

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 504.064:004.424.6

doi:10.15356/2076-6734-2016-1-43-51

Оценка водного эквивалента снега по данным пассивного микроволнового сканирования земной поверхности с использованием искусственных нейронных сетей для территории Российской Федерации

© 2016 г. А.А. Волчек*, Д.А. Костюк, Д.О. Петров

Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

*volchak@tut.by

Water equivalent of snow retrieved from data of passive microwave scanning with the use of artificial neural networks over the Russian Federation territory

A.A. Volchek*, D.A. Kostyuk, D.O. Petrov

Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

*volchak@tut.by

Article accepted for publication on May 27, 2015

Keywords: *artificial neural network, microwave remote sensing, snow storage, snow water equivalent.*

Summary

Using of the Chang model for calculation of the snow water equivalent on the basis of measurements of the Earth thermo-microwave radiation by means of scanning polarimeters (SMMR, SSM/I, AMSR-E) from board of orbital satellites does not allow obtaining the accuracy needed hydrological purposes. Low accuracy of the calculations is caused by both simplified character of the mathematical model, and due to significant influence of the surface characteristics (relief, vegetation and complex structure of snow thickness) upon the microwave radiation propagation. This work was aimed at finding a way to increase accuracy of calculations of the snow water equivalent on the Russian Federation territory with its different climate conditions by means of application the neural network approach for processing of results of the passive microwave scanning of the Earth surface. Feed-forward multi-layer artificial neural network was trained by back-propagation algorithm using SSM/I data and results of snow water equivalent *in situ* measurements obtained at 117 meteorological stations during the period from January 1st, 1988 till December 31st, 1988. Validation was performed using data from the same sources collected during 7 years (1992–1998). Results of performed numerical experiments and obtained values of root-mean-square error ($\sigma = 24.9$ мм; $r = 0.39 \pm 0.01$) allow coming to conclusion that the best estimation of water equivalent of a snow cover is provided by artificial neural network using as the input data a set of the SSM/I channels 19.35, 37.0, 85.5 GHz of horizontal and vertical polarizations with meteorological data differentiated by types of the snow survey route.

It is shown that low correlation coefficients (< 0.5) as compared with similar studies on small areas is not caused by the chosen mathematical model and its realization but it is due to a strong diversity of climatic conditions and low density of meteorological stations on the land areas covered by our study. For the purpose of further improvement of quality of the snow water equivalent calculations as for diminution of negative influence of the above factors we propose to use the artificial networks ensemble trained by results of direct measurements grouped according to characteristics of the climate conditions, relief and vegetation.

Статья принята к печати 27 мая 2015 г.

Ключевые слова: *водный эквивалент снежного покрова, искусственная нейронная сеть, микроволновое дистанционное зондирование, снеготпасы.*

Формулируется проблема оценки накопленных снеготпасов на обширных, климатически разнообразных территориях. Предложено использование искусственных нейронных сетей для восстановления водного эквивалента снежного покрова на основе микроволнового спутникового зондирования и опорных данных снегомерных съёмов. Подход апробирован для территории Российской Федерации.

Введение

Снежный покров значительно влияет на климат, рельеф, гидрологические и почвообразовательные процессы, жизнь растений и животных [3, 5]. Наводнения, вызванные таянием снега, во многом определяют хозяйственную деятельность многих регионов. Именно поэтому так важна задача оценки запаса воды, накопленного в снежном покрове. В настоящее время для оценки характеристик снежного покрова используются снегомерные съёмки, достаточно трудоёмкие и дискретные, что затрудняет оперативную оценку снегозапасов, особенно при развитии катастрофических половодий. Так как снежный покров ослабляет радиотепловое излучение от подстилающей земной поверхности, для оперативной оценки состояния снегозапасов уже с 1970-х годов используются методы дистанционного зондирования Земли на основе измерения её радиотеплового излучения при помощи микроволновых сканеров-поляриметров (SSMR, SSM/I, AMSR-E) [6, 14], установленных на борту орбитальных платформ. Степень такого ослабления зависит от частоты излучения, толщины снега, его влажности и размера частиц. Спутники (DMSP F10-F19, AQUA), на борту которых размещены указанные сканеры-поляриметры, выведены на практически круговые полярные солнечно-синхронные орбиты, что позволяет последовательно проходить над всеми участками поверхности Земли приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Каждый спутник совершает в сутки около 14 витков; глобальное покрытие Земли происходит примерно за трое суток, неполное — за сутки.

