

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДИЙ

Д.О. ПЕТРОВ

*Учреждение образования "Брестский государственный технический университет"
ул.Московская 267, Брест, 224017, РБ*

Аннотация. Проведен обзор основных факторов, влияющих на прохождение весенних половодий на равнинных реках с преимущественно снеговым питанием. Описан метод определения содержания воды в снежном покрове на основе пассивного микроволнового сканирования земной поверхности радиометрами-поляриметрами с борта ИСЗ. Предложена методика прогнозирования расхода воды в створе реки во время прохождения весенних половодий на основе комплексного анализа при помощи искусственных нейронных сетей гидрометеорологических временных рядов и спутникового мониторинга содержания воды в снежном покрове на водосборной площади реки. Приведены результаты апробации методики в створе р. Припять, расположенного в окрестностях гидрологического поста г. Мозырь.

Ключевые слова: спутниковый радиометрический мониторинг, водный эквивалент снежного покрова, прогнозирование весенних половодий, искусственные нейронные сети.

Abstract. The main driving factors, influencing the spring high water period on the lowland rivers with mainly snowmelt feeding are reviewed. The snow water equivalent assessment method, based on satellite based passive microwave radiometry is described. The method of spring flood river discharge prediction, based on artificial neural network processing of both hydrometeorological and microwave radiometry time series is proposed. The approbation results of the proposed prediction method, which is applied on river Pripyat cross section, situated near Mozyr hydrological station are given.

Keywords: microwave radiometry, snow water equivalent, spring flood water discharge prediction, artificial neural network.

Введение

Прогноз развития наводнений является сложной задачей, требующей учета комплекса различных факторов. В частности, водный режим р. Припять (и ряда других рек, питание которых также относится к смешанному типу с преобладанием снегового) характеризуется длительным весенним половодьем. Поэтому учет динамики накопления снегозапасов позволяет существенно повысить точность прогноза и тем самым эффективнее провести организационно-технические мероприятия по нивелированию последствий наводнения.

Сложность в оценке запасов снега и количества воды в снеге заключается в неравномерности его распределения по водосбору. Наблюдаемые значения толщины снежного покрова и его плотности соответствуют расположению снегомерных ходов. Однако на территории водосбора условия формирования снега не однотипны. Кроме наличия различных типов ландшафтов (болото, лес, пашня) на накопления снега оказывает значительное влияние антропогенная деятельность. В этих условиях видится не целесообразным переносить или даже интерполировать измеренные таким способом значения толщины снежного покрова и его мощности в целом на весь водосбор.

Существующая методика оценки содержания воды в снежном покрове по результатам микроволнового сканирования поверхности Земли

С 70-х годов прошлого века для оперативной оценки состояния снеготазпасов активно используются методы дистанционного зондирования земной поверхности на основе измерения радиотеплового излучения Земли при помощи ряда орбитальных платформ (SSMR, SSM/I, AMSR-E) [1]. Снежный покров обладает способностью ослаблять радиотепловое излучение от подстилающей земной поверхности. Благодаря этому можно вычислить толщину снега и его водный эквивалент на основе таких физических параметров снежного покрова, как плотность снега и размер составляющих его ледяных кристаллов (размер зерна) [2].

Для вычисления водного эквивалента снежного покрова используется эмпирическая регрессионная формула, учитывающая разницу между радиояркими температурами частотных каналов 19 и 37 ГГц горизонтальной поляризации сенсора SSM/I [3]. Существенный недостаток такого метода оценки снеготазпасов – низкое пространственное разрешение (от 12 до 25 км). Кроме того, на точность вычисленных параметров значительно влияют растительность, сложность рельефа, характер снежной толщи [4]. В частности, к невозможности определения водного эквивалента приводит наличие воды на поверхности снежного покрова (из-за поглощения микроволнового излучения) [5].

