряз
29,01	0:00	0,010159	0,011663	0,027875	0,040401	0,058963	0,023172	0,049176	0,42	0,015	0,84	0,42	0	0,84	0,42	0,015	0,86	0,43	0,05	0,91
29,01	3:00	0,008752	0,010226	0,023468	0,056162	0,058208	0,021845	0,044823	0,42	0,045	0,89	0,42	0,045	0,85	0,42	0,035	0,9	0,43	0,02	0,91
29,01	6:00	0,008727	0,010361	0,025019	0,057861	0,059438	0,022353	0,044613	0,42	0,05	0,89	0,42	0,025	0,86	0,42	0,035	0,89	0,44	0,05	0,94
29,01	9:00	0,008534	0,010529	0,024438	0,059156	0,058786	0,021875	0,044322	0,43	0,02	0,85	0,42	0,025	0,86	0,42	0,03	0,88	0,44	0,05	0,93
29,01	12:00	0,007603	0,010742	0,016598	0,059712	0,051398	0,018447	0,04059	0,43	0,02	0,85	0,44	0,025	0,81	0,44	0,015	0,87	0,45	0,05	0,88
29,01	15:00	0,007753	0,011113	0,020476	0,060949	0,054194	0,019851	0,041255	0,44	0,015	0,85	0,44	0,005	0,82	0,44	0,02	0,86	0,46	0,02	0,88
29,01	18:00	0,008057	0,011141	0,024294	0,061143	0,055432	0,020778	0,043322	0,44	0,02	0,9	0,43	0,015	0,93	0,43	0,01	0,89	0,45	0,02	0,94
29,01	21:00	0,008074	0,01119	0,022484	0,060998	0,055314	0,021131	0,043599	0,44	0,045	0,91	0,43	0,035	0,93	0,43	0,005	0,9	0,45	0,01	0,96
1,02	21:00	0,005825	0,010507	0,028862	0,051693	0,042189	0,019908	0,040736	0,48	0	0,67	0,47	0	0,71	0,48	0	0,69	0,49	0,05	0,76
2,02	0:00	0,005601	0,010694	0,025225	0,057475	0,044909	0,020475	0,040651	0,49	0,02	0,71	0,49	0,035	0,68	0,47	0,05	0,88	0,48	0,05	0,95
2,02	3:00	0,005843	0,010809	0,025968	0,054748	0,043356	0,020912	0,041292	0,47	0,05	0,93	0,48	0,05	0,96	0,47	0,065	0,94	0,48	0,015	0,95
2,02	6:00	0,005871	0,010935	0,027002	0,055554	0,0441	0,020063	0,040796	0,48	0,03	0,93	0,48	0,04	0,94	0,48	0,025	0,94	0,47	0	0,97
2,02	9:00	0,005557	0,010975	0,022825	0,053257	0,04118	0,018109	0,040099	0,48	0	0,9	0,49	0	0,91	0,49	0	0,93	0,45	0	0,97

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

Часть выборки данных измерений и данных с метеостанций для обучения нейронной сети трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы показана рис. 2.

Задача работы нейронной сети была сформулирована как задача получения кратковременного прогноза значений метеопараметров приземного слоя атмосферы. В качестве нейронной сети была применена специальная надстройка программы Excel — «Neural Excel» [15], которая позволяет конфигурировать и обучать многослойные нейронные сети непосредственно в программе Microsoft Excel.