Постановка проблемы

Используемая в мировой практике методика оценки содержания воды в снежном покрове S основана на модели Чанга [4, 9], уравнение которой для случая SSMR имеет вид

$$S = 4,8(T_{18h} - T_{37h}), \quad (1)$$

где T_{18h} , T_{37h} — радиояркие температуры частотных каналов соответственно 18 и 37 ГГц горизонтальной поляризации; коэффициент 4,8 соответствует плотности снежного покрова $0,30 \text{ г/см}^3$ с размером зерна 0,3 мм.

Сканер SSM/I работает на другом наборе частот, поэтому уравнение (1) для него будет следующим:

$$S = 4,8(T_{19h} - 5 - T_{37h}).$$

Степень покрытия местности лесом при оценке водного эквивалента снежного покрова учитывается путём введения в уравнение дополнительного коэффициента c [11]:

$$c = 1/(1 - f),$$

где f — процент покрытия местности лесом.

Существенный недостаток такого метода оценки снегозапасов — низкое пространственное разрешение (от 12 до 25 км). Кроме того, на точность вычисленных параметров значительно влияют растительность, сложность рельефа, характер снежной толщи [7]. В частности, при помощи микроволнового сканирования нельзя обнаружить снежный покров толщиной менее 15 мм [13]; установлено также, что модель Чанга не позволяет определить водный эквивалент со значениями, превышающими 120 мм [10]. Наконец, к значительным ошибкам определения водного эквивалента приводит наличие воды в снежном покрове (из-за снижения его прозрачности для микроволнового излучения) [17]. В связи с этим для увеличения точности получаемых результатов применяют дополнительные меры, направленные на своевременное обнаружение слоя жидкой воды на поверхности снега. Так, в работе [16] для этой цели предлагается совместное использование и пассивных, и активных средств дистанционного микроволнового зондирования поверхности Земли. В ряде публикаций [12, 18, 19 и др.] в качестве одного из перспективных средств для повышения точности оценки водного эквивалента снежного покрова на основе измеренной радиояркой температуры рекомендуют использовать искусственные нейронные сети — математическую модель поиска связи заданных входных X_i и выходных Y_i параметров (рис. 1) путём обучения на некоторой тестовой выборке. Модель позволяет установить указанную связь на основе многопараметрической нелинейной оптимизации [1].

В перечисленных работах при помощи математического аппарата нейронных сетей оценивалось содержание воды в снеге для относительно небольших территорий с площадью от

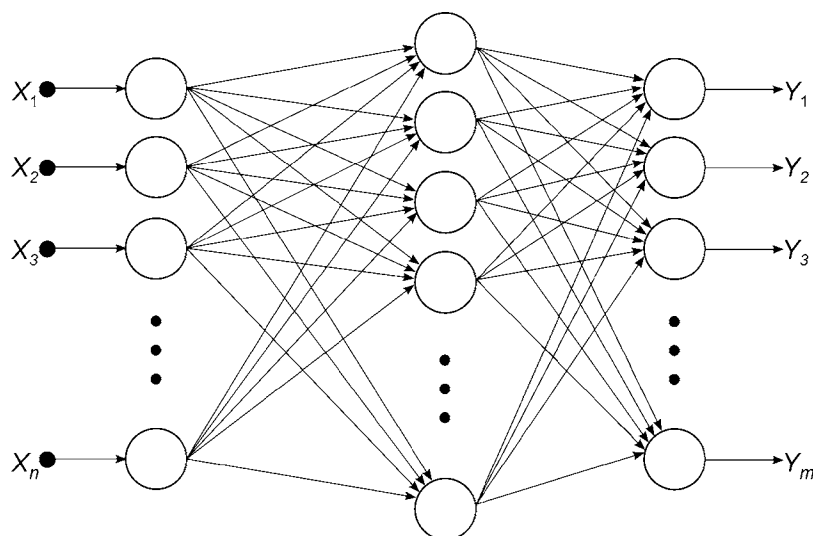


Рис. 1. Структура многослойной нейронной сети
Fig. 1. Structure of a multi-layer neural network

11 500 до 338 430 км² и числом метеорологических станций от 3 до 12. Обучение нейронных сетей проводилось по результатам измерений радиоярких температур микроволновыми сканерами-поляриметрами SSM/I и AMSR-E и непосредственным результатам измерений водного эквивалента по снегомерным маршрутам при температурном режиме, исключающем увлажнение снежного покрова (среднесуточная температура менее 0 °C) [12]. Получены высокие значения коэффициентов линейной корреляции: от 0,8 до 0,9 для AMSR-E и от 0,7 до 0,8 для SSM/I. Отметим, что применение регрессионного анализа даёт в общем случае существенно меньшие значения коэффициентов линейной корреляции [19] — в пределах 0,2–0,3.