Оценка влияния снеготазпасов на развитие весеннего половодья

При выполнении исследования использован находящийся в свободном доступе архив наблюдений динамики изменения водного эквивалента на площади северного полушария Земли за период с 1979 г. по 2014 г., созданный в рамках проекта GlobSnow [6]. Данные архива получены путем ассимиляции результатов наблюдений наземных метеорологических станций с измерениями орбитальных пассивных сенсоров микроволнового излучения SSMR и SSM/I. Измерения орбитальных пассивных сенсоров имеет суточную детализацию, в отличие от данных снегомерных съемок, имеющих интервал 5-10 дней. Сам архив представляет собой набор матриц размерностью 721×721 , элементы которых содержат значения усредненной толщины водного эквивалента снежного покрова в миллиметрах. Вершины ячеек матриц спроецированы на поверхность северного полушария Земли при помощи азимутальной равновеликой проекции Ламберта с центром, расположенным на полюсе сферы [7]. Каждая ячейка имеет размеры 25×25 км. Для расчета объема воды в снежном покрове выбраны 208 ячеек матрицы вычисленных значений водного эквивалента, покрывающих площадь 130000 км² на территории водосборной площади р. Припять с расположением замыкающего створа поблизости гидрологического поста наблюдения в г. Мозырь. Для сопоставления с динамикой накопления воды на водосборе использованы измерения ежедневного среднесуточного расхода воды в р. Припять на гидрологическом посту у г. Мозырь, выраженные в кубических метрах в секунду, за промежуток времени с ноября по март каждого года, начиная с 1979 г. и заканчивая 2004 г.

Так как водный эквивалент снежного покрова выражается в миллиметрах толщины слоя воды – объем воды в ячейке вычисляется как произведение величины водного эквивалента и соответствующей площади элемента матрицы. Следовательно – объем воды на водосборной площади, выраженный в кубических километрах, можно получить путем суммирования рассчитанных объемов для в каждой из 208 ячеек.

Используя приведенные соотношения рассчитаны ежедневные величины объема воды в толще снега на исследуемой территории за тот же промежуток времени, что и среднесуточные расходы на гидрологическом посту г. Мозырь.

Проведенное исследование выявило характерные взаимосвязи между процессом таяния снега на водосборной площади и повышением расхода воды в замыкающем створе [8]. Рассчитаны средние, максимальные и минимальные значения величин накопленных величин воды в снеге и расходов воды в замыкающем створе водосборной площади за 26 лет (см. таблицу 1).

Таблица 1. – Минимальные, средние и максимальные значения величин накопления воды в снеге и расходов воды в замыкающем створе водосборной площади

Величины накопления воды в снежном покрове, км ³			Величины расхода воды в замыкающем створе водосборной площади, м ³ /с		
минимальное значение	среднее значение	максимальное значение	минимальное значение	среднее значение	максимальное значение
0	1,4	14,3	79	423,6	4310

Показательно, что даже десятикратное превышение среднего значения величины накопления воды в снежном покрове само по себе не приводит к сравнимому возрастанию расхода воды в контрольной точке русла реки.

С другой стороны, в 1999 году воды в снеге на водосборной площади накопилось в пять раз выше среднего значения и в промежуток времени с 5 февраля по 26 марта началось интенсивное таяние снежного покрова сопровождаемое выпадением значительного количества осадков (от 110% до 255% нормы), что привело к катастрофическому повышению расхода воды в замыкающем створе у г. Мозырь (максимальный расход воды превысил среднее значение в 7,7 раз). Процесс интенсивного таяния снежного покрова совместно с выпадением осадков отчетливо виден в выделенной области графика на рисунке -а благодаря тому, что микроволновое излучение полностью поглощается образовавшимся на поверхности слоем воды (рассчитанное значение величины накопленного объема воды 05.02.1999 скачком падает до нуля, сохраняется в течение 50 дней, а затем 26.03.1999 также скачком принимает положительное значение).