### Результаты тестирования нейронной сети трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы

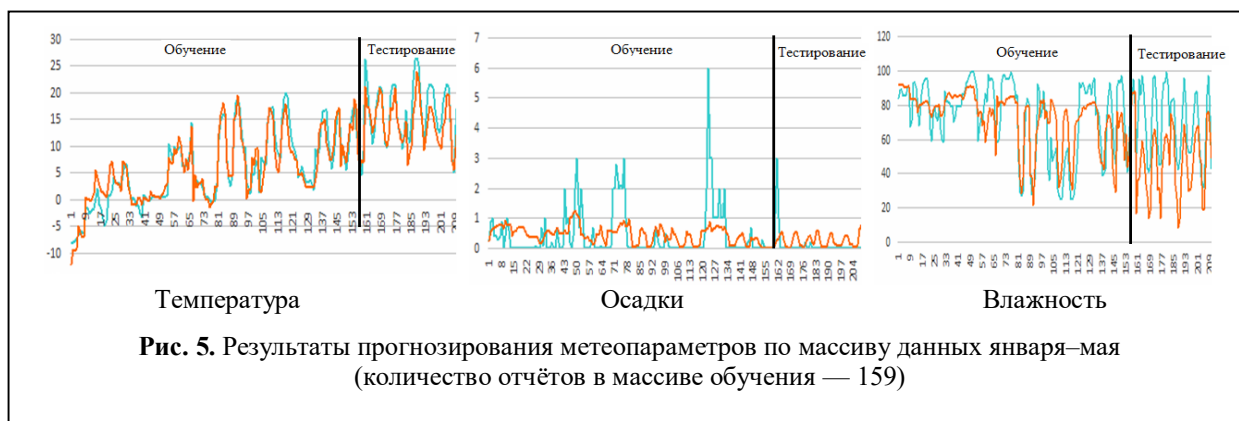
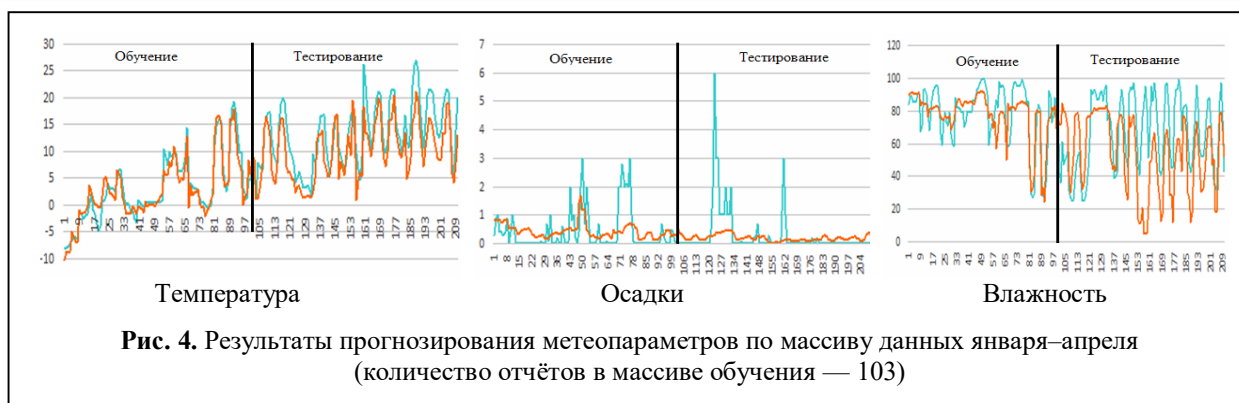
Для обучения нейронной сети были сформированы три массива, соответствующие разной продолжительности последовательности измерений СВЧ радиометрической системы: первый — данные, полученные в январе — марте 2022 года из 39 отчётов, второй — данные, полученные в январе — апреле 2022 года из 103 от-

счётов; третья — данные, полученные в январе — мае 2022 года из 159 отчётов. Для каждой из трёх обученных нейронных сетей было выполнено тестирование на интервале времени от момента завершения обучаемого массива до июля 2023 года.

На рис. 3–5 показаны совместные результаты обучения и тестирования нейронной сети прогнозирования метеопараметров приземного слоя атмосферы, полученные для города Муром и также показаны данные с метеостанции (синяя линия — реальные значения метеопараметров, получаемые с метеостанций; оранжевая линия — результат работы нейронной сети). На каждой диаграмме рис. 3–5 указаны области значений, по которым производилось обучение нейронной сети и тестирование её работы — прогнозирования метеопараметров по данным СВЧ радиометрических измерений.

Для численной оценки результатов работы нейронной сети были рассчитаны средние величины отклонений метеопараметров от их прогнозируемых значений. Результаты расчёта в таблице 1.





Результаты расчёта средних отклонений прогнозируемых значений метеопараметров нейронной сетью по результатам СВЧ радиометрических измерений от их значений, измеренных метеостанциями в городе Муроме, показали, что её величина снижается при увеличении объёма выборки, на которой обучается нейронная сеть при прогнозировании температуры и интенсивности осадков. В случае прогнозирования значений влажности среднее отклонение прогнозируемого значения от регистрируемых в приземном слое атмосферы имеет большие значения и растёт с увеличением объёма

обучаемой выборки. Так, для обучаемой выборки объёмом 39 отсчётов величина отклонения равна 5,7877%, а для объёма 159 — 23,8112%, что может быть объяснено сильной вариативностью значений влажности за полугодовой период наблюдения.