Оценка водного эквивалента снежного покрова обширных территорий на основе обработки измеренной радиояркой температуры — достаточно трудная задача ввиду высокой пространственно-временной изменчивости снежного покрова и низкого качества наземной информации, не позволяющих качественно выполнить районирование территории. В исследовании [7] этим комплексом причин обосновывается практическая невозможность достижения точности в оценке толщины снежного покрова и водного эквивалента, пригодной для решения гидрологических задач на территории Российской Федерации в целом, а в работе [8] делаются выводы о невозможности

качественно оценить водный эквивалент на каналах 19 и 37 ГГц для безлесных центральных и полярных районов Европейской части России и о ещё меньшей точности в периоды оттепелей, особенно если они сопровождаются жидкими осадками, которые вызывают образование корки на поверхности снега, практически непроницаемой для микроволнового излучения в тех же частотных каналах. В качестве приемлемых территориальных условий для определения водного эквивалента в работе [8] отмечается, что площадь леса должна составлять не менее 40% территории. Для поиска возможных способов преодоления этих ограничений предлагается обратить внимание на поиск особых регрессионных зависимостей, справедливых для достаточно однородных по климатическим и ландшафтным условиям территорий, на использование более широкого частотного диапазона, а также на различные методы оптической съёмки и экспертных оценок [7, 8].

Цель настоящей работы — оценка возможности повышения точности вычисления водного эквивалента снежного покрова на большой, климатически неоднородной территории путём применения нейросетевого подхода. Территория Российской Федерации ввиду её значительных размеров, географического положения и исключительного разнообразия климатических условий полностью удовлетворяет условиям исследования.

Исходные данные и методы исследования

В процессе исследований использованы данные, полученные с помощью микроволнового сканирующего радиометра-поляриметра SSM/I (Special Sensor Microwave Imager), впервые выведенного на орбиту Земли в интересах Министерства обороны США на борту спутника DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) F-08 в июне 1987 г. Последующие запуски спутников DMSP с указанным радиометром на борту проводились в 1990 (DMSPF-10), 1991 (DMSPF-11), 1995 (DMSPF-13), 1997 (DMSPF-14) и 1999 г. (DMSPF-15). Радиометр-поляриметр SSM/I способен измерять радиояркостную температуру земной поверхности по следующим частотным каналам: 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной/вертикальной поляризации и 22,24 ГГц вертикальной поляризации с пространственным разрешением 25 км (канал 22,24 ГГц вертикальной поляризации обеспечивает пространственное разрешение 12,5 км). Результаты ежедневных измерений радиотеплового излучения земной поверхности с 1987 по 2014 г., выполненных сенсором SSM/I, находятся в свободном доступе на сайте Национального центра обработки данных снега и льда (США). Данные измерений охватывают как Северное, так и Южное полушарие Земли и представлены в виде набора растров размерностью 721×721 пикселя с пространственным разрешением 25 км для каждого из ка-

налов 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной/вертикальной поляризации.

В качестве инструмента для выявления зависимости между результатами микроволнового сканирования покрытых снегом участков земной поверхности и содержанием воды в снежном покрове мы использовали аппарат искусственных нейронных сетей. Обучение и тестирование нейронной сети выполнено на наборе данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР», доступного на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»). Из исходного набора данных отобраны результаты измерений характеристик снежного покрова на 117 метеорологических станциях (рис. 2), географические координаты которых находятся внутри окружностей с диаметром 12,5 км, построенных относительно центров элементов раstra радиояркостных температур.

Результаты исследования

В ходе экспериментов для обучения нейронной сети использовались метеорологические станции с дифференциацией снегомерных маршрутов по ландшафтному признаку: лес, поле и лес/поле.

