

МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СТАНДАРТНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ

Е.В. Казакова, М.М. Чумаков, И.А. Розинкина

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
kaza4ok-87@mail.ru, Inna.Rozinkina@mail.ru*

Введение

В настоящее время существует достаточно много моделей и параметризаций снежного покрова. Так, например, широко известными являются отечественные модели SWAP (Институт водных проблем РАН, [9]) и SPONSOR (Институт географии РАН, [13]), используемые в основном в климатическом моделировании. Для расчета стока и других задач гидрологии необходимо описывать процессы, происходящие в снежном покрове, как это сделано, например, в динамико-стохастической модели формирования стока (Институт водных проблем РАН, [10]), в модели снеготаяния (Гидрометцентр России, [3]), учитывающей процессы, протекающие в снежном покрове, расположенном над речным льдом. В случае моделирования нарастания снежно-ледяного покрова на море применяются два подхода: 1) сопоставление измеренных толщин льда и снега с суммой градусо-дней мороза и 2) решение уравнения теплопроводности в слоях снега, льда и воды с разными упрощениями. Например, в [2] представлена модель динамики образования морского ледяного покрова с учетом снегонакопления на его поверхности. Для целей гляциологических исследований

могут использоваться различные модели (см., например, [1, 7, 11, 12]). Существуют модели снежного покрова, необходимые для изучения его свойств и дальнейшего использования полученной информации для решения задач в области радиационного излучения подстилающей поверхности (например, [6]).

Обзор зарубежных разработанных моделей и параметризаций снежного покрова можно найти, например в ([14, 16, 21]).

В отличие от вышеупомянутых моделей, в работе предложена модель снежного покрова, которая может быть частью автоматизированной технологии вычисления характеристик снежного покрова и дальнейшей подготовки начальных полей для моделей атмосферы.

Мезомасштабное моделирование атмосферных процессов является одним из широко используемых методов, применяемых в задачах численного прогнозирования погоды. В связи с повышением требований к точности и пространственно-временному разрешению описываемых погодных процессов в моделях, уточнение описания термовлажностного взаимодействия поверхности суши с атмосферой становится все более актуальным. Характеристики, описывающие подстилающую поверхность (такие, как температура поверхности, параметр шероховатости z_0 , тип почвы, водный эквивалент и плотность снежного покрова и др.), являются переменными гидродинамической модели, и, следовательно, от точности их начальных значений зависит качество прогноза погоды. Технологии построения начальных полей этих характеристик базируются на обработке данных оперативных метеорологических наблюдений.

Снежный покров описывается в моделях атмосферы в терминах водного эквивалента как звено гидрологического цикла, и, следовательно, его эволюция может быть описана как результат генерируемых моделью осадков, процессов просачивания и стока талой воды. Ошибки воспроизведения снежного покрова моделями, таким образом, могут быть связаны с неточным расчетом сумм осадков. Особое значение имеет правильное определение влагозапасов снега в период его схода для более точной оценки и прогнозирования границ его пространственного

распределения, которое определяет структуру теплового баланса подстилающей поверхности.

Интегрирование моделей атмосферы со включенными в них блоками параметризаций снежного покрова, в т. ч. моделей многослойного снега (например, [4]), требует задания целого ряда регулярно не измеряемых внешних параметров, в первую очередь потоков тепла и радиации. Эти величины могут быть получены только из модели атмосферы на основе эмпирических соотношений, что, в свою очередь, неизбежно приводит при интегрировании на длительные периоды к накоплению неточностей и «уходу» от реальности.

Сложность заключается в том, что водный эквивалент снега не входит в состав стандартных метеорологических наблюдений: его измерения производятся на специализированных маршрутах снегомерных съемок с дискретностью в несколько дней. Современные технологии позволяют получать прогностическую продукцию моделей атмосферы несколько раз в сутки, поэтому в автоматизированных системах усвоения, служащих для построения начальных полей моделей, использование такого рода данных о водном эквиваленте не будет соответствовать требованиям большой дискретности во времени и пространстве. Кроме того, снежный покров представляет собой сложную неоднородную пористую среду, имеющую неоднородные по своей толще и постоянно изменяющиеся во времени физические свойства, которые зависят от внешних (атмосферных) и внутренних (например, уплотнение под действием силы тяжести) факторов.

Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы было разработать и реализовать устойчиво работающий алгоритм вычисления характеристик снежного покрова, используя лишь данные стандартных наземных метеорологических наблюдений на гидрометеорологических станциях, таких как высота снежного покрова, приземная температура воздуха, температура точки росы, скорость ветра, 12-часовые суммы осадков. Для задач прогноза погоды крайне важно, чтобы

на вход атмосферной модели подавались реалистичные начальные поля. Поэтому предполагаемый алгоритм должен учитывать основные закономерности изменения характеристик снежного покрова, а также обладать достаточно большой универсальностью, т. е. обеспечивать соответствующие реальности результаты для различных климатических областей, включая горные условия.

Необходимость получения сведений о характеристиках снега и их краткосрочного прогнозирования в заданных пунктах в свете метеообеспечения прошедшей зимней Олимпиады Сочи-2014 явилось дополнительным стимулом для выполнения данной работы.

В связи с этим в данной работе предложена методика воспроизведения характеристик снежного покрова по трехчасовым данным метеорологических наблюдений, основанная на экспериментально полученных функциональных зависимостях плотности свежеснежного и лежалого снега от температуры окружающей среды. Разработанная модель предназначена для вычисления характеристик снежного покрова в течение всего периода снегозалегаания в пунктах измерений с последующей интерполяцией в узлы географической сетки для подготовки начальных полей мезомасштабной модели атмосферы. Ранее основные подходы модели были описаны в [19].

Описание материалов и методов исследования

В предложенной Многослойной численной Модели Снежного покрова (ММСП) снежный покров на каждой станции представляется в виде набора элементарных слоев (будем здесь и далее называть их «элементами»). Исходя из точности измерения высоты снежного покрова предполагается, что высота каждого элемента равна 1 см, и, таким образом, количество элементов определяется измеренной на станции высотой снежного покрова. С течением времени величина высоты снега на станции будет меняться, следовательно, будет меняться количество элементов. В модели рассматриваются два процесса: увеличение и уменьшение высоты снежного покрова.

Блок-схема модели представлена на рис. 1.

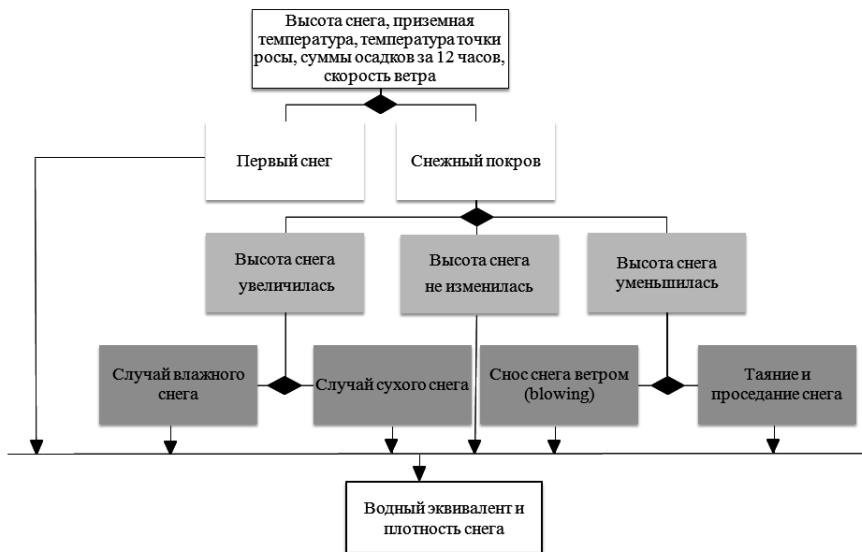


Рис. 1. Блок-схема модели ММСП. В черных рамках показаны параметры, используемые в качестве входных и выходных данных.

