

УДК 556.124.2

Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации

***Е.В. Чурюлин^{1,2}, В.В. Копейкин¹, И.А. Розинкина¹,
Н.Л. Фролова², А.Г. Чурюлина²***

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия
evgenychur@gmail.com*

Изучение характеристик снежного покрова предполагает постоянное наблюдение за изменением его текущего состояния. Представлены результаты сравнения существующих методов анализа характеристик снежного покрова. Для решения поставленных задач выбраны пять различных источников получения оперативной информации о состоянии снежного покрова. В качестве объектов исследования выбраны водосборы пяти рек (Онега, Северная Двина, Надым, Ока, Дон) на территории Российской Федерации. В качестве временного диапазона выбран период с 1987 по 2017 год, для которого были собраны данные различных международных и российских проектов с различным пространственным и временным шагом. В качестве интересных характеристик снежного покрова выбраны запас воды в снежном покрове и его плотность.

Ключевые слова: спутниковые данные, модель COSMO-Ru, GLADAS, GlobSnow, SnoWE, наземные данные, SYNOP код, запас воды в снеге, плотность снежного покрова, python

Analysis of snow cover characteristics by satellite and model data for different catchment areas are located on the territory of the Russian Federation

***E.V. Churiulin^{1,2}, V.V. Kopeykin¹, I.A. Rozinkina¹,
N.L. Frolova², A.G. Churiulina²***

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
evgenychur@gmail.com*

Investigation of snow cover characteristics are required continuous monitoring of its current state. In this work are demonstrated, results of comparison calculation data of our model with data from different international projects (snow models and satellite data). Moreover, are shown new updates for SnoWE, which have been implemented We chose five different projects with information about snow cover characteristics (GLADAS – 2 projects, GlobSnow, «SnoWE» and in-situ data), and we applied these data for five catchment areas (Onega, North Dvina, Nadim, Oka and Don rivers). Our time range is

from 1978 to 2017 years. Snow water equivalent and snow density were interested for us in this research.

Keywords: satellite data, COSMO-Ru model, GLADAS, GlobSnow, SnoWE, in-situ data, SYNOP code, SWE, density of snow cover, python

Введение

Снежный покров играет значимую роль при взаимодействии климатических, гидрологических и гляциологических процессов. Снег является мощным климатообразующим фактором, оказывающим существенное влияние на формирование погодных условий. Одной из важнейших характеристик снежного покрова является запас воды, или водный эквивалент (в зарубежной литературе – *snow water equivalent, SWE*). Информация о запасе воды в снежном покрове необходима при прогнозировании весенних половодий, также она используется в качестве одного из входных параметров в численных моделях атмосферы. В последнем случае наличие снежного покрова и его свойства в ячейках модели определяют величину и структуру теплового баланса подстилающей поверхности, что может ощутимо сказаться на термическом режиме нижних слоев воздуха, а следовательно и всей цепочке погодообразующих процессов в данной области.

Фактические сведения о запасе воды в снежном покрове традиционно получают на основе маршрутных снегомерных наблюдений. Такие измерения являются самыми точными и репрезентативными, но в силу трудоемкости данного процесса они не могут обеспечить требуемую детализацию по времени (не реже одного измерения в сутки) и оперативность предоставления информации, необходимую для использования в современных технологиях численного прогноза погоды. Кроме того, их выполнение ограничено в труднодоступных или отдаленных регионах нашей страны. Таким образом, ежедневный пространственный мониторинг запасы воды в снежном покрове, необходимый также для оценки региональных климатообразующих факторов, представляет актуальную задачу.

В настоящее время активно развиваются два направления, позволяющие получать информацию о состоянии характеристик снежного покрова: 1) с помощью искусственных спутников Земли и методов их интерпретации; 2) с помощью технологий численного прогноза погоды со встроенными системами циклического усвоения данных. В обоих случаях имеет место занижение точности оценок запаса воды в снежном покрове в сравнении с маршрутными снегомерными наблюдениями. Однако данные направления имеют резерв для своего развития.

Данное исследование имело целью оценить точность данных, ежедневно воспроизводимых современными технологиями указанных направлений и пригодных для оценки запаса воды в снежном покрове на территории Российской Федерации, сравнив их с результатами

маршрутных снегомерных наблюдений. Исследование было сконцентрировано на оценке запаса воды в снежном покрове на водосборах рек Северная Двина, Онега, Надым, Обь, Дон.

В качестве источника спутниковых данных рассмотрены международные проекты *GlobSnow* (<http://www.globsnow.info/>) и *Global Land Data Assimilation System (GLDAS)*, США, (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/>). Проект *GlobSnow* – разработка Финского метеорологического института, содержит данные пассивной микроволновой радиометрии. Проект *GLDAS* был разработан учеными из *NASA*. При создании проекта использовалось новое поколение наземных и космических систем наблюдения, которые предоставляют данные для смоделированных состояний поверхности суши.

В качестве данных о запасе воды в снежном покрове на основе численного моделирования применялась усовершенствованная технология «*SnoWE*», разработанная в Гидрометцентре России в рамках деятельности международного консорциума *COSMO* при сотрудничестве с проектом *ESSEM COST Action ES1404* (<http://www.harmosnow.eu/>). Данная технология интересна тем, что применяет комбинацию одномерного моделирования накопления запаса воды в снежном покрове на основе непрерывного учета данных стандартных синоптических измерений на метеостанциях (приземной температуры воздуха, влажности, скорости ветра, осадков с учетом их фазы), получаемых в виде синоптического кода *SYNOPT* с полями первого приближения из системы численного прогноза погоды.

Модель «*SnoWE*» и технология совмещения ее продукции с полями первого приближения были реализованы в Гидрометцентре России в 2011–2015 гг. Е. В. Казаковой и М. М. Чумаковым [3] в связи с выявлением существенных недостатков в данных о *SWE*, поступающих на вход оперативной модели *COSMO-Ru* из системы усвоения данных, использующей анализ высоты снежного покрова и его плотность (RHO) на основе временных коэффициентов и простых «функций старения» в качестве базовых величин.

Технология «*SnoWE*» была развита в последние годы авторами статьи, главным образом, на основе ее детального тестирования, выявления наиболее «слабых мест» и решения задач «привязки» к оперативным информационным системам Гидрометцентра России.

Таким образом, представленная статья содержит;

– информацию о современном состоянии проблемы спутникового мониторинга снежного покрова;

– краткое описание технологии «*SnoWE*» и реализованных авторами модификаций в ней;

– результаты сравнения «*SnoWE*» с данными международных проектов *GlobSnow*, *GLDAS* и маршрутными снегомерными наблюдениями за период с 1987 по 2017 год для территории пяти водосборов, располагающихся на территории Российской Федерации.

1. Современное состояние проблемы мониторинга и моделирования снежного покрова

Существуют различные виды мониторинга снежного покрова, в основе которых лежат совершенно разные принципы измерения параметров снежного покрова. К основным видам мониторинга относятся: 1) маршрутные снегомерные наблюдения; 2) стандартные синоптические измерения; 3) лидарные наблюдения за высотой снежного покрова; 4) телеметрические наблюдения; 5) данные дистанционного зондирования Земли; 6) данные математических моделей (моделирование снежного покрова). Следует отметить, что существуют и другие виды мониторинга снежного покрова, которые не имеют широкого распространения, что не позволяет использовать их при решении различных задач для всей территории страны.

Во многих работах подчеркивается, что точно рассчитать водный эквивалент снежного покрова со спутников по-прежнему трудно как во времени, так и в пространстве [2, 13, <http://www.globsnow.info/>]. С другой стороны, высота снежного покрова относительно легко измеряется, а наблюдения становятся все более многочисленными. Ультразвуковые приборы обеспечивают экономичный способ автоматизации измерений высоты снега в точке [18], и за последние годы количество данных измерений значительно возросло [12].

Лидарные наблюдения за высотой снега, как бортовые, так и наземные, становятся все более востребованными из-за их детального пространственного шага, как отмечается в [10, 14, 15]. Кроме того, большое внимание уделяется вопросам оценки изменения высоты снежного покрова для лучшего понимания динамики его развития в условиях малых водосборов [11, 12]. В результате применения лидарных наблюдений заметно увеличилось количество измерений высоты снежного покрова, например для территории США.

Применение различных модификаций телеметрических радиоизотопных снегомерных устройств, определяющих профили снежного покрова по горизонтали и по вертикали и передающих результаты измерений на основные станции по земле, по радио или через спутники, также позволило увеличить количество наблюдений. Подобные системы разработаны во Франции и США [17]. Например, в рамках проекта (*Snow Telemetry – SNOTEL*) была организована специальная телеметрическая сеть наблюдений за снежным покровом в горных районах западной части США, что позволило значительно увеличить объем получаемой информации о высоте снежного покрова в горной местности [20].

Получить данные о состоянии снежного покрова можно также с помощью данных дистанционного зондирования. Тем не менее подготовка программного обеспечения для интерпретации спутниковых данных требует времени и большого количества персонала. Поэтому большинство

метеорологических центров используют спутниковую продукцию, находящуюся в свободном доступе в сети Интернет на сайтах Национального управления океанических и атмосферных исследований (*National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA*) и его подразделений. Так, например, спутниковые продукты *IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System)*, составляемые *NESDIS (National Environmental Satellite Data and Information Service) NOAA*, содержащие информацию о степени покрытости территории снегом и льдом, с разрешением 24 и 4 км (с декабря 2014 года функционирует продукт с разрешением 1 км), а также композитный продукт *NOAA* с разрешением 4 км. Данные в перечисленных проектах генерируются ежедневно в автоматическом режиме и предоставляют информацию о степени покрытости территории Северного и Южного полушария снегом и льдом. Данные доступны для свободного доступа.

Отдельное внимание при изучении снежного покрова уделяется моделированию. Вопросам моделирования характеристик снежного покрова посвящено большое количество исследований. Модели и схематизации снежного покрова основаны как на полном описании процесса формирования и разрушения снежного покрова с использованием уравнений математической физики, так и на концептуальном представлении данных процессов с использованием более простых (эмпирических) соотношений. Описание процессов, происходящих в снежном покрове, может быть включено в качестве простых параметризаций, например в блоки подстилающей поверхности моделей атмосферы, либо входить в самостоятельные модели различной степени сложности. В североамериканской наземной системе сбора данных (*North American Land Data Assimilation System – NLDAS*), направленной на оценку водного эквивалента снега, в первую очередь внимание уделяется оценке объема снега, а затем оцениваются параметры *SWE* (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/>).

Результаты сравнения телеметрических данных наблюдений с данными проекта *NLDAS* показали, что модели *NLDAS* имеют заниженные значения *SWE* в горной местности, ошибка измерений может достигать 1000 мм. Эксперименты с моделью *VIC* продемонстрировали, что уменьшить погрешность при прогнозе *SWE* можно путем дополнительного учета данных с местных метеостанций (данные об осадках). Интересной особенностью *NLDAS*, согласно [20], является занижение температуры воздуха в зимнее время и ее завышение весной и летом по сравнению с данными *SNOTEL*, при этом определенную роль играет географическое расположение станции.

Особый интерес вызывает опыт европейских стран и их разработки, связанные с мониторингом снежного покрова и его характеристик. Например, в Швейцарии объективный анализ снежного покрова базируется на использовании информации с геостационарного спутника *Meteosat-8* со встроенным прибором *SEVIRI*, работающим в видимом и инфракрасном диапазонах. Информация обрабатывается с интервалом в 15 минут, что позволяет отделять облака и их тени от подстилающей поверхности.

Разработанный анализ на основе таких данных позволяет получать точность до 95 % при определении запаса воды в снежном покрове [2]. В Норвегии ежедневные карты распределения снежного покрова создаются с использованием снежной модели *seNorge* с 2004 года [19]. Модель *seNorge* работает с разрешением 1×1 км, использует данные с привязкой к сетке с суточной температурой и осадками в качестве входного воздействия и моделирует, среди прочего, величину водного эквивалента снежного покрова, высоту снега и его плотность.

Опыт России в создании проектов по мониторингу снежного покрова традиционно представляется маршрутными снегомерными наблюдениями. Высокое качество фактических данных для широкого диапазона погодноклиматических условий в пределах нашей страны позволило накопить большой опыт по моделированию процессов, происходящих в снежном покрове [1, 5, 6, 9].

Востребованность получения оперативной информации о запасе воды в снежном покрове для обширных территорий Российской Федерации явилась мотивацией для создания в Гидрометцентре России системы моделирования снега «*SnoWE*» [3]. Ее особенностями являются: малое потребление вычислительных ресурсов, практическое отсутствие региональных настроечных параметров, ориентация на оперативную информацию измерений, сопряженность с оперативными базами данных Гидрометцентра России и ВМО (<https://public.wmo.int/en/projects/strategic-management-hydro-meteorological-data-and-information-product-generation>).

Система расчетов для каждой метеостанции, работающая ежедневно и круглогодично, позволяет говорить об оценке запаса воды в снежном покрове. Дополнительно решить вопросы, связанные с недостаточным количеством данных о состоянии снежного покрова, позволяют численные модели атмосферы, например, модель *COSMO-Ru*, данные которой активно используются в «*SnoWE*», кроме того, численное моделирование в рамках модели атмосферы позволяет получить информацию о состоянии снега с заблаговременностью до 72 часов [7].

2. Технология оперативных вычислений снегозапасов на основе одномерной многослойной снежной модели «*SnoWE*»

Начиная с 2012 года, благодаря усилиям Е. В. Кузьминой и М. М. Чумакова [3], в Гидрометцентре России стала активно развиваться технология оценки снегозапасов на основе синоптической информации. В 2014 году разработанная технология тестировалась и применялась для моделирования снежного покрова в районе проведения зимней Олимпиады в Сочи. Модель «*SnoWE*» постоянно совершенствуется и продолжает развиваться [2].

В ее основе лежит одномерная многослойная модель снежного покрова, ежедневно вычисляющая значения водного эквивалента снега и его плотности. Расчет выполняется в зависимости от метеорологических условий на метеостанции за предыдущий день. В зависимости от

состояния снежного покрова в технологии реализованы три расчетных сценария: 1) снег на метеостанции за предыдущий день отсутствовал – выпал свежесвыпавший снег; 2) наблюдался снежный покров за предыдущий день – снежный покров был; 3) снег на метеостанции за предыдущий день отсутствовал в течение 5 дней, и наблюдалась устойчивая среднесуточная температура воздуха больше нуля градусов. В случае выпадения атмосферных осадков в виде снега с дождем или дождя в первую очередь требуется определить, что происходило со снежным покровом за предыдущий день. Если снежный покров отсутствовал, тогда технология не выполняет расчетов водного эквивалента и его плотности из-за отсутствия прироста высоты снежного покрова. В то же время, если на метеостанции наблюдался снежный покров, тогда расчет идет по второму сценарию.

Второй сценарий расчета содержит три варианта развития снежной истории на метеорологической станции в зависимости от изменения высоты снежного покрова: 1) высота снежного покрова увеличилась; 2) высота снежного покрова не изменилась; 3) высота снежного покрова уменьшилась. В случае увеличения высоты снежного покрова в технологии реализованы два подхода к решению задачи расчета запаса воды в снежном покрове: 1) выпал сухой снег; 2) выпал мокрый снег, в том числе учитывается возможность выпадения снега с дождем. В случае уменьшения высоты снежного покрова также реализованы два технологических подхода в зависимости от причины, которая вызвала уменьшение высоты снега: 1) высота снежного покрова уменьшилась за счет сдувания и уплотнения снежного покрова под действием ветра; 2) высота снежного покрова уменьшилась из-за того, что часть снежного покрова растаяла или выпали атмосферные осадки в виде дождя, вследствие чего произошло уплотнение нижележащих слоев снежного покрова под воздействием вышележащих слоев снега (рис. 1).



Рис. 1. Блок схема расчета SWE в модели «SnoWE».

Fig. 1. The block scheme for calculating of SWE in «SnoWE».

Данная технология была разработана в рамках системы численного мезомасштабного моделирования *COSMO-Ru* [4]. Работа одномерной многослойной модели снежного покрова основывается на использовании стандартных метеорологических данных (приземная температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м, высота снежного покрова, осадки), поступающих в синоптическом коде *SYNOP* (рис. 2) по каналам связи Всемирной метеорологической организации, информации полей первого приближения в рамках системы *COSMO-Ru*, данных атмосферного моделирования и информации о его границах (снежная маска). Для получения полей первого приближения о высоте и границах снежного покрова используется система гидродинамического мезомасштабного моделирования *COSMO-Ru* на основе поступающих данных из системы усвоения Немецкой службы погоды (*DWD*). Информация о границе снежного покрова усваивается на основе адаптированной *NOAA* информации ИСЗ с шагом 4×4 км.

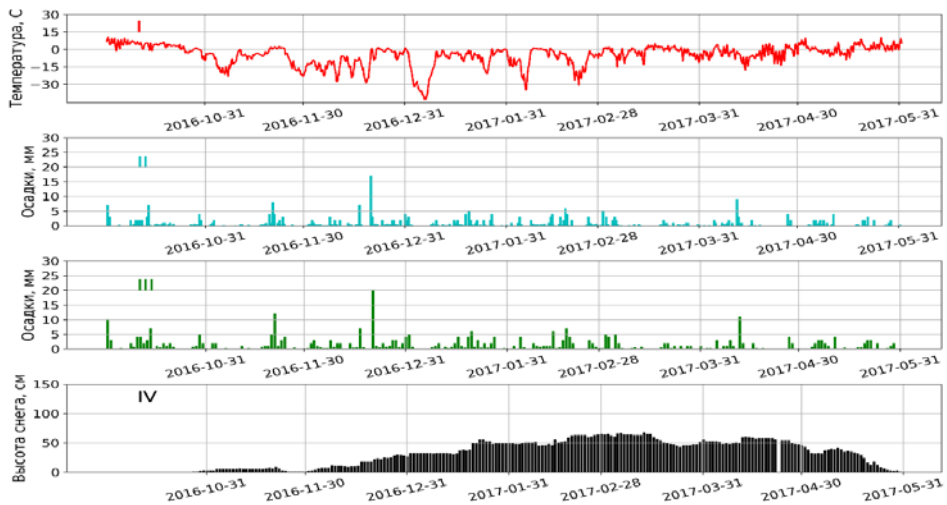


Рис. 2. Метеорологической информации за период с 01.10.17 по 31.05.17 для гидрометеорологической станции Мезень (22471): I – приземная температура воздуха; II – осадки за 12 ч; III – осадки за 24 ч; IV – высота снежного покрова.

Fig. 2. Meteorological information for the time period from 01.10.17 to 31.05.15 for the hydrometeorological station Mezen (22471): I – surface air temperature; II – precipitations for 12 hours; III – precipitations for 24 hours; IV – snow depth.

Работа технологии с 2015 года выполняется в квази-оперативном режиме на сетках модели *COSMO-Ru* для трех регионов Российской Федерации с различным пространственным шагом (Центральный федеральный округ – 2,2 км (ЦФО, *COSMO-Ru2*), Восточно-Европейская равнина – 7 км (ЕТР, *COSMO-Ru7*), Россия – 13,2 км (ЕНА, *COSMO-Ru13*). В работе

использовалась сетка ETR и режим работы «*SnoWE*» для станций, что позволило выполнить расчеты запаса воды в снеге за расчетный период начиная с 2011 года.

В 2016/2017 гг. технология подверглась существенным изменениям и корректировкам, в ходе которых были выполнены следующие нововведения:

1) переработана структура технологической линии. Созданы новые программные модули для загрузки фактических данных, спутниковой информации, интерполяции на результирующую сетку и создан основной расчетный модуль. Создание четко разделенной структуры в работе технологии упрощает процесс работы с моделью «*SnoWE*». Кроме того, появилась возможность изменения программного кода модулей без изменения основного расчетного блока модели;

2) для каждого программного модуля была повышена гибкость настройки (переработан программный код с учетом внедрения гибкого управления параметрами и логикой выполняемых задач), что позволило увеличить стабильность и улучшить качество их работы. За счет предания модульной структуры технологии удалось повысить скорость работы и оптимизировать программный код. Кроме того, стабильность работы модулей позволяет избежать автономных программных сбоев, которые возможны при работе в квази-оперативном режиме;

3) оптимизированный программный код позволил создать инструменты для дальнейшего развития и тестирования технологии.

Выполненные нововведения потребовали дальнейшего тестирования работоспособности «*SnoWE*» и сравнения результатов работы модели с данными международных проектов для территории Российской Федерации. В работе представлены результаты сравнения рассчитанных запасов воды в снежном покрове по данным «*SnoWE*», *GlobSnow*, *GLADAS* с фактическими маршрутными снегомерными наблюдениями.

Для выполнения текущего исследования использовалась возможность счета модели по станциям. В результате удалось запустить модель «*SnoWE*» начиная с 2011 года. Основными трудностями, с которыми пришлось столкнуться при выполнении расчетов за исторический период, являются: 1) отсутствие спутниковых данных (при работе технологии спутниковые данные хранятся только в течение одного зимнего сезона, так как требуется большой объем памяти для хранения такого рода данных); 2) наличие метеорологической информации в базе данных, хранящей информацию в виде *SYNOP* кода (отсутствие в базе данных информации до 2011 г. не позволило рассчитать значения *SWE* и *RHO* за более длительный исторический период); 3) наличие в имеющейся информации грубых ошибок и неточностей (особенно данный фактор характерен для метеорологической станции на водосборе реки Надым). Результатом работы технологии являются временные ряды с информацией о рассчитанных значениях запаса воды в снеге. Кроме того, технология позволяет получать карты

распределения запасов воды в снежном покрове на заданной результирующей сетке для территории Российской Федерации с суточной дискретностью (рис. 3).

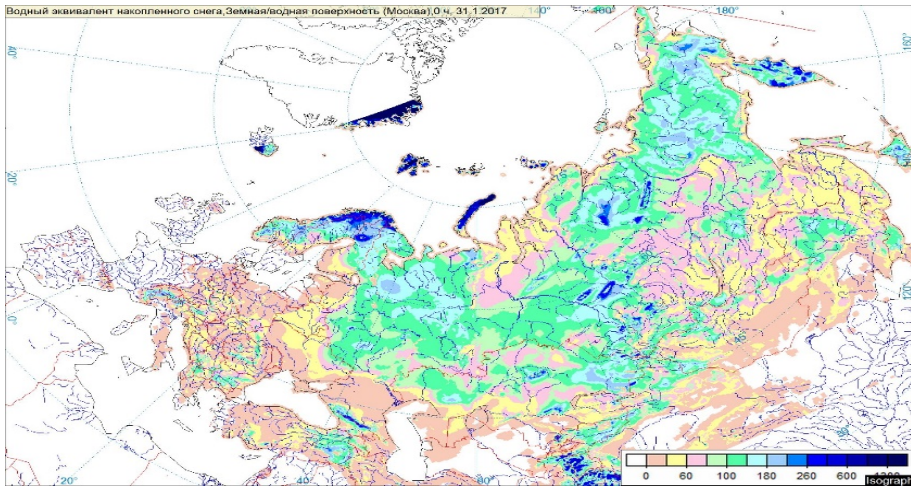


Рис. 3. Пример распределение запаса воды в снеге для всей территории Российской Федерации за 31 января 2017 г. по данным модели «SnoWE», шаг сетки – 13 км.

Fig. 3. The SWE map (mm) for 31.01.2017 – the model data (SnoWE), spatial resolution – 13 km.

3. Сравнение результатов технологии «SnoWE» с данными международных проектов *GlobSnow*, *GLDAS* и маршрутными снегомерными наблюдениями

3.1. Этапы работы

На предварительной стадии работы были выполнены следующие шаги:

1) выбраны речные бассейны для анализа, для каждого речного бассейна на основе цифровой модели рельефа получены его границы и рассчитаны центры тяжести;

2) выбраны международные проекты, предоставляющие информацию о состоянии снежного покрова для Северного полушария, в частности информацию о запасе воды в снеге;

3) собрана и проанализирована фактическая синоптическая информации с метеорологических станций;

4) собраны и проанализированы данные о запасе воды в снежном покрове на основе маршрутных снегомерных наблюдений за период с 1987 по 2017 год.

Основной этап работы заключался в обработке полученных материалов, сравнении данных и анализе полученных результатов. Основной этап работы можно подразделить на несколько направлений в соответствии с типом исходной информации.

1. Работа с фактическими данными.
2. Работа с данными на основе одномерной модели снежного покрова «*SnoWE*».
3. Работа с данными международных проектов *GlobSnow* и *GLADAS*.

3.2. Регионы исследования

Исследование проводилось для европейской части Российской Федерации. В зону исследования вошли водосборы пяти рек: Надым, Северная Двина, Онега, Ока, Дон. Выбранные водосборы рек располагаются в разных климатических условиях на равнинных территориях. Водосборы рек Надым, Онега, Северная Двина расположены на территории с устойчивым снежным покровом и редкими оттепелями в течение зимнего сезона; водосборы рек Ока и Дон – в условиях с частыми оттепелями и крайне неустойчивым снежным покровом. Наибольший интерес при рассмотрении характеристик снежного покрова представлял запас воды в снеге, его плотность и максимальные снегозапасы.

3.3. Работа с фактическими данными

В качестве независимого материала для сравнения результатов вычислений по модели «*SnoWE*», *GlobSnow* и *GLADAS* использовались данные маршрутных снегомерных наблюдений. При выборе метеорологических станций учитывался ряд условий, которые должны быть соблюдены: 1) метеорологическая станция должна производить стационарные наблюдения за снежным покровом в установленные сроки; 2) вблизи метеостанции должны производиться маршрутные снегомерные наблюдения в зимний период с регулярной дискретностью; 3) метеостанция должна передавать информацию в виде синоптического кода *SYNOP* в установленные сроки; 4) станция и маршрут должны быть репрезентативны и учитывать физико-географические условия; 5) модель «*SnoWE*» должна иметь доступ к исходной метеорологической информации на заданной метеостанции для того, чтобы произвести расчет изменения плотности снежного покрова и запаса воды в снеге; 6) информация о работе метеостанции должна быть представлена на веб-ресурсе ВНИИГМИ-МЦД (г. Обнинск). Данные о количестве станций, используемых в работе, представлены в табл. 1.

Для работы с данными маршрутных снегомерных наблюдений был создан программный модуль, написанный на языке *python*, который загружает данные из базы данных ВНИИГМИ-МЦД, расположенной на веб-ресурсе <http://meteo.ru/> и выполняет обработку полученных данных.

Таблица 1. Информация о метеостанциях в районах исследования
Table 1. Information about meteorological stations in the research regions

Территория исследования: водосбор	Количество метеостанций:	Количество метеостанций, отвечающих условиям отбора	Количество маршрутных измерений:	Количество маршрутных измерений, отвечающих условиям отбора
р. Северная Двина	71	18	71	42
р. Онега	8	2	8	4
р. Надым	1	1	1	1
р. Ока	108	22	108	61
р. Дон	73	19	73	27

В рассмотренной БД данные о высоте снежного покрова имеют суточную дискретность, а маршрутные снегомерные наблюдения – 5, 10, 30 дней. На карте (рис. 4) представлены метеостанции, данные наблюдений с которых были использованы в расчетах. В ходе работы программного модуля формируется единый массив данных, содержащий информацию о всех выбранных метеостанциях и постах с информацией о снежном покрове для выбранного водосбора. После создания единого массива с индексацией по дате программный модуль позволяет выполнять усреднение (любой временной шаг).

В данной работе фактические данные приводились к недельной дискретности. После выполнения осреднения по времени происходит выполнение осреднения всех данных по пространству, в результате чего получен конечный ряд данных для водосбора максимальной длины с минимальным количеством пропусков. В дальнейшем полученные ряды данных использовались для формирования сводного массива данных для заданных областей (водосборов рек).

Расположение водосборов в различных климатических условиях позволило выявить недостатки математического алгоритма «*SnoWE*» и наметить дальнейшие шаги по их устранению. В частности, предполагается доработка алгоритма по усвоению свежеснежавшего снежного покрова и перерасчет плотности снежного покрова на последнюю декаду снеготаяния.

Привлечение архивной метеорологической информации о состоянии снежного покрова за длительный временной промежуток позволило наметить основные тенденции в изменении высоты снежного покрова и запаса воды в нем за последние 30 лет.



Рис. 4. Метеорологические станции, данные по которым привлекались в исследовании.

Fig. 4. The meteorological stations data from were applied in the research.

3.4. Работа с результатами международных проектов *GlobSnow* и *GLADAS*

В ходе выполнения работы был произведен поиск проектов, предоставляющих доступ к спутниковой информации (информация о состоянии снежного покрова) для территории Российской Федерации, сделан обзор имеющихся спутниковых проектов и данных, к которым предоставляется доступ, и сделана выборка необходимой информации. При выполнении выборки проектов учитывался ряд параметров: 1) спутниковые данные должны покрывать территорию России; 2) пользователь должен иметь свободный доступ к данным; 3) данные должны покрывать временной период с 1978 по 2017 год. Для сравнения эффективности работы модели «*SnoWE*» использовались данные международных проектов, специализирующихся на учете снежного покрова в Северном полушарии.

В работе использовались данные Финского метеорологического института, в частности, проекта *GlobSnow* (<http://www.globsnow.info/>), и данные проекта *GLADAS* (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/>). Данные проекта *GlobSnow* покрывают территорию от 35° до 85° с. ш. и от 180° з. д. до 180° в. д. Данные, представленные в проекте *GlobSnow*, основаны на работе пассивного микроволнового радиометра *SMMR*, шаг сетки которого

составляет 25×25 км. Временной шаг – 1 день; 1 неделя; 1 месяц [20]. Система *GLADAS* разработана учеными из *NASA*. При создании проекта использовалось новое поколение наземных и космических систем наблюдения, которые предоставляют данные о смоделированном состоянии поверхности суши [20].

В работе технологии выделяются два направления: 1) воздействие «моделей подстилающей поверхности», основанных на метеорологических полях данных; 2) применение техники ассимиляции данных, усвоение реальных наблюдений и их последующее применение для корректировки нереалистичных модельных величин. Для выполнения данной работы использовались два типа данных по проекту *GLADAS*: *GLADAS_NOAH025_M.2.0* и *GLADAS_NOAH025_M.2.1*. Проект *GLADAS* предоставляет возможность мониторинга за 39 гидрометеорологическими параметрами, в том числе и за снежным покровом. Проект покрывает территорию от 85° ю. ш. до 85° с. ш. и от 180° з. д. до 180° в. д., шаг сетки 0,25×0,25 км. Временной шаг – 3 часа; 1 месяц.

Вышеперечисленные проекты предоставляют информацию о состоянии снежного покрова в схожем виде, при этом данные по проекту *GlobSnow* предоставляют информацию в формате *HDF4*, а проект *GLADAS* – в формате *NetCDF*. Отличительной особенностью при работе с проектом *GlobSnow* является метрическая система координат, при работе с которой потребовалось создать отдельный блок усвоения исходной системы координат и конвертации ее в удобный для работы вид. При работе с выбранными проектами реализован схожий алгоритм действий с учетом их индивидуальных особенностей.

Работа с программными продуктами *FMI (GlobSnow)* и *NASA (GLADAS)* была организована через специальный модуль, написанный на языке *python*. Изначально загружались все доступные данные об *SWE*, после чего задавались ограничивающие области (расчетные водоразделы рек, полученные на основе цифровой модели рельефа, <http://gis-lab.info/>), для которых были получены значения *SWE* на конкретную дату. Далее для каждой ограничивающей области определялся центр тяжести водосбора и выполнялось осреднение узлов сетки *SWE* к одной точке (к центру тяжести водосбора).

В результате проделанной работы были сформированы временные ряды данных с информацией о запасе воды в снежном покрове для каждого исследуемