

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **22811**

(13) **С1**

(46) **2019.12.30**

(51) МПК

G 06N 3/02 (2006.01)

(54) СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕСУТОЧНОГО РАСХОДА ВОДЫ ПРИ ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДЬЯХ В СТВОРЕ РЕКИ

(21) Номер заявки: а 20180213

(22) 2018.05.28

(43) 2018.12.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ)

(72) Авторы: Петров Дмитрий Олегович; Волчек Александр Александрович; Костюк Дмитрий Александрович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ)

(56) ПЕТРОВ Д.О. Мониторинг техногенных и природных объектов: Сб. материалов междунар. научн.-техн. конф. - Минск: БГУИР, 2017. - С. 35-42.

RU 2279699 С2, 2006.

CN 101634721 А, 2010.

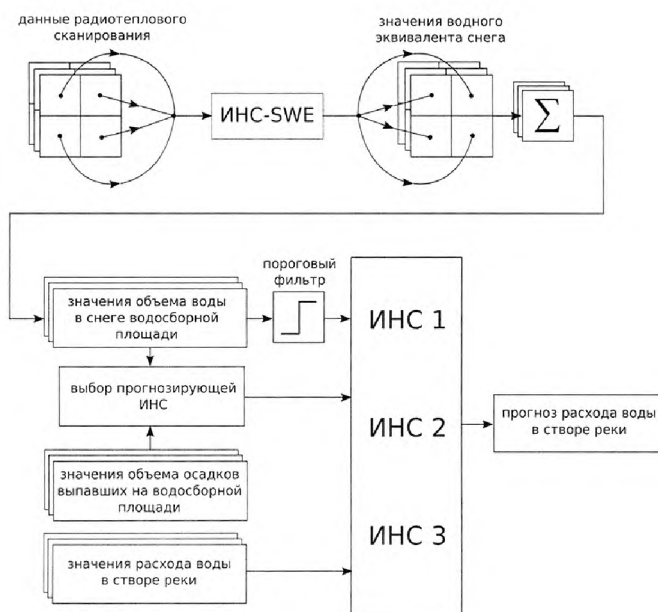
CN 106371155 А, 2017.

CN 106650767 А, 2017.

СЕМЕНЧИН Е.А. и др. Фундаментальные исследования. - 2014. - № 12. - С. 952-957.

(57)

1. Способ прогнозирования среднесуточного расхода воды при весенних половодьях в створе реки, при котором используют каскадное соединение двухслойной персептронной сети (ИНС-SWE) и набор из трех прогнозирующих двухслойных персептронных сетей; в качестве входного вектора ИНС-SWE используют радиояркостные температуры земной поверхности набора радиочастотных каналов, причем радиояркостные температуры измеряют посредством сканера-полярметра, расположенного на борту искусственного спутника Земли; представляют значения радиояркостных температур в виде набора прямоугольных



ВУ 22811 С1 2019.12.30

матриц для каждого радиочастотного канала, отбирают из указанных матриц множество элементов, покрывающих площадь водосбора наблюдаемой реки; вычисляют посредством ИНС-SWE величины водного эквивалента снежного покрова для каждого из элементов матрицы, покрывающих площадь водосбора, используют при этом соответствующие значения радиоярких температур, суммируют вычисленные величины водного эквивалента; при учете суммарных величин накопления воды в снежном покрове применяют пороговый фильтр, приводящий к единице все значения, отличные от нуля и предшествующие моменту поглощения микроволнового излучения земной поверхности слоем жидкой воды; осуществляют прогнозирование среднесуточных расходов воды в створе наблюдаемой реки посредством набора из трех независимых двухслойных персептронных сетей методом скользящего окна, причем первую двухслойную персептронную сеть (ИНС-1) используют для прогнозирования расходов воды во время прохождения половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, при наличии доступа к значениям радиоярких температур земной поверхности на водосборе наблюдаемой реки, вторую двухслойную персептронную сеть (ИНС-2) используют для прогнозирования расходов воды во время прохождения половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, при отсутствии доступа к значениям радиоярких температур земной поверхности, третью двухслойную персептронную сеть (ИНС-3) используют для прогнозирования расходов воды во время прохождения половодий, приводящих к возникновению низких наводнений; на вход ИНС-1 подают временной ряд расхода воды в контрольном створе наблюдаемой реки и временной ряд изменения водного эквивалента снежного покрова; на входы ИНС-2 и ИНС-3 подают только временной ряд расхода воды в контрольном створе наблюдаемой реки; на выходе каждой из указанных прогнозирующих двухслойных персептронных сетей получают прогнозируемые величины расхода воды, при этом количество выходных нейронов каждой из указанных прогнозирующих двухслойных персептронных сетей выбирают равным размеру горизонта прогнозирования, выраженному в сутках; обучение ИНС-SWE проводят на основе ежесуточных данных измерений водного эквивалента снежного покрова на метеорологических станциях и значений и соответствующих им измерений радиотеплового излучения земной поверхности за промежуток времени не менее 30 лет; обучение ИНС-1 проводят на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в створе наблюдаемой реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, и соответствующих им данных расчета суммарного накопления воды в снежном покрове, обработанных при помощи порогового фильтра, за промежуток времени не менее 30 лет; обучение ИНС-2 проводят на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в створе наблюдаемой реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, за промежуток времени не менее 30 лет; обучение ИНС-3 проводят на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в наблюдаемом створе реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению низких наводнений, за промежуток времени не менее 30 лет.

2. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что в качестве входного вектора ИНС-SWE применяют радиояркие температуры земной поверхности набора радиочастотных каналов 19,35, 37,0, 85,5 ГГц горизонтальной поляризации и 19,35, 37,0, 85,5 ГГц вертикальной поляризации микроволнового сканера-поляриметра SSMIS, расположенного на борту искусственного спутника Земли DMSP 5D-3/F17; при этом используют промежуточный слой ИНС-SWE, состоящий из 10 нейронов, и выходной слой, содержащий 1 нейрон, в качестве функции активации нейронов в промежуточном слое используют гиперболический тангенс, а в выходном слое используют линейную функцию; измерения радиотеплового излучения земной поверхности выполняют посредством сенсоров SSM/I и SSMIS.

3. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что применяют размер горизонта прогнозирования, соответствующий краткосрочному гидрологическому прогнозу с заблаговременностью в 7 суток.

4. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что размер скользящего окна для ИНС-1 и ИНС-2 выбирают равным 23 суткам, а для ИНС-3 - 46 суткам; количество нейронов промежуточного слоя ИНС-1, ИНС-2 и ИНС-3 равно 46, 23 и 46 соответственно, в качестве функции активации нейронов в скрытом и выходном слоях указанных нейронных сетей используют гиперболический тангенс.

5. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что выбирают из набора прогнозирующих двухслойных персептронных сетей одну прогнозирующую персептронную сеть на основании предполагаемой категории ожидаемого весеннего половодья и доступности данных радиотеплового мониторинга снежного покрова на территории водосбора наблюдаемой реки.

Изобретение относится к области гидрометеорологии и может быть использовано для прогнозирования среднесуточного расхода воды в створе реки во время прохождения весенних половодий на равнинных реках с преимущественно снеговым питанием.

Известен способ дистанционного измерения толщины снежного покрова [1], аналогичный применяемому в изобретении и заключающийся в том, что покрытый снегом участок земной поверхности облучается одновременно электромагнитными волнами сантиметрового диапазона на несущей частоте f_1 , на которой происходит отражение от границы раздела сред снег-почва, и электромагнитными волнами оптического диапазона на несущей частоте f_2 , на которой происходит отражение от границы раздела сред тропосфера-снег, и определении возникающей разности расстояний, которые проходят зондирующие сигналы.

Основными недостатками указанного способа являются:

1. Необходимость искусственного электромагнитного облучения заснеженной земной поверхности.

2. Невозможность оценки водного эквивалента снежного покрова.

Наиболее близким к предлагаемому способу является принятый за прототип способ прогнозирования времени наступления и уровня паводков [2] путем анализа временных рядов гидрометеорологических характеристик при помощи математического аппарата искусственных нейронных сетей и заключающийся в том, что он осуществляется гибридной искусственной нейронной сетью с каскадным подключением нейронной сети Кохонена и двухслойного персептрона. Гибридная нейронная сеть на основе входного вектора, состоящего из ежесуточных значений градиента локального поля температур воздуха и соответствующих значений уровня воды за предшествующие восемь дней, осуществляет прогноз градиента локального поля температуры воздуха и уровня воды с заблаговременностью в одни сутки.

Основными недостатками прототипа являются:

1. Отсутствие учета накопленных снегозапасов, которые в совокупности с иными метеорологическими характеристиками в значительной мере влияют на прохождение весеннего половодья.

2. Малая величина горизонта прогнозирования, составляющая одни сутки.

Задачей предложенного способа является уменьшение погрешности прогнозирования среднесуточного расхода воды в створе реки при прохождении высоких весенних половодий, приводящих к возникновению наводнений.