В первом эксперименте создан и обучен ряд сетей для оценки величины водного эквивалента



Рис. 2. Расположение используемых в исследовании метеорологических станций

Fig. 2. Locations of meteorological stations used in the research

снежного покрова по набору радиочастотных каналов 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной/вертикальной поляризации на снегомерных маршрутах, расположенных исключительно в лесу и исключительно в поле. Используемая в исследовании нейронная сеть представляет собой многослойный персептрон с одним промежуточным слоем (см. рис. 1). Число входных нейронов — от трёх до шести и зависит от набора входных радиочастотных каналов, число нейронов промежуточного слоя — десять, выходной слой содержит один нейрон.

Нейронные сети обучены на наборах непосредственных измерений водного эквивалента на 117 снегомерных маршрутах за интервал времени с 1 января по 31 декабря 1988 г. при помощи метода обратного распространения ошибки [1, 2, 15]. Выбор данных наблюдений за 1988 г. для обучения обусловлен датой запуска спутника DMSP с сенсором SSM/I (июнь 1987 г.). За 1987 г. данные ежедневных измерений радиояркостной температуры поверхности Земли охватывают только семь месяцев, а за 1988 г. данные доступны уже за каждый день 12 месяцев.

Для снижения ошибки восстановления водного эквивалента из обучающих и проверочных выборок исключены подмножества измерений, когда было зафиксировано как наличие ледяной корки и слоя воды на поверхности снега [7], так и содержание воды в снеге более 100 мм [10]. Обученные нейронные сети протестированы на наборах измерений водного эквивалента на соответствующих снегомерных маршрутах за период с 1992 по 1998 г. При использовании в качестве входных данных частотных каналов 19,35; 37,0; 85,5 ГГц исключительно горизонтальной поляризации для лесных снегомерных маршрутов среднеквадратическая ошибка составила 24,65 мм, а коэффициент корреляции $r = 0,317 \pm 0,02$ (рис. 3, а). Замена горизонтальной поляризации на вертикальную понизила значение r до 0,13. Использование же в качестве входных данных частотных каналов всех поляризаций дало повышение r до 0,31. Как видно из рис. 3, б, использование для полевых снегомерных маршрутов в качестве входных данных частотных каналов 19,35; 37,0; 85,5 ГГц обеих поляризаций позволило получить среднеквадратическую ошибку 28,8 мм при $r = 0,32 \pm 0,02$. Использование только вер-

тикальной поляризации снизило значение r до $0,30 \pm 0,02$, а при замене вертикальной поляризации на горизонтальную — до $0,13 \pm 0,02$.

Цель *второго эксперимента* — оценка качества прогнозирования с помощью нейронной сети, обученной на объединённой выборке непосредственных измерений величины водного эквивалента на снегомерных маршрутах как в лесу, так и в поле. Архитектура нейронной сети перенесена из первого эксперимента. Из данных, предназначенных для обучения нейронной сети, исключено подмножество измерений, в ходе которых зафиксировано наличие ледяной корки и слоя воды на поверхности снега. Для обучения использовались данные измерений на всех 117 станциях за 1988 г. Обученная нейронная сеть протестирована на наборе измерений водного эквивалента на соответствующих снегомерных маршрутах за период с 1992 по 1998 г. При использовании частотных каналов 19,35; 37,0; 85,5 ГГц обеих поляризаций среднеквадратическая ошибка определения водного эквивалента составила 24,9 мм, а $r = 0,39 \pm 0,01$ (см. рис. 3, в). Исключение из рассмотрения горизонтальной поляризации понизило значение r до $0,12 \pm 0,01$, а исключение из рассмотрения вертикальной поляризации — до $0,11 \pm 0,01$. Исключение частоты 85,50 ГГц обеих поляризаций повысило значение r до $0,32 \pm 0,01$ при среднеквадратичной ошибке 25,8 мм (см. рис. 3, г).