Увеличение снежного покрова может быть связано только с выпадением свежего снега. Известно, что во многих моделях для прогноза погоды или климата при описании свежеснегавпавшего снега применяется допущение, что его плотность примерно равна 100 кг/м^3 . Однако, согласно многочисленным исследованиям, (например, [18, 22]), плотность свежего снега может существенно отличаться от этой величины. В [15] была предложена зависимость плотности свежеснегавпавшего снега от температуры воздуха [формула (1)], которая была использована в ММСП:

$$\rho_{s,f} = 67,92 + 51,25e^{\frac{T_a}{2,59}}, \quad T_a \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

$$\rho_{s,f} = \min(200; 119,2 + 20T_a), \quad T_a > 0 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $\rho_{s,f}$ – плотность свежеснегавпавшего снега, кг/м^3 ; T_a – температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Согласно формуле (1), слой выпадающего снега, состоящий из элементов, будет иметь различную плотность при различных температурах окружающего воздуха.

В соответствии со схемой на рис. 1., ММСП начинает функционировать с того момента, когда метеостанция зафиксирует отличную от нуля высоту снега. Для этих суток будет произведен расчет плотности свежего снега по (1) для всех элементарных слоев, соответствующих измеренной высоте. В последующие дни дальнейшие расчеты производятся в предположении, что колонна снега находится в квазистатическом равновесии, что предполагает отсутствие в ней пластических деформаций.

На основе полученных в [23] зависимостей модуля Юнга снега от плотности авторы предложили рассчитывать плотность каждого элемента для двух температурных интервалов (больше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и меньше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) в виде:

$$\rho = \frac{\frac{mg}{10^6(1-\sigma)} + 1,86}{0,0167}, \quad T > -5\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\rho = \frac{\frac{mg}{10^6(1-\sigma)} + 10,8}{0,059}, \quad T \leq -5\text{ }^{\circ}\text{C},$$
(2)

где m – масса снега, вычисляемая по формуле $m = H \cdot (\rho_1 + \rho_2 + \dots)$, $H = 0,01\text{ м}$; ρ_1, ρ_2 – плотности первого, второго и т. д. элементов; g – ускорение свободного падения; σ – параметр, отвечающий за изменение размера элемента при остаточной деформации, связанный с давлением вышележащих слоев.

Таким образом, на каждом шаге по времени, составляющем сутки, плотность каждого элемента в колонне будет пересчитываться на основе формул (2).

В процессе снегонакопления в колонне снега со временем будут формироваться слои элементов – «включения», имеющие

достаточно однородную плотность, которая будет определяться в зависимости от температуры [формула (2)].

Моделирование самого процесса снегонакопления выполняется по следующему алгоритму: к элементам, образовавшим снежный покров за предыдущий срок измерений, добавляются элементы, слагающие слой свежевывавшего снега, и, таким образом, общее число элементов соответствует измеренной высоте снега (в см) в текущий момент времени. Плотность самого верхнего элемента определяется согласно формуле (1), а остальных из вновь образованных – по формуле (2). Далее производится проверка на возможность пластических деформаций в нижележащих элементах под воздействием свежевывавшего снега, и если это может произойти, то их плотности увеличиваются в соответствии с формулой (2) до значений, которые исключают эту возможность. В случае выпадения мокрого снега (наблюдается при положительной температуре воздуха) предусмотрен учет просачивания воды в нижележащие элементы.

Уменьшение высоты снежного покрова может быть обусловлено следующими факторами, которые учитываются моделью: проседание, таяние, снос снега сильным ветром.

Процесс проседания снежного покрова параметризован в модели следующим образом: в случае уменьшения высоты снежного покрова между двумя последовательными измерениями на метеорологической станции предусмотрено вертикальное перераспределение массы снега или влаги по элементам во всех «включениях». Для этого определяется количество «включений» и в них – элемент с минимальной плотностью. Этот элемент удаляется из колонны, а его масса равномерно добавляется каждому из элементов «включения», которое его содержало. В результате этой операции высота снежной колонны уменьшается на высоту одного элемента. Цикл продолжается до тех пор, пока не будет достигнута высота снежного покрова, измеренная в данный момент времени.

Процесс снеготаяния и связанный с ним последующий сток воды учтены параметрически. В случае положительной температуры воздуха рассчитывается излишек воды, который

образовался при таянии, вызвавшем уменьшение высоты снега (эквивалентен разности между предыдущим и текущим значениями высоты снега при ранее определенных плотностях верхних элементарных слоев). В первой версии модели предполагалось (для простоты расчетов и исходя из правильно моделируемой тенденции изменения водного эквивалента снежного покрова в течение сезона), что половина этой воды удаляется поверхностным стоком, а оставшая часть просачивается вглубь и расходуется на уплотнение оставшихся элементов. Затем использовалось критическое значение коэффициента стаивания, равное $3 \text{ мм}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут})$, т. е. предполагалось, что количество стекаемой воды не превышает произведения коэффициента стаивания на величину наблюдаемой среднесуточной температуры воздуха. Выбор такого значения для коэффициента стаивания обусловлен тем, что значительная часть ЕТР покрыта лесом, где таяние снега происходит медленнее, чем на поле. В дальнейшем в качестве уточнения модельных расчетов планируется разработка дополнительных переменных, которые будут учитывать расположение станции (природная зона, рельеф и др.).

В модели реализован упрощенный алгоритм учета сноса снега сильным ветром (считается, что сильный ветер принимает значения более 10 м/с), который состоит в проверке условия:

$$100 \% - \left(\frac{H_{new} \cdot 100 \%}{H_{old}} \right) > 25 \% ,$$

где H_{new} – высота снега в текущий день, см; H_{old} – высота снега в предыдущий день, см. То есть если высота снега в текущий момент времени изменилась больше, чем на 25% по сравнению с предыдущим измерением, то считается, что соответствующая часть снега была удалена под воздействием ветра из точки наблюдений. Порог в 25% был выбран эмпирически на основе верификации результатов предварительного тестирования модели с помощью станционных измерений.

Предполагается, что максимальная плотность снега в модели не может быть выше 700 кг/м^3 (плотность пористого льда).

В качестве дополнительной возможности в модели может быть учтен процесс испарения/конденсации с поверхности снега, описываемый широко известной формулой П.П. Кузьмина [8]:

$$F = (0,18 + 0,098 \cdot u_{10M}) (e_{pot} - e_{2M}), \quad (3)$$

где F – скорость испарения/конденсации, мм/сут; u_{10M} – скорость ветра на высоте 10 м, м/с; e_{pot} – насыщающая упругость водяного пара при температуре поверхности снежного покрова, мбар; e_{2M} – упругость водяного пара на высоте 2 м, мбар.

Таким образом, для выполнения расчетов водного эквивалента и плотности снега требуется задать стационарные измерения высоты снежного покрова, приземной температуры воздуха, скорости ветра, температуры точки росы и 12-часовых сумм осадков.

ММСП также может использоваться в алгоритме построения начальных полей метеорологических элементов на расчетной сетке модели атмосферы.

Верификация модели осуществлялась с помощью данных снегомерных съемок, проводимых на территории ЕТР для некоторых станций, а также данных наблюдений на метеорологической станции Цугшпитц (Бавария).

Обсуждение результатов

В качестве верификации модели ММСП выполнено сравнение рассчитанных с ее помощью значений водного эквивалента снега с накопленными значениями 12-часовых сумм осадков, измеренных на гидрометеорологических станциях. В качестве примера в статье приводится одна из них – немецкая станция Цугшпитц (Бавария), расположенная на 2960 м над уровнем моря. Выбор данной станции был обусловлен тем, что на ней проводятся измерения высоты снежного покрова через каждые 6 часов и продолжительность залегания снежного покрова составляет несколько месяцев. Учитывая, что водный эквивалент снежного покрова на станции в случае отрицательных температур воздуха (таяние снежного покрова не наблюдается) определяется главным образом количеством выпадающих осадков, то можно полагать, что в случае корректной работы

модели рассчитанное на любую календарную дату значение водного эквивалента должно быть близко к величине накопленной на эту дату суммы снежных осадков.

Из анализа результатов расчетов, приведенных в табл. 1, следует, что средняя относительная ошибка значений водного эквивалента равна 2,4 %. Столь малая величина относительной ошибки позволяет сделать вывод о реалистичности получаемых с помощью модели МСП значений водного эквивалента снега (а соответственно, и его плотности) в период снегонакопления.

Таблица 1

Сумма накопленных осадков на станции Цугшпитц (Бавария) и значения водного эквивалента снежного покрова по расчетам модели ММСП для периода снегонакопления в 2009–2010 гг. и относительная ошибка по результатам моделирования

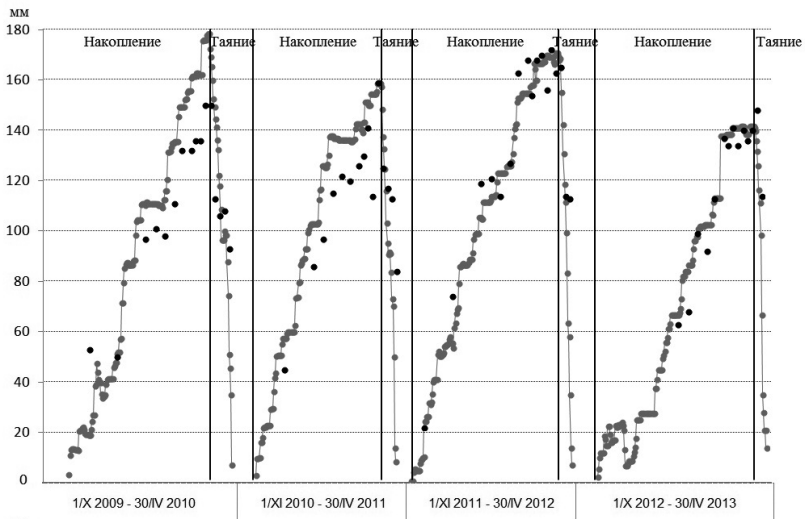
Месяц	X	XI	XII	I	II	III	IV	Всего за период
Сумма накопленных осадков (по стационарным измерениям), мм	241	335	520	629	717	859	965	4264
Водный эквивалент снега (по модели ММСП), мм	245	298	506	629	715	902	968	4264
Относительная ошибка, %	1,6	12,5	2,6	0	0,2	4,8	0,4	–
Водный эквивалент снега (со средней плотностью), мм	293	313	498	600	600	790	776	3869
Относительная ошибка, %	17,6	6,9	4,4	4,8	19,4	8,7	24,4	–

Следует отметить, что даже в горных условиях, где нет столь резких изменений плотности снега в период снегонакопления, которые могут наблюдаться на равнинной территории в связи с колебаниями температуры воздуха в течение зимы, плотность снега претерпевает изменения. Это можно видеть из двух последних строчек табл. 1. В них приведены значения водного эквивалента снега, но с учетом среднего для данной станции

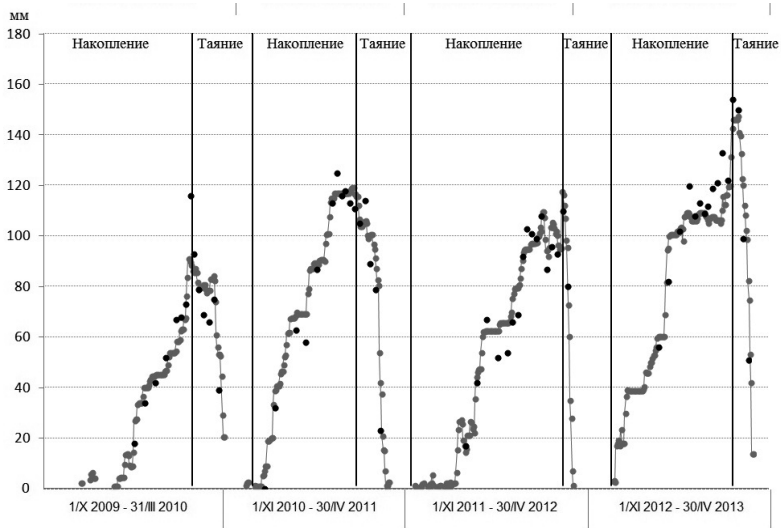
значения плотности, рассчитанного с использованием ММСП и равного 293 кг/м^3 , в качестве константы. Такого рода допущение не позволяет корректно воспроизвести как общее количество накопленного снега, так и его значения по месяцам. Средняя относительная ошибка значений водного эквивалента в этом случае равна 12,9 %, значит, нежелательно прибегать к использованию постоянных значений плотности, особенно для различных климатических областей. Таким образом, анализ табл. 1 позволяет говорить о целесообразности использования ММСП для расчета характеристик снежного покрова