По результатам проведенного анализа можно констатировать, что использование результатов дистанционного микроволнового сканирования поверхности Земли позволяет оперативно контролировать суточную динамику величины водного эквивалента снежного покрова на значительных территориях, однако количественное восстановление соответствующей весенней динамики расхода воды на контрольной измерительной гидрологической станции требует учета таких важных факторов, как наличие и объем осадков во время весеннего таяния снега, а также впитывание почвой выделившейся из снега воды [8].

Методика выполнения комплексного прогноза

Ряд источников сходится во мнении, одним из наиболее эффективных инструментов для анализа таких нелинейных и многофакторных зависимостей, как гидрологические временные ряды, является механизм многослойных ИНС с прямым распространением сигнала. В частности, [9] иллюстрируют преимущества такого подхода по сравнению с авторегрессионной интегрированной моделью скользящего среднего, известной также как метод Бокса-Дженкинса. Поэтому для прогнозирования значений расхода воды в створе реки в рамках настоящего исследования были выбраны нейросетевые механизмы.

Для выполнения прогноза значений расхода воды вплоть до максимальных во время прохождения высоких весенних половодий было решено использовать ИНС, одновременно обрабатывающую методом скользящего окна значения двух временных рядов: среднесуточных расходов воды, зарегистрированных на гидрологическом посту наблюдения, и суммарных величин накопления воды в снежном покрове на исследуемой водосборной площади. В силу ограниченности данных, получаемых непосредственными промерами снежного покрова, было принято решение воспользоваться результатами ежедневной оценки содержания воды в снежном покрове на основе пассивного радиотеплового сканирования поверхности водосборной площади с борта ИСЗ.

При значительном впитывании почвой воды, выделяющейся в результате таяния снега, наблюдаются т. н. малые половодья. В этом случае не наблюдается существенной зависимости

расхода воды в створе от накопленных снеготазов; поэтому при прогнозировании явлений данного класса данные о накопленных снеготазов было решено не учитывать. Признаком, по которому можно заблаговременно определить, что предстоит не малое, а высокое половодье, является выпадение осадков осенью с последующим зимним промерзанием почвы (т. е. значительным снижением ее инфильтрационной способности).

В случае отсутствия доступа к результатам микроволнового сканирования поверхности водосбора (например, из-за неисправности оборудования на борту ИСЗ) ИНС может выполнять прогноз высоких половодий по единственному временному ряду. Реальным примером ограниченной доступности таких данных является зарегистрированная 05.04.2016 и сохраняющаяся по сей день техническая неисправность канала 37 ГГц вертикальной поляризации сенсора SSMIS, размещенного на спутнике DMSP F-17 [10].

Благодаря тому, что микроволновое излучение, регистрируемое орбитальным комплексом датчиков, полностью поглощается слоем воды в толще либо на поверхности снега (появившейся в результате таяния и/или выпадения осадков), оказывается возможным надежное и своевременное выявление момента начала интенсивного таяния снежного покрова. Поэтому при учете суммарных величин накопления воды в снежном покрове было решено применить ступенчатый фильтр, приводящий к единице все значения, отличные от нуля и предшествующие моменту поглощения микроволнового излучения слоем воды. В результате формируется сигнал начала интенсивного снеготаяния, используемый ИНС прогнозирования высоких половодий.

Предлагаемая методика предназначена для прогнозирования среднесуточного расхода воды на выбранном створе реки во время прохождения как высоких весенних половодий, приводящих к возникновению наводнений, так и малых весенних половодий. Определение предполагаемой категории ожидаемого половодья основывается на результатах предварительного учета количества выпавших осенних осадков за период октябрь-ноябрь и доли дней с отрицательной среднесуточной температурой воздуха за период декабрь-январь. Необходимые характерные значения учитываемых величин определяются на основе анализа метеорологических временных рядов, накопленных за соответствующие промежутки времени, непосредственно предшествующие зарегистрированным высоким половодьям.