Заметим, что полученные в обоих экспериментах значения корреляции существенно уступают приведённым в исследованиях [12, 18, 19], где обучение нейронной сети выполнялось по нескольким отдельно взятым снегомерным маршрутам, а тестирование обученной сети — по тому же маршруту, на котором выполнено её обучение. Чтобы убедиться, что меньшая корреляция обусловлена не особенностями реализации, а исходной постановкой задачи (значительные территории, их большое климатическое разнообразие, применение нейронной сети для обобщения данных), мы провели *дополнительный эксперимент*, заключающийся в создании и обучении отдельных сетей для каждого снегомерного маршрута. Обучение и тестирование выполнялись на том же наборе данных, что и в первых двух экспериментах. Нейронные сети, индивидуально обученные для каждого снегомерного маршрута, расположенного в поле, позволили достичь мак-

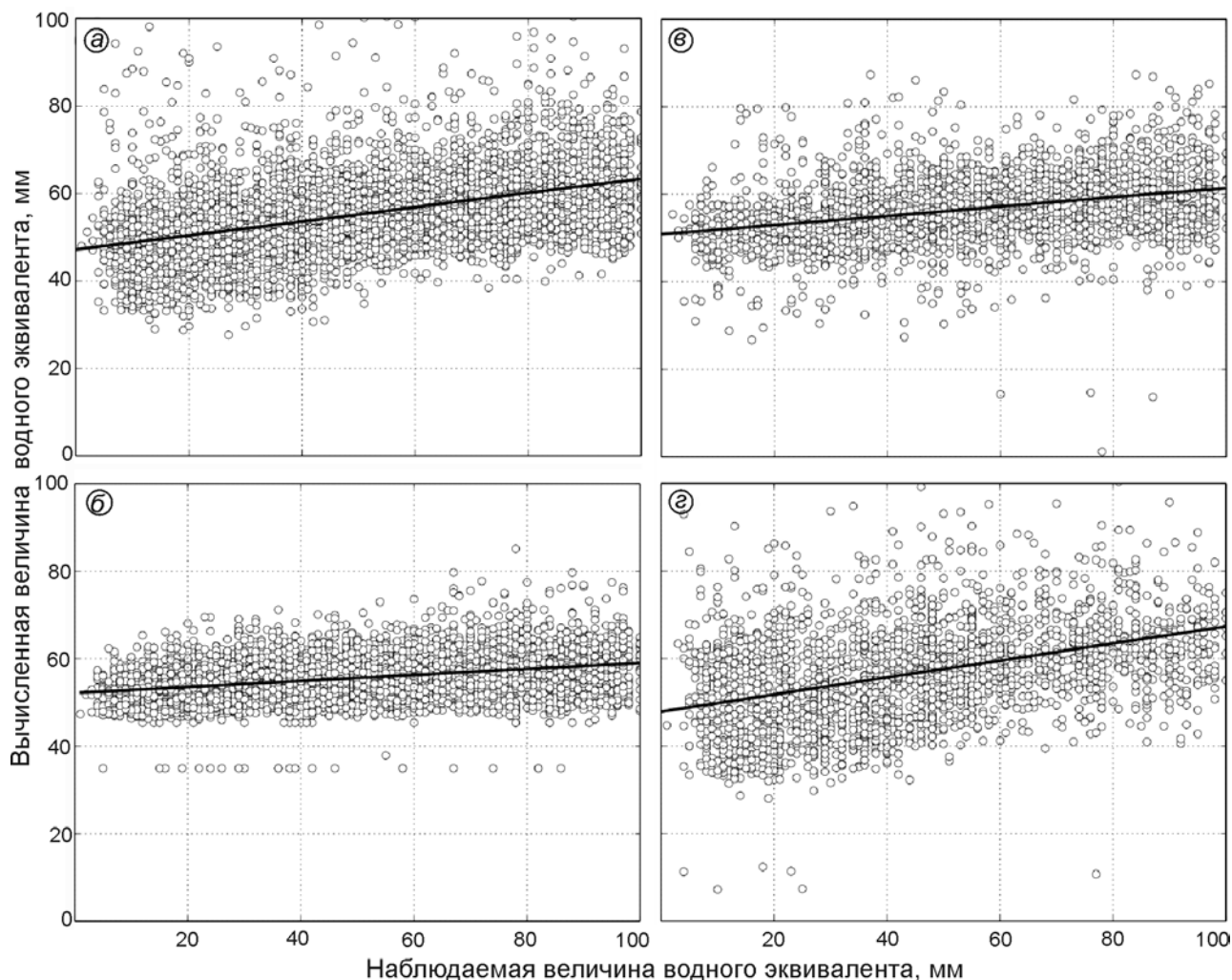


Рис. 3. Результаты тестирования нейронной сети для определения водного эквивалента снежного покрова: *a* – лесные снегомерные маршруты, радиочастотные каналы 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной поляризации: $\sigma = 24,65$ мм, $r = 0,317 \pm 0,02$; *б* – полевые снегомерные маршруты, радиочастотные каналы 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации: $\sigma = 28,8$ мм, $r = 0,32 \pm 0,02$; *в* – лесные и полевые снегомерные маршруты, радиочастотные каналы 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации: $\sigma = 24,9$ мм, $r = 0,39 \pm 0,01$; *г* – лесные и полевые снегомерные маршруты, радиочастотные каналы 19,35; 37,0 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации: $\sigma = 25,8$ мм, $r = 0,32 \pm 0,01$