Следующим этапом исследования было установить, как модель ММСП воспроизводит водный эквивалент снега для всего снежного периода на различных станциях. Был выбран 31 гидрологический пост, расположенный на ЕТР. В период снеготаяния в снежном покрове происходят различные процессы, которые учтены в модели параметрически. Тем не менее ход водного эквивалента снега для различных станций моделируется верно (рис. 2).

Отметим следующие особенности, которые возникают при обработке данных моделирования и станционных измерений: 1) данные снегомерных съемок на станции могут быть переданы неправильно или быть ошибочными. В первом случае можно сравнить с соседними станциями, во втором – с предыдущими и последующими измерениями на станции. Однако использовать эти данные уже нельзя; 2) гидрологические данные о характеристиках снега являются осредненными по всему снегомерному маршруту, следовательно, высота снежного покрова на метеорологической станции и измерения на соответствующем гидрологическом посту могут отличаться, особенно в период снеготаяния. Для модели ММСП требуются стандартные станционные измерения высоты снега, тогда расчеты по ней могут отличаться от гидрологических измерений водного эквивалента (например, в переданном станцией коде SYNOP высота снега равна 0 см, в то время как на гидрологическом посту отмечен снег высотой 10 см). Перечисленные особенности могут оказывать влияние при сравнении полученных по модели и измеренных значений водного эквивалента, несколько ухудшая результаты моделирования.



а)



б)

Рис. 2. Ход водного эквивалента снежного покрова (мм) в периоды существования снега с 1 октября 2009 по 30 апреля 2013 года для станций Верхняя Тойма (а) и Коломна (б): серым цветом показаны расчеты по ММСИП, черные точки – станционные измерения

В качестве примера успешности воспроизведения водного эквивалента можно рассмотреть станции, расположенные в разных регионах Европейской территории России: «север» (преобладают низкие температуры при выпадении снега), «центр» (выпадение снега наблюдается при широком диапазоне температур) и «юг» (условия неустойчивого снежного покрова, с преобладанием температур, близких к нулю в течение снежного периода). Выполненный анализ данных моделирования позволяет заключить, что модель реалистично воспроизводит характеристики снежного покрова (табл. 2): среднеквадратическая ошибка по ЕТР составляет 2,6 мм, незначительно изменяясь по регионам и по станциям. Средняя относительная ошибка для ЕТР не превышает 30 %, варьируя для различных станций в большую или меньшую сторону. В табл. 2 приведены средние статистические характеристики за 4 снежных периода. В зависимости от атмосферных условий различия между гидрологическими данными и моделируемыми значениями водного эквивалента снега будут меняться для каждого года.

Из табл. 2 можно заметить, что станции, расположенные на севере ЕТР, имеют между собой минимальный разброс и наиболее низкие значения ошибок. Связано это с тем, что период снегонакопления в этом регионе длится достаточно долго, снежный покров имеет большую толщину, резких изменений температуры воздуха, как правило, не наблюдается. Поэтому модельные данные наиболее близки к станционным по сравнению с центральным регионом и тем более южным.

Необходимо отметить, что точность расчета значений водного эквивалента с помощью разработанной авторами данной статьи модели значительно выше, чем величин, поступающих в качестве начальных полей для использования в мезомасштабных моделях для прогноза погоды, например из системы глобального моделирования-усвоения данных Немецкой службы погоды для модели COSMO-Ru (с помощью глобальной модели GME). В последнем случае различия могут достигать до 200–300 % и значения среднеквадратической ошибки могут меняться от 10 мм для южных районов до 130 мм для северных) [20].

Таблица 2

Статистические характеристики по водному эквиваленту снега для станций, расположенных на Европейской территории России, для периодов со снегом в 2009–2013 гг.