Для повышения качества прогнозирования в случае высоких половодий, дополнительно к учету методом скользящего окна предыдущих значений расхода воды выполняется также учет момента начала интенсивного таяния снега на основе обработки результатов пассивного микроволнового сканирования поверхности водосбора. На случай временного сбоя в функционировании оборудования ИСЗ, на гидрометеорологических данных, характерных для высоких половодий, обучаются две ИНС: первая из них предполагает одновременный учет двух временных рядов, а вторая работает с единственным временным рядом. В случае, когда данные об осенних осадках и зимних среднесуточных температурах свидетельствуют о предстоящем малом половодье, для прогнозирования используется третья ИНС, обученная на гидрологических данных, характерных для малых половодий.

Размер скользящего окна для обработки входных данных определяется эмпирическим путем с целью минимизации ошибки обученной нейронной сети на тестовой выборке. Тестовая выборка должна охватывать период, включающий момент пика среднесуточного расхода воды – самого позднего из зарегистрированных во время весенних половодий на выбранном створе реки.

Размер горизонта прогнозирования должен соответствовать заблаговременности среднесрочного метеорологического прогноза (от 7 до 10 суток) [11]. Для оценки характера спада воды при достижении пика половодья рекомендуется выполнять также прогноз нисходящей ветви гидрографа (не более чем на удвоенную величину горизонта прогнозирования). Размер скользящего окна для обработки входных данных определяется эмпирическим путем с целью минимизации ошибки обученной нейронной сети на тестовой выборке. Тестовая выборка должна охватывать период, включающий момент пика среднесуточного расхода воды – самого позднего из зарегистрированных во время весенних половодий на выбранном створе реки.

Для оценки характера спада воды при достижении пика половодья рекомендуется выполнять также прогноз нисходящей ветви гидрографа (не более чем на удвоенную величину горизонта прогнозирования).

Апробация методики прогнозирования в створе р. Припять, расположенного на гидрологическом посту наблюдения г. Мозырь

Для целей апробации методики прогнозирования использован находящийся в открытом доступе архив зарегистрированных метеорологическими станциями среднесуточных температур воздуха и величин выпавших осадков на территории Европы с 1978 г. по 2005 г., предоставляемый международным проектом ECA&D (Europe Climate Assessment & Dataset) [12]. Временные ряды измерений расхода воды на гидрологическом посту наблюдения г. Мозырь (р. Припять) с 1978 г. по 2005 г. получены из архива Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (РУП «Белгидромет»). Источником значений ежедневной оценки содержания воды в снежном покрове на основе пассивного радиотеплового сканирования земной поверхности за промежутки времени с 1979 г. по 2005 г. послужил архив проекта GlobSnow [6].

В 1979 и 1999 году произошли катастрофические половодья с максимальным расходом воды по гидропосту г. Мозырь в $4300 \text{ м}^3/\text{с}$ и $3270 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Для 1999 года характерен продолжительный период интенсивного таяния снега, сопровождаемый выпадением значительного количества осадков (110 — 255% нормы) в течение 51 дня. Следует отметить, что временной интервал между началом интенсивного таяния снега 05.02.1999 и достижением расхода воды максимальной величины на гидрологическом посту наблюдения 29.03.1999 составил 53 дня.

Анализ временных рядов среднесуточной температуры воздуха за период с 1968 г. по 2005 г. также позволил особо отметить зимние месяцы 1978 – 1979 гг. и 1998 – 1999 гг., предшествующие весеннему половодью. В данные годы за период с декабря по январь для более чем 80% дней была зарегистрирована отрицательная температура на водосборной площади р. Припять с замыкающим створом в г. Мозырь, причем за период с октября по ноябрь в 1978 г. на исследуемой территории выпало 58,56 мм осадков, а в 1998 г. за тот же промежуток времени – 120,54 мм. Эти наблюдения согласуются с тем фактом, что причиной высоких половодий часто становится промерзание почвы на водосборе, значительно уменьшающее ее инфильтрационную способность при интенсивном весеннем таянии снега и выпадении осадков [13, с. 78 – 79].

Было выполнено нормирование значений всех используемых в исследовании временных рядов зарегистрированных расходов воды в замыкающем створе водосборной площади: в качестве единичного значения была выбрана максимальная величина расхода воды, равная $4310 \text{ м}^3/\text{с}$ (зарегистрирована 09.04.1979 на гидрологическом посту наблюдения г. Мозырь). Затем временные ряды зарегистрированных расходов воды были совмещены по пиковым значениям весенних половодий. Значения временных рядов, следующие за пиком половодья, были ограничены 14 элементами, а предшествующий промежуток для малых половодий расширен до 119 элементов (число выбрано с опорой на самый поздний за 27 лет наблюдений срок достижения максимума расхода воды, имевший место 28.04.1996). Для высоких половодий промежуток соответствующих временных рядов, предшествующий достижению максимального значения, расширен до 98 элементов согласно сроку наступления пика половодья, в 1979 г.

Необходимо заметить, что в архиве проекта GlobSnow ежедневные оценки величины водного эквивалента содержатся не за все годы: так, зима 1978 – 1979 гг. представлена исключительно среднемесячными величинами водного эквивалента снежного покрова, и такие усредненные данные не позволяют выделить признак интенсивного снеготаяния с требуемой точностью. На основе доступных ежедневных данных оценки водного эквивалента снежного

покрова за зимне-весенний период с 1998 г. по 1999 г. сформирован сигнал начала интенсивного таяния снега, сопровождаемого выпадением значительного количества осадков.

При формировании наборов данных для прогнозирования высоких половодий в качестве базового срока регистрации интенсивного таяния снега был выбран срок в 53 дня, с учетом времени достижения пика высокого весеннего половодья, случившегося в 1999 г.

В качестве архитектуры ИНС был выбран многослойный персептрон с одним скрытым слоем и симметричной сигмоидной функцией активации нейронов в скрытом и выходном слоях и линейной функцией активации во входном слое. В соответствии с избранной функцией активации, элементы обучающих и тестирующих выборок масштабированы в диапазон $[-1, 1]$.

В соответствии с принятыми решениями по архитектуре ИНС и способу прогнозирования временного ряда, для различных классов половодий эмпирическим путем была подобрана следующие структуры слоев:

- для высоких половодий размер скользящего окна составил 46 дней, поэтому входной слой представлен 92 нейронами по причине использования двух разных наборов данных, промежуточный – 184 нейронами и согласно избранному горизонту прогнозирования в 7 дней в выходном слое находится семь нейронов, общее число синаптических связей – 18216;
- для малых половодий используется тот же самый размер скользящего окна и шага прогнозирования, поэтому персептрон имеет 46 нейронов во входном слое, 92 – в промежуточном и 7 нейронов в выходном слое, общее число синаптических связей – 4876;
- в качестве альтернативного варианта прогнозирования высоких половодий было решено исследовать возможность использования той-же самой структуры ИНС, как и при прогнозировании малых половодий, которая не предусматривает дополнительного учета временного ряда изменения водного эквивалента снежного покрова.

В целях недопущения снижения обобщающей способности нейронных сетей для обучения использовались наборы данных с количеством образцов в два раза превышающим количество синаптических связей: 36402 и 9752 для ИНС прогнозирования высоких и малых половодий соответственно. Для обеспечения заявленного количества образцов в обучающих выборках наблюдаемые гидрографы были дополнены промежуточными, вычисленными методом линейной интерполяции значений между соседними парами временных рядов зарегистрированных в разные годы на гидрологическом посту наблюдения расходов воды.

Для учета возможных расхождений в сроках наступления интенсивного таяния снега, набор соответствующих сигналов, входящих в состав обучающей выборки ИНС прогнозирования высоких половодий, был сформирован путем смещения в обе стороны относительно базового срока в 53 дня момента наступления характерного перепада значений на произвольно выбираемое, но не превышающее по абсолютной величине 3, число дней, что составляет половину горизонта прогнозирования.

Набор ИНС был обучен методом Resilient Propagation (RPROP), что позволило сократить время, требуемое на обучение, по сравнению с стандартным методом обратного распространения ошибки [14]. В целях исключения эффекта переобучения ИНС, остановка процесса обучения производилась при обнаружении роста среднеквадратичной ошибки нейронной сети на тестовой выборке при дальнейшем наблюдении снижения ошибки на обучающей выборке. Для оценки адекватности прогнозирования обученными ИНС расхода воды в створе реки применялось вычисление величины коэффициент корреляции Пирсона r и квадратного корня из среднеквадратичной ошибки RMSE на тестовой выборке (таблица 2).

Таблица 2. – Оценка качества прогноза расхода воды по гидрологическому посту г. Мозырь для разных категорий весеннего половодья.

Категория половодья	Учет начала таяния снега	Коэффициент корреляции Пирсона, r	Квадратный корень из среднеквадратичной ошибки, $RMSE$
Высокое половодье	да	0,99	0,02
	нет	0,94	0,06
Низкое половодье	нет	0,79	0,06

Заключение

Согласно приведенным результатам апробации предложенной методики на створе р. Припять, комплексный анализ искусственной нейронной сетью гидрометеорологических временных рядов и сигнала начала интенсивного таяния снежного покрова, полученного при помощи спутниковой СВЧ-радиометрии, позволяет повысить качество прогнозирования восходящей ветви гидрографа высоких весенних половодий по сравнению с использованием в качестве входных данных исключительно гидрометеорологической информации, полученной в результате непосредственных измерений на местности.

Список литературы

1. Шарков, Е.А. Пассивное микроволновое зондирование земли: прошлое, настоящее и планы на будущее // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – В. 1. – Т. 1. – С. 70–80.
2. Узлов, В.А., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Основные физические параметры снежного покрова / В.А. Узлов, // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. П.Е. Алексеева. – 2014. – Т. 103. – № 1. – С. 119–129.
3. Chang, A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Hartline B.K. Snow water equivalent determination by microwave radiometry // Cold Regions Science and Technology. – 1982. – № 5. – P. 259–267.
4. 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. – М.: изд. GRANP polygraph, 2005. – Т. II. – С.150–156.
5. 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.
6. Stiles, W.H., Ulaby F.T. The active and passive microwave response to snow parameters // Journ. of Geophys. Research. – 1980. – № 85. – P. 1037–1044.
7. Luoju K., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L. Snow Water Equivalent (SWE) product guide // GlobSnow Consortium [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://www.globsnow.info/swe/GlobSnow_SWE_product_readme_v1.0a.pdf. – Дата доступа: 08.06.2016.
8. Петров, Д.О. Программный модуль анализа накопления снега для системы мониторинга и прогнозирования паводка // Вестник БрГТУ. – 2014. – № 2(86): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 134–137.
9. Tang, Z., Fishwick P. A. Feedforward neural nets as models for time series forecasting //ORSA journal on computing. – 1993. – V. 5. – №. 4. – P. 374–385.
10. Brodzik, M. J., Armstrong R. Near-Real-Time DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures, Version 1. // USA NASA DAAC National Snow and Ice Data Center [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0342/versions/1#>. – Дата доступа: 18.11.2017.
11. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования // ВМО. – 2012. – № 485. – Т. 1 : Глобальные аспекты. – 204 с.
12. Data Policy for ECA&D and E-OBS // European Climate Assessment and Dataset [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://http://eca.knmi.nl/documents/ECAD_datapolicy.pdf. – Дата доступа: 08.06.2016.
13. Волчек А.А., Пойта П.С., Шведовский П.В. Мониторинг, оценка и прогноз чрезвычайных ситуаций и их последствий – Брест : Альтернатива, 2012. – 426 с.

14. Riedmiller, M. Advanced supervised learning in multi-layer perceptrons—from backpropagation to adaptive learning algorithms //Computer Standards & Interfaces. – 1994. – V. 16. – №. 3. – P. 265-278.

References

1. Sharkov, E.A. Passivnoe mikrovolnovoe zondirovanie zemli: proshloe, nastoyaschee i planyi na budushee // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2004. – V. 1. – P. 70–80.
2. Uzlov, V.A., Shishkov G.I., Scherbakov V.V. Osnovnyie fizicheskie parametry snezhnogo pokrova / V.A. Uzlov, // Tr. Nizhegorodskogo gos. tehn. un-ta im. R.E. Alekseeva. – 2014. – T. 103. – N 1. – P. 119–129.
3. Chang, A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Hartline B.K. Snow water equivalent determination by microwave radiometry // Cold Regions Science and Technology. – 1982. – № 5. – P. 259–267.
4. Nosenko, G.A., Dolgih N.A., Nosenko O.A. O vozmozhnosti prakticheskoy realizacii sushhestvujushhih algoritmov vosstanovleniya harakteristik snezhnogo pokrova po dannym mikrovolnovyh s#emok iz kosmosa dlja monitoringa vodnyh resursov // Fizicheskie osnovy, metody i tehnologii monitoringa okruzhajushhej sredy, potencial'no opasnyh javlenij i ob#ektov: Sbornik. – M.: izd. GRANP polygraph, 2005. – V. II. – P.150–156.
5. 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.
6. Stiles, W.H., Ulaby F.T. The active and passive microwave response to snow parameters // Journ. of Geophys. Research. – 1980. – № 85. – P. 1037–1044.
7. Luoju K., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L. Snow Water Equivalent (SWE) product guide // GlobSnow Consortium [Jelektronnyj resurs]. – 2010. – Rezhim dostupa : http://www.globsnow.info/swe/GlobSnow_SWE_product_readme_v1.0a.pdf. – Data dostupa : 08.06.2016.
8. Petrov, D.O. Programmnyj modul' analiza nakopleniya snega dlja sistemy monitoringa i prognozirovaniya pavodka // Vestnik BrGTU. – 2014. – № 2(86): Vodohozhajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geojekologija. – P. 134–137.
9. Tang, Z., Fishwick P. A. Feedforward neural nets as models for time series forecasting //ORSA journal on computing.. – 1993. – V. 5. – №. 4. – P. 374–385.
10. Brodzik, M. J., Armstrong R. Near-Real-Time DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures, Version 1. // USA NASA DAAC National Snow and Ice Data Center [Jelektronnyj resurs]. – 2017. – Rezhim dostupa : <https://nsidc.org/data/NSIDC-0342/versions/1#>. – Data dostupa : 18.11.2017.
11. Nastavlenie po Global'noj sisteme obrabotki dannyh i prognozirovaniya // VMO. – 2012. – № 485. – T. 1 : Global'nye aspekty. – 204 s.
12. Data Policy for ECA&D and E-OBS // European Climate Assessment and Dataset [Jelektronnyj resurs]. – 2012. – Rezhim dostupa : http://http://eca.knmi.nl/documents/ECAD_datapolicy.pdf. – Data dostupa : 08.06.2016.
13. Volchek A.A., Pojta P.S., Shvedovskij P.V. Monitoring, ocenka i prognoz chrezvychajnyh situacij i ih posledstvij – Brest : Al'ternativa, 2012. – 426 s.
14. Riedmiller, M. Advanced supervised learning in multi-layer perceptrons—from backpropagation to adaptive learning algorithms //Computer Standards & Interfaces. – 1994. – V. 16. – №. 3. – P. 265-278.

Сведения об авторах

Петров Д. О., магистр технических наук, старший преподаватель УО «Брестский государственный технический университет»

Адрес для корреспонденции

224017, РБ, г. Брест, ул. Московская, д. 267, тел. +375295238723, e-mail: polegdo@gmail.com
Петров Дмитрий Олегович

Information about the authors

Petrov D. O., Master of Engineering Sciences, senior lecturer, Brest State Technical University

Address for correspondence

224017, Belarus, Brest, Moskovskaya str, 267, Brest State Technical University, tel. +375295238723, e-mail: polegdo@gmail.com
Petrov Dmitry Olegovich