Fig. 3. Results of neural network testing to determine water equivalent of a snow cover: *a* – forest snow courses, 19,35; 37,0; 85,5 GHz radio-frequency channels at horizontal polarization: $\sigma = 24,65$ mm, $r = 0,317 \pm 0,02$; *б* – field snow courses, 19,35; 37,0; 85,5 GHz radio-frequency channels at horizontal and vertical polarization: $\sigma = 28,8$ mm, $r = 0,32 \pm 0,02$; *в* – forest and field snow courses, 19,35; 37,0, 85,5 GHz radio-frequency channels at horizontal and vertical polarization: $\sigma = 24,9$ mm, $r = 0,39 \pm 0,01$; *г* – forest and field snow courses, 19,35; 37,0 GHz radio-frequency channels at horizontal and vertical polarization: $\sigma = 25,8$ mm, $r = 0,32 \pm 0,01$

симальной величины r равной 0,79 для набора радиочастотных каналов 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной поляризации (см. рис. 4, б).

Согласно мнению, приведённому в работе [7], заведомо низкие значения корреляции по некоторым снегомерным маршрутам объясняются несоответствием результатов в случае частых оттепелей, поскольку мокрый снег

имеет такие же микроволновые свойства, как и поверхность, свободная от снега. В настоящее время на один квадрат раstra (25×25 км) на территории Российской Федерации приходится не более одной метеостанции, что приводит в случае нерепрезентативного расположения снегомерного маршрута к необъективности нейронной сети и не даёт объективной картины.

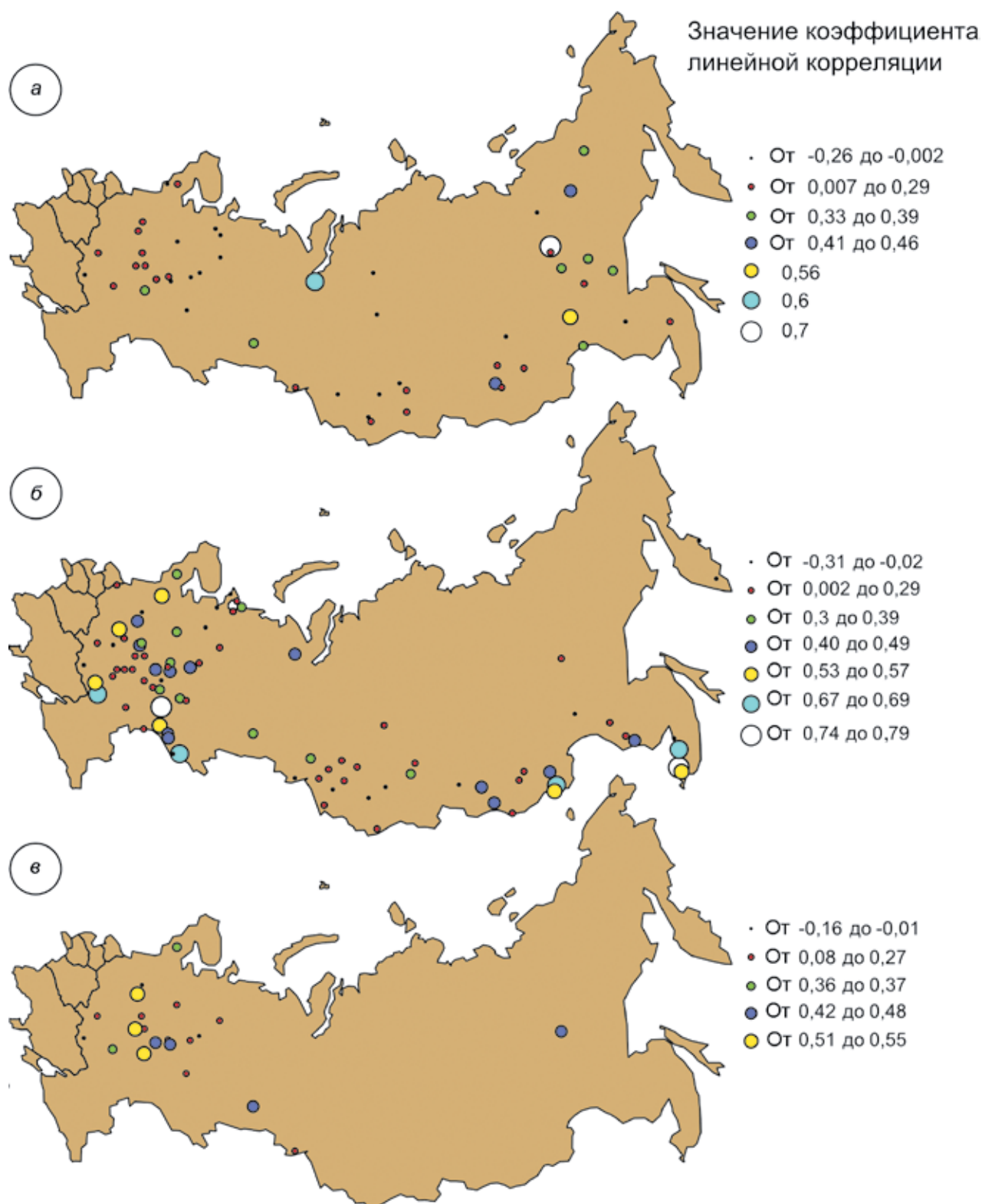


Рис. 4. Расположение метеорологических станций, на которых выполняются лесные (а), полевые (б) снегомерные съёмки либо снегомерные съёмки как в поле, так и в лесу (в) с обозначением диапазонов величин коэффициентов линейной корреляции, достигнутых при тестировании нейронных сетей

Fig. 4. Locations of meteorological stations having forest (a), field (б), or both field and forest (в) snow courses, with specified ranges of the linear correlation factors achieved during the neural networks testing

Обучение нейронных сетей на результатах измерений параметров снежного покрова лесных снегомерных маршрутов позволило достичь максимальной величины r равной 0,7 для набора радиочастотных каналов 19,35; 37,0; 85,50 ГГц горизонтальной/вертикальной поляризации (см. рис. 4, *а*). Для метеорологических станций, на которых снегомерные съёмки выполняются как в лесу, так и в поле, при обучении нейронных сетей удалось получить максимальную величину $r = 0,55$ для набора тех же радиочастотных каналов горизонтальной поляризации (см. рис. 4, *в*). Полученные результаты подтверждают достижимость высоких коэффициентов корреляции, аналогичных полученным в [12, 18, 19]. Отметим, что были опробованы увеличение числа нейронов в промежуточном слое и добавление дополнительных промежуточных слоёв в нейронной сети, однако это существенно не повлияло на точность расчётов.

Заключение

В результате выполненных численных экспериментов, основываясь на полученных величинах среднеквадратичной ошибки и коэффициента корреляции (соответственно $\sigma = 24,9$ мм и $r = 0,39 \pm 0,01$), можно сделать вывод, что лучшую оценку водного эквивалента снежного покрова обеспечивает искусственная нейронная сеть, использующая в качестве входных данных набор радиочастотных каналов 19,35; 37,0; 85,5 ГГц горизонтальной/вертикальной поляризации радиотеплового сенсора SSM/I и дифференциацию по типу снегомерного маршрута лес/поле. Показано, что невысокое значение полученных коэффициентов корреляции (менее 0,5) по сравнению с подобными исследованиями на малых территориях обусловлено не выбранной математической моделью и её реализацией, а особенностями решаемой задачи: значительным разнообразием рельефа местности и климатических условий на охваченной исследованием территории и неравномерностью её покрытия метеорологическими станциями.

Отметим также, что в проведённых экспериментах не учитывались степень покрытия местности лесом, преобладающий состав лесной растительности и приземная температура

воздуха. Вероятно, учёт первого фактора увеличит точность расчёта, так как, во-первых, лесная растительность — причина рассеивания радиоизлучения, отражённого от земной поверхности, и, во-вторых, различия в преобладающем типе лесной растительности значительно влияют на величину накопленных снегозапасов. Температура воздуха позволяет отследить начало процесса таяния снега более точно, чем в настоящем исследовании, и таким образом полностью исключить из рассмотрения участки с повышенным влагосодержанием, поглощающие радиоволны. Для дальнейшего уменьшения неблагоприятного влияния упомянутых негативных факторов и повышения точности определения водного эквивалента в рамках рассмотренного подхода предлагается использование ансамбля нейронных сетей, обученных на результатах измерений, сгруппированных территориально по степени взаимного подобия климатических условий, рельефа, распределения и состава растительного покрова.

Работа выполнена в рамках задания Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций».

Литература

1. Барцев С.И., Охонин В.А. Адаптивные сети обработки информации. Красноярск: изд. Ин-та физики СО АН СССР: Препринт № 59Б, 1986. 20 с.
2. Галушкин А.И. Синтез многослойных систем распознавания образов. М.: Энергия, 1974. 368 с.
3. Горкин А.П. География: Современная иллюстрированная энциклопедия. М.: РОСМЭН, 2006. 624 с.
4. Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Оценка снегозапасов по данным спутниковой информации // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 76–80.
5. Котляков В.М. Избранные сочинения в шести книгах: Книга 2. Снежный покров и ледники Земли. М.: Наука, 2004. 488 с.
6. Митник М.Л., Митник Л.М. Калибровка и валидация данных микроволнового радиометра AMSR-E спутника AQUA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Вып. 2. Т. 1. С. 244–249.
7. Носенко Г.А., Долгих Н.А., Носенко О.А. О возможности практической реализации существующих

- алгоритмов восстановления характеристик снежного покрова по данным микроволновых съемок из космоса для мониторинга водных ресурсов // Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник. Т. II. М.: изд. GRANP polygraph, 2005. С. 150–156.
8. Носенко О.А., Носенко Г.А. Снежный покров Европейской части России в микроволновом диапазоне (AMSR-E и SSM/I) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 2. С. 97–103.
 9. Chang A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Harthline B.K. Snow water equivalent determination by microwave radiometry // Cold Regions Science and Technology. 1982. № 5. P. 259–267.
 10. Chang A.T.C., Foster J.L., Hall D.K. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters // Annals of Glaciology. 1987. № 9. P. 39–44.
 11. Foster J.L., Chang A.T.C., Chang K.H.D. Comparison of snow mass estimates from a prototype passive microwave snow algorithm, a revised algorithm and a snow depth climatology // Remote Sensing of Environment. 1997. № 62. P. 132–142.
 12. Gan T.Y., Kalinga O., Purushottam S. Comparison of snow water equivalent retrieved from SSM/I passive microwave data using artificial neural network, projection pursuit and nonlinear regressions // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. № 5. P. 919–927.
 13. Global snow monitoring for climate research – design justification file. European Space Agency Study Contract Report 21703/08/I-EC Deliverable 1.7, 2010. 246 p.
 14. Hollinger J.P., Pierce J.L., Poes G.A. SSM/I Instrument evaluation // IEEE Trans. Geos. Remote Sensing. 1990. № 28. P. 781–790.
 15. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Internal Representations by Error Propagation // Parallel Distributed Processing: V. 1. Cambridge: MIT Press, 1986. P. 318–362.
 16. Semmens K.A., Ramage J., Bartsch A., Liston G.E. Early snowmelt events: Detection, distribution, and significance in a major sub-arctic watershed // Environmental Research Letters. 2013. V. 8. № 1, art. no. 014020.
 17. Stiles W.H., Ulaby F.T. The active and passive microwave response to snow parameters // Journ. of Geophys. Research. 1980. № 85. P. 1037–1044.
 18. Tedesco M., Pulliainen J., Takala M., Hallikainen M., Pampaloni P. Artificial neural network-based techniques for the retrieval of SWE and snow depth from SSM/I data // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 90. № 1. P. 76–85.
 19. Tong J., Déry S.J., Jackson P.L., Derksen C. Testing snow water equivalent retrieval algorithms for passive microwave remote sensing in an alpine watershed of western Canada // Canadian Journ. of Remote Sensing. 2010. V. 36. Suppl. 1. P. S74–S86.