Номер станции	Название станции	СКО	СОО
<i>Центр</i>			
34238	Анна	1,4	23,5
26298	Бологое	1,5	14,9
28909	Бузулук	1,9	24,7
27242	Буй	2,0	14,4
27277	Ветлуга	2,5	26,0
34202	Готня	1,3	21,3
27419	Дмитров	1,9	16,4
27872	Инза	4,7	46,3
27901	Карачев	4,6	36,1
27625	Коломна	1,3	12,0
27935	Мичуринск	2,4	26,8
28409	Можга	3,6	19,0
27848	Моршанск	1,6	17,6
34003	Поныри	2,6	21,4
27972	Радищево	3,7	19,6
27225	Рыбинск	5,3	26,1
33166	Рыльск	1,6	24,2
26795	Спас-Деменск	1,9	17,7
Средние по региону		2,7	20,4
<i>Север</i>			
22778	Верхняя Тойма	2,6	14,2
22876	Красноборск	2,1	17,6
22983	Лальск	3,4	26,6
22563	Пинега	3,5	23,0
Средние по региону		2,9	20,4
<i>Юг</i>			
34958	Благодарный	2,1	70,7
34579	Верх. Баскунчак	2,1	48,3
34363	Камышин	4,4	45,4

Продолжение таблицы 2

Номер станции	Название станции	СКО	СОО
34072	Карабулак	3,6	23,3
37145	Моздок	3,0	28,8
37212	Нальчик	1,8	43,6
37144	Прохладная	2,2	30,7
34356	Фролово	1,6	41,3
34687	Харабали	1,8	22,5
Средние по региону		2,3	39,4
Средние по ЕТР		2,6	27,2

Примечание: СКО – среднеквадратическая ошибка, мм;
СОО – средняя относительная ошибка, %.

Итак, на основании сопоставления данных моделирования с данными наблюдений было установлено, что разработанная параметрическая многоуровневая модель снежного покрова ММСП достоверно воспроизводит изменение параметров снежного покрова в течение всего периода его существования.

В ходе работы были выполнены исследования по целесообразности использования формулы (3) для расчета испарения с поверхности снежного покрова. В работах, посвященных исследованию испарения с поверхности снежного покрова, величина испарения за сутки может варьировать в зависимости от погодных условий и типа подстилающей поверхности. Так, согласно упоминаемому в [5] исследованию, для Западного Казахстана значения испарения за период сплошного снежного покрова находятся в пределах 0,08–0,27 мм/сут при среднем значении 0,11 мм/сут.

Расчеты величины испарения, выполненные по формуле (3) при включении ее в модель снежного покрова [17], показали, что на территории метеообсерватории Валдая испарение с поверхности снежного покрова в конце зимы не превышает 0,2 мм/сут.

Численные эксперименты, выполненные авторами статьи, показали, что в случае применения формулы для станций, расположенных в северной и центральной частях Европейской

территории России, величина испарения в среднем составляет 0,1–0,2 мм/сут в конце зимы, что находится в хорошем соответствии с вышеизложенными результатами других исследователей.

Недостатком формулы является то, что она получена эмпирически на основе обработки наблюдений над испарением со снега, производившихся в основном на ЕТР. В случае если потребуется провести расчет по другой территории, она может воспроизвести ошибочные значения величины испарения с поверхности снега.

Заключение

Тестирование разработанной модели по данным метеорологических станций ЕТР, расположенных в разных климатических условиях, показало, что с ее помощью могут быть получены реалистичные средние значения водного эквивалента и плотности снежного покрова.

Предлагаемую методику определения влагозапасов снега можно использовать как элемент системы построения начальных полей для прогностических моделей атмосферы, для получения оценок влагозапаса снега в гидрологических расчетах, а также как инструмент вычисления ряда характеристик снега для таких прикладных задач, как, например, метеообеспечение проведения соревнований по зимним видам спорта.

В дальнейшем планируется развить технологию оперативного построения полей анализа снежного покрова для обширных территорий на основе приемов интерполяции и комбинирования результатов данной схемы со спутниковой информацией высокого разрешения о наличии снежного покрова и включить разработанную технологию в блок регионального усвоения данных мезомасштабной модели COSMO-Ru.

Список использованных источников

1. *Анисимов О.А.* Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонноталого слоя в условиях современного и будущего климата // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 3. – С. 36–44.

2. *Богородский П.В., Дворников А.Ю., Пнюшков А.В.* Фронтальная модель образования морского льда с учетом снегонакопления // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 10. – С. 73–81.
3. *Борщ С.В., Силантьева Т.П.* Об усовершенствовании метода расчета разрушения ледяного покрова рек и водохранилищ // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 309. – С. 113–120.
4. *Володина Е.Е., Бенгтссон Л., Лыков В.Н.* Параметризация процессов тепловлагопереноса в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 5. – С. 5–13.
5. Динамика масс снега и льда. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 456 с.
6. *Журавлева Т.Б., Кохановский А.А.* Влияние горизонтальной неоднородности на альбедо и поглощательную способность снежного покрова // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 9. – С. 17–25.
7. *Божинский А.Н., Перов В.Ф., Трошкина Е.С., Шныпарков А.Л.* Итоги и перспективы изучения снежных лавин, селей и других опасных природных явлений // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. – 2005. – № 2. – С. 68–73.
8. *Кузьмин П.П.* Процесс таяния снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 345 с.
9. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой / отв. ред. Л.С. Кучмент. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
10. *Кучмент Л.С., Романов П.Ю., Гельфан А.Н., Демидов В.Н.* Оценка характеристик снежного покрова путем совместного использования моделей и спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 47–56.
11. *Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В.* Моделирование таяния поверхности горного ледника // Лед и Снег. Ледники и ледниковые покровы. – 2011. – Вып. 4 (116). – С. 24–31.
12. *Сосновский А.В.* Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли. – 2006. – Т. X, № 3. – С. 83–88.
13. *Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю.* Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, №4. – С. 69–79.
14. *Ancey C.* Snow avalanches // Geomorphological Fluid Mechanics. – Berlin: Springer Verlag, 2001. – P. 319–338. (Lecture Notes in Physics 582).
15. *Bartlett P.A., MacKay M.D., Verseghy D.L.* Modified Snow Algorithms in the Canadian Land Surface Scheme: Model Runs and Sensitivity

Analysis at Three Boreal Forest Stands // ATMOSPHERE-OCEAN. – Canadian Meteorological and Oceanographic Society, 2006. – Vol. 43 (3). – P. 207–222.

16. *Geethalakshmi et al.* A literature review on modeling of hydrological processes and feedback mechanisms on climate // *ClimaRice*. Report 3. – 2008. – 48 pp.

17. *Gelfan A.N., Kuchment L.S., Pomeroy J.W.* Modeling Forest Cove. – 2004. – P. 785–803.

18. *Judson A., Doesken N.* Density of freshly fallen snow in the Central Rocky Mountains // *Bull. Amer. Meteorol. Soci.* – 2000. – Vol. 81, No. 7. P. 1577–1587.

19. *Kazakova E., Chumakov M., Rozinkina I.* Realization of the parametric snow cover model SMFE for snow characteristics calculation according to standard net meteorological observations // *COSMO Newsletter* No.13. – 2013. – P. 39–49.

20. *Kazakova E., Rozinkina I.* Testing of snow parameterization schemes in COSMO-Ru: Analysis and results // *COSMO Newsletter* No. 11. – 2011. – P. 41–51.

21. *Slater et al.* The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(d) // *J. Hydrometeor.* – 2001. – Vol. 2. – P. 7–25.

22. *Strack J.E., Liston G.E., Pielke R.* Modeling Snow Depth for Improved Simulation of Snow–Vegetation–Atmosphere Interactions // *J. Hydrometeorol.* Special section. – 2004. – Vol. 5. – P. 723–734.

23. *Yosida Z., Huzioka T.* Some Studies of the Mechanical Properties of Snow // *IAHS Red Book Series*. Publ. – 1954.– No. 39. – P. 98–105.

Поступила в редакцию 28.08.2014 г.