Поставленная задача решается в способе прогнозирования среднесуточного расхода воды при весенних половодьях в створе реки, при котором используют каскадное соединение двухслойной персептронной сети (ИНС-SWE) и набор из трех прогнозирующих двухслойных персептронных сетей; в качестве входного вектора ИНС-SWE используют радиояркие температуры земной поверхности набора радиочастотных каналов, причем радиояркие температуры измеряют посредством сканера-поляриметра, расположенного на борту искусственного спутника Земли. Представляют значения радиоярких температур в виде набора прямоугольных матриц для каждого радиочастотного канала,

отбирают из указанных матриц множество элементов, покрывающих площадь водосбора наблюдаемой реки; вычисляют посредством ИНС-SWE величины водного эквивалента снежного покрова для каждого из элементов матрицы, покрывающих площадь водосбора, используют при этом соответствующие значения радиоярких температур, суммируют вычисленные величины водного эквивалента. При учете суммарных величин накопления воды в снежном покрове применяют пороговый фильтр, приводящий к единице все значения, отличные от нуля и предшествующие моменту поглощения микроволнового излучения земной поверхности слоем жидкой воды. Осуществляют прогнозирование среднесуточных расходов воды в створе наблюдаемой реки посредством набора из трех независимых двухслойных перцепторных сетей методом скользящего окна, причем первую двухслойную перцепторную сеть (ИНС-1) используют для прогнозирования расходов воды во время прохождения половодий, приводящих к возникновению высоких половодий, при наличии доступа к значениям радиоярких температур земной поверхности на водосборе наблюдаемой реки, вторую двухслойную перцепторную сеть (ИНС-2) используют для прогнозирования расходов воды во время прохождения половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, при отсутствии доступа к значениям радиоярких температур земной поверхности, третью двухслойную перцепторную сеть (ИНС-3) используют для прогнозирования расходов воды во время прохождения половодий, приводящих к возникновению низких наводнений. На вход ИНС-1 подают временной ряд расхода воды в контрольном створе наблюдаемой реки и временной ряд изменения водного эквивалента снежного покрова. На входы ИНС-2 и ИНС-3 подают только временной ряд расхода воды в контрольном створе наблюдаемой реки; на выходе каждой из указанных прогнозирующих перцепторных сетей получают прогнозируемые величины расхода воды, при этом количество выходных нейронов каждой из указанных прогнозирующих двухслойных перцепторных сетей выбирают равным размеру горизонта прогнозирования, выраженному в сутках. Обучение ИНС-SWE проводят на основе ежесуточных данных измерений водного эквивалента снежного покрова на метеорологических станциях и значений соответствующих им измерений радиотеплового излучения земной поверхности за промежутки времени не менее 30 лет. Обучение ИНС-1 проводят на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в створе наблюдаемой реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, и соответствующих им данных расчета суммарного накопления воды в снежном покрове, обработанных при помощи порогового фильтра, за промежутки времени не менее 30 лет. Обучение ИНС-2 проводят на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в створе наблюдаемой реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, за промежутки времени не менее 30 лет. Обучение ИНС-3 проводят на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в створе наблюдаемой реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению низких наводнений, за промежутки времени не менее 30 лет. В качестве входного вектора ИНС-SWE применяют радиояркие температуры земной поверхности набора радиочастотных каналов 19,35, 37,0, 85,5 ГГц горизонтальной поляризации и 19,35, 37,0, 85,5 ГГц вертикальной поляризации микроволнового сканера-поляриметра SSMIS, расположенного на борту искусственного спутника Земли DMSP 5D-3/F17; при этом используют промежуточный слой ИНС-SWE, состоящий из 10 нейронов, и выходной слой, содержащий 1 нейрон, в качестве функции активации нейронов в промежуточном слое используют гиперболический тангенс, а в выходном слое используют линейную функцию. Измерение радиотеплового излучения земной поверхности выполняют посредством сенсоров SSM/I и SSMIS. Размер горизонта прогнозирования соответствует краткосрочному гидрологическому прогнозу с заблаговременностью в 7 суток. Размер скользящего окна для ИНС-1 и ИНС-2 выбирают равным 23 суткам, а для ИНС-3 - 46 суткам. Количество нейронов промежуточного слоя ИНС-1, ИНС-2 и ИНС-3 равно 46, 23 и 46 соответственно, в качестве функции активации нейро-

нов в скрытом и выходном слоях указанных нейронных сетей используют гиперболический тангенс и линейную функцию соответственно. Из набора прогнозирующих двухслойных персептронных сетей выбирают одну прогнозирующую персептронную сеть на основании предполагаемой категории ожидаемого весеннего половодья и доступности данных радиотеплового мониторинга снежного покрова на территории водосбора наблюдаемой реки.

Способ основан на применении в качестве прогнозирующего элемента (предиктора) срока начала интенсивного таяния снежного покрова на водосборе и построении прогноза связанного с этим сроком величины среднесуточного расхода воды в створе реки.

На прохождении весеннего половодья влияет целый комплекс параметров: среднесуточная температура воздуха, расход воды в реке на посту наблюдения, уровень снежного покрова и осадков на водосборной площади реки [3]. Соответственно, их учет целесообразен при составлении прогноза; однако измерения данных параметров производятся с различной временной и территориальной плотностью, что сказывается на специфике их учета (так, для замеров уровня снежного покрова характерен наибольший временной и территориальный разброс, в то время как количество осадков, влажность и температура воздуха измеряются ежедневно, часто в автоматическом режиме).

С 70-х годов прошлого века для оперативной ежедневной оценки состояния снеготпасов активно используются методы пассивного дистанционного зондирования земной поверхности на основе измерения радиотеплового излучения Земли при помощи ряда орбитальных платформ (SSMR, SSM/I, SSMIS, AMSR-E) [4]. 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) [5].

Для вычисления водного эквивалента снежного покрова S используется эмпирическая регрессионная формула, учитывающая разницу между радиояркими температурами частотных каналов 19 и 37 ГГц горизонтальной поляризации сенсора SSMIS [6]:

$$S=4,8(T_{19h} - 5 - T_{37h}), \quad (1)$$

где T_{19h} и T_{37h} - радиояркие температуры частотных каналов соответственно 19 и 37 ГГц горизонтальной поляризации, а коэффициент 4,8 соответствует плотности снежного покрова $0,30 \text{ г/см}^3$ и размеру зерна $0,3 \text{ мм}$.

В ряде публикаций [7, 8] в качестве одного из перспективных средств для повышения точности оценки водного эквивалента снежного покрова на основе измеренной радиояркой температуры рекомендуют использовать искусственные нейронные сети (ИНС).

Структурная схема предлагаемого способа прогнозирования среднесуточного расхода воды при весенних половодьях в створе реки приведена на фигуре. Для определения водного эквивалента снежного покрова используется двухслойная персептронная сеть (ИНС-SWE), входным вектором которой являются радиояркие температуры земной поверхности набора радиочастотных каналов 19,35, 37,0, 85,5 ГГц горизонтальной поляризации и 19,35, 37,0, 85,5 ГГц вертикальной поляризации микроволнового сканера-поляриметра SSMIS, располагающегося на борту спутника DMSP 5D-3/F17.

Источником значений радиоярких температур для указанных частотных каналов является Национальный центр обработки данных снега и льда (NSIDC, США). Измерения охватывают как Северное, так и Южное полушарие Земли и представлены в виде набора прямоугольных матриц размерностью 721×721 элементов с пространственным разрешением 25 км для каждого из каналов. Из указанных матриц отбирается множество элементов, покрывающих площадь водосбора наблюдаемой реки. Промежуточный слой ИНС-S состоит из 10 нейронов, а выходной слой содержит 1 нейрон. В качестве функции активации нейронов в промежуточном слое используется гиперболический тангенс, а в выходном слое - линейная функция. Нейронная сеть вычисляет величины водного эквивалента

BY 22811 C1 2019.12.30

снежного покрова для каждого из элементов матрицы, покрывающих площадь водосбора, используя соответствующие значения радиояркостных температур. Вычисленные величины водного эквивалента суммируются.

Благодаря тому что микроволновое излучение, регистрируемое орбитальным комплексом датчиков, полностью поглощается слоем жидкой 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 применяется пороговый фильтр, приводящий к единице все значения, отличные от нуля и предшествующие моменту поглощения микроволнового излучения слоем воды. В результате формируется сигнал начала интенсивного снеготаяния, позволяющий снизить погрешность прогнозирования среднесуточных расходов воды в створе реки при прохождении высоких половодий.

Прогнозирование среднесуточных расходов воды в створе реки осуществляется набором трех независимых двухслойных перцептронных сетей методом скользящего окна: первая сеть (ИНС-1) позволяет снизить погрешность прогнозирования расходов воды при прохождении высоких половодий благодаря использованию результатов радиотеплового мониторинга состояния снежного покрова на наблюдаемом водосборе; вторая сеть (ИНС-2) предназначена для прогнозирования расходов воды при прохождении высоких половодий при отсутствии доступа к значениям радиояркостных температур снежного покрова на наблюдаемом водосборе; третья сеть (ИНС-3) предназначена для прогнозирования расходов воды при прохождении малых половодий. На вход ИНС-1 поступают два временных ряда: ряд расхода воды в контрольном створе реки и ряд изменения состояния снежного покрова; на входы ИНС-2 и ИНС-3 поступает только временной ряд расхода воды в контрольном створе реки. Выходные значения всех нейронных сетей - прогнозируемые величины расхода воды на несколько дней вперед (число выходных нейронов равно количеству дней, т.е. размеру горизонта прогнозирования). Согласно предложенному способу, размер горизонта прогнозирования выбран равным 7 дням (нижний предел заблаговременности среднесрочного метеорологического прогноза). Для ИНС-1, ИНС-2 и ИНС-3 были избраны следующие архитектуры: 46-46-7 (размер скользящего окна равен 23 дням), 23-23-7 (размер скользящего окна равен 23 дням) и 46-46-7 (размер скользящего окна равен 46 дням) соответственно. В качестве функции активации нейронов в скрытом и выходном слоях перечисленных нейронных сетей используются гиперболический тангенс и линейная функция соответственно.

Выбор прогнозирующей перцептронной сети зависит от предполагаемой категории ожидаемого весеннего половодья и доступности данных радиотеплового мониторинга снежного покрова на территории водосбора. Определение категории ожидаемого половодья основывается на результатах предварительного учета количества выпавших осенних осадков и доли дней с отрицательной среднесуточной температурой воздуха за осенне-зимний период. Характерное количество выпавших осенних осадков и доли дней с отрицательной среднесуточной температурой воздуха за осенне-зимний период определяется экспертным путем при анализе архивных метеорологических временных рядов. Так, для водосбора р. Припять, расположенного на территории Республики Беларусь, признаком возникновения наводнения во время весеннего половодья является регистрация отрицательной среднесуточной температуры воздуха не менее чем в 80 % суток за период с декабря по январь и выпадение на территории водосбора не менее 58 мм осадков за тот же период.

Обучение ИНС-SWE проводится на основе ежесуточных данных измерений водного эквивалента снежного покрова на метеорологических станциях и значений и соответствующих им измерений радиотеплового излучения земной поверхности, выполненных сенсорами SSM/I и SSMIS за промежутки времени не менее 30 лет. Обучение ИНС-1

BY 22811 C1 2019.12.30

проводится на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в наблюдаемом створе реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, и соответствующих им данных расчета суммарного накопления воды в снежном покрове, обработанных при помощи порогового фильтра, за промежуток времени не менее 30 лет. Обучение ИНС-2 проводится на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в наблюдаемом створе реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению высоких наводнений, за промежуток времени не менее 30 лет. Обучение ИНС-3 проводится на основе ежесуточных данных измерений расходов воды в наблюдаемом створе реки при прохождении весенних половодий, приводящих к возникновению низких наводнений, за промежуток времени не менее 30 лет.

Технико-экономический и социальный эффект от предлагаемого способа заключается в том, что более точное и своевременное прогнозирование наводнений позволяет добиться снижения наносимого ими ущерба за счет своевременной адаптации хозяйственной деятельности.

Источники информации:

1. Патент RU 2262718 C1, МПК (2006.01) G 01S 13/95, 2004.
2. Патент RU 2480825 C2, МПК G 06N 3/2, 2010.
3. Владимиров В.А., Козубай М.П., Прокошев В.Г., Кузьмин О.В., Трифонова Т.А., Аракелян С.М. Прогнозирование уровня весенних паводков и мониторинг зон затопления на основе ГИС-технологий и систем искусственного интеллекта // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. - 2012. - № 2. - С. 519-540.
4. Hollinger J.R., Pierce J.L., Poes G.A. SSM/I Instrument evaluation // IEEE Trans. Geos. Remote Sensing. - 1990. - No. 28. - P. 781-790.
5. Узлов В.А., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Основные физические параметры снежного покрова // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е.Алексеева. - 2014. - Т. 103. - № 1. - С. 119-129
6. Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Оценка снегозапасов по данным спутниковой информации // Криосфера Земли. - 2010. - Т. 14. - № 1. - С. 76-80.
7. 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. - No. 1. - P. 76-85.
8. 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. - No. 5. - P. 919-927.