Результаты прогнозирования метеопараметров нейронной сетью были получены и для других указанных городов. На рис. 6 приведены результаты обучения и прогнозирования метеопараметров нейронной сетью, обученной на массиве данных из 159 отсчётов.

Величины средних отклонений метеопара-

**Таблица 1.** Среднее отклонение метеопараметра от прогнозируемого его значения нейронной сетью

Выборка исходных данных	Температура, °С		Интенсивность осадков, мм/час		Влажность, %	
	По обучаемой выборке	По тестируемой выборке	По обучаемой выборке	По тестируемой выборке	По обучаемой выборке	По тестируемой выборке
Январь–март	0,0129	6,0847	0,0031	0,2997	0,011168	5,7877
Январь–апрель	0,2946	3,1811	0,0275	0,091	0,001419	13,4762
Январь–май	0,0008	2,1434	0,0305	0,1602	0,1792	23,8112

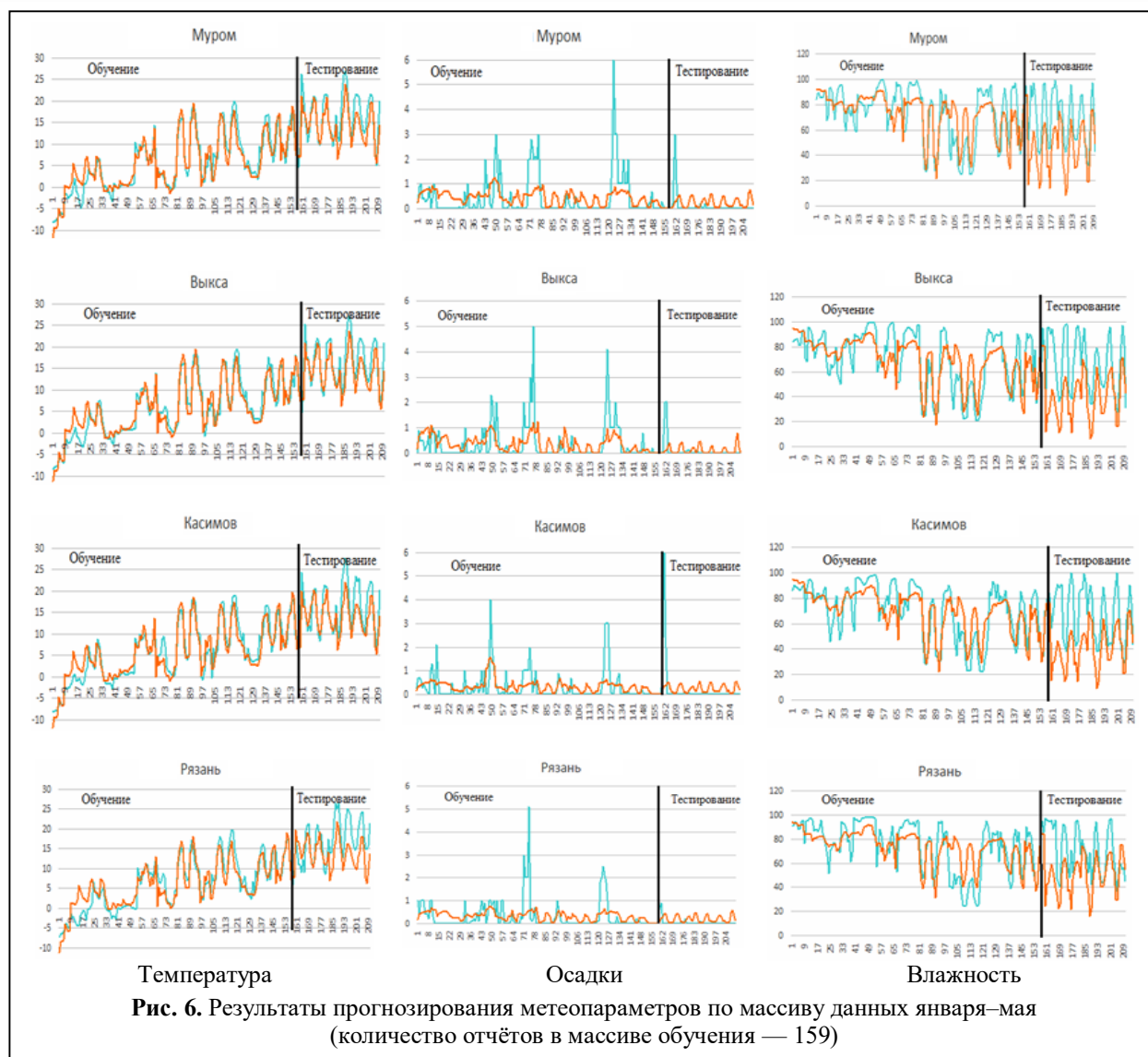


Рис. 6. Результаты прогнозирования метеопараметров по массиву данных января–мая (количество отчётов в массиве обучения — 159)

метров для указанных городов при обучении по выборке данных за январь–май от их прогнозируемых значений приведены в таблице 2.

Анализ приведённых значений средних отклонений метеопараметров, измеренных в приземном слое атмосферы, от их величин прогно-

зируемых нейронной сетью трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы показал, что для температуры и интенсивности осадков в основном наблюдается тенденция к увеличению погрешности прогноза при удалении от места базирования СВЧ радиометрической системы,

Таблица 2. Среднее отклонение метеопараметра от прогнозируемого его значения нейронной сетью в городах Муром, Выкса, Касимов, Рязань

Город	Температура, °С		Интенсивность осадков, мм/час		Влажность, %	
	По обучае-мой выборке	По тестируе-мой выборке	По обучае-мой выборке	По тестируе-мой выборке	По обучае-мой выборке	По тестируе-мой выборке
Муром	0,0008	2,1434	0,0305	0,1602	0,1792	23,8112
Выкса	0,0417	2,2485	0,0136	0,0429	0,0313	27,2489
Касимов	0,0291	2,2975	0,0242	0,0771	0,3572	26,3776
Рязань	0,0334	3,3589	0,0169	0,1718	0,6873	20,0051

причём для температуры средние отклонения метеопараметров для всех городов имеют один порядок — единиц °С, а для интенсивности осадков для близлежащих городов (Выкса и Касимов) величины отклонений отличаются на порядок от их значения для более удалённого города (Рязани). Для среднего отклонения величины влажности порядок значений для всех городов одинаков и существенно превышает среднее отклонение для выборки, на которой выполнялось обучение нейронной сети.

### Заключение

Включение в состав СВЧ радиометрической системы нейронной сети может изменить подход к решению краткосрочного прогнозирования развития метеобстановки, так как в этом случае выполняется оперативное отслеживание изменения состояния атмосферы по результатам СВЧ радиометрических измерений собственного радишумового излучения атмосферы и принятие решения на основе выполненного анализа их связи с величинами метеопараметров зондируемой области. Перспективность такого подхода состоит в возможности непрерывного дообучения нейронной сети путём добавления в обучающий массив новых полученных результатов измерений.

Оценка погрешности нейросетевого прогнозирования при выполнении тестирования её работы выявила влияние сезона года на точность прогнозирования для параметров — влажности и интенсивности осадков, что определяет необходимость дополнительной предварительной подготовки исходных данных с возможной привязкой к сезонам года.

Таким образом, проведённые исследования показали принципиальную возможность включения нейронной сети в состав СВЧ радиометрического комплекса исследования атмосферы для выполнения краткосрочного прогнозирования метеопараметров.

*Исследование выполнено за счёт гранта*

*Российского научного фонда*

*№ 21-19-00378,*

<https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.

### Литература

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 283 с.
2. Кутуза Б.Г., Яковлев О.И., Данильчев М.В. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Монография. М.; Ленанд, 2016. 336 с.
3. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. М.: ФГБУ «ЦАО», 2020. 272 с.
4. 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
5. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4.
6. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем // СПб: Наука и техника, 2003. 380 с.
7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
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.
9. Kalchbrenner 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.html> (дата доступа 15.06.2023).
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., Холодов И.Ю. Корреляционный анализ результатов дистанционного зондирования атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой // В сборнике: Всероссийские открытые Арmandовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2022. С. 290–298.

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

15. Neural Excel / Free Soft [Электронный ресурс]: <https://freesoft.ru/windows/neural-excel> (дата доступа 15.06.2023).

Поступила 20 сентября 2022 г.

English

## NEURAL NETWORK TASKS FOR SHORT-TERM FORECASTING ACCORDING TO RESULTS OF MICROWAVE RADIOMETRIC SOUNDING OF THE ATMOSPHERE

**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>.

**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)

**Elena Anatolyevna Rostokina** — PhD, Associate 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: [rostockina.el@yandex.ru](mailto:rostockina.el@yandex.ru)

**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>.

**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>.

<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 addresses matters of including a neural network in results’ processing procedure of VHF radiometric sounding of the atmosphere for the task of short-term forecasting of status change of the ground layer. There was demonstrated difference between approaches to using data of VHF radiometric remote sensing in major studies of atmospheric processes by solving inverse problems of estimating meteorological parameters and for the task of short-term forecasting of meteorological parameters’ changes in the ground layer in the assigned area as per operation results of tri-band VHF radiometric system by integrating a neural network trained on daily measurements’ results. Information on technical issues of VHF radiometric sounding is presented. It is shown that receiving radiothermal atmospheric radiation was done onto a common aperture of the 2400 mm radius mirror antenna in three frequency bands (7.5 GHz, 10 GHz and 22 GHz central wavelengths) with sequential signal frequency selection of signals in the antenna feed in a two-mode reception to ensure levelling of background noise effect received via dispersive region of the antenna pattern. The features of training neural network are examined to solve the problem of forecasting meteorological parameters - temperature, humidity and precipitation intensity of the ground layer. It is pointed out that to do this, data was collected from weather stations in cities located near the ground projection of antenna sight line within 200 km range from base location of VHF radiometric system. When performing teaching procedure



there were formed three measurement arrays of varying lengths of time for VHF radiometric system with 39, 103 and 159 readings and testing was performed in the time interval from the completion of the training array up to July 2023. There are presented training and testing results of neural network operation for predicting three meteorological parameters - temperature, precipitation intensity and humidity in the specified cities. The results obtained made clear the prospects of incorporating a neural network into VHF radiometric systems for short-term weather forecasts.

**Keywords:** Microwave radiometric system, neural network, short-term forecasting of atmospheric meteorological parameters, neural network training, atmospheric 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. *Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu.* Radioteplolocalion in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
2. *Kutuza B.G., Yakovlev O.I., Danilychev M.V.* Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface. Monograph. Moscow; Lenand, 2016. 336 p.
3. *Kadygrov E.N.* Microwave radiometry of thermal stratification of the atmosphere. Moscow: FGOU "CAO", 2020. 272 p.
4. *Karavaev D.M., Shchukin G.G.* Determination of vapor and liquid droplet moisture content from measurements of microwave radiation of the atmosphere. *Izvestiya Vuzov. Radiofizika.* 2021. Vol. 64. No. 12. Pp. 942–953
5. *Ware R.A.* A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Science.* 2003. Vol. 38. No. 4.
6. *Nazarov A.V., Loskutov A.I.* Neural network algorithms for forecasting and optimization of systems. St. Petersburg: Nauka i tekhnika, 2003. 380 p.
7. *Osovsky S.* Neural networks for information processing. Moscow: Financy i Statistika, 2002. 344 p.
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. DOI: 10.1088/1755-1315/489/1/012031
9. *Kalchbremer 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.html> (Access Date 15.06.2023).
10. *Sharapov R.V.* The use of neural networks for predicting dangerous weather events. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* No. 1. Pp. 78-82.
11. *Karyaev V.V., Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A.* Neural network in the microwave radiometric monitoring system of the atmosphere. *Radio engineering and telecommunication systems.* 2020. No. 4. Pp. 5–14.
12. *Shchukin G.G., Bulkin V.V., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.* Radiometeorological research at the Moscow Institute: passive-active radiometeorological complex. *Radio engineering and telecommunication systems.* 2022. No. 3. Pp. 5–17.
13. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G., Kholodov I.Yu.* Correlation analysis of the results of remote sensing of the atmosphere by a three-band microwave radiometric system. In the collection: All-Russian open Armand readings. Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom, 2022. Pp. 290–298.
14. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G.* Multi-frequency studies of inhomogeneous atmosphere. *Meteorologiya i Gidrologiya.* 2022. No. 12. Pp. 78–87.
15. Neural Excel / Free Soft [Electronic source]: <https://freesoft.ru/windows/neural-excel> (Access Date 15.06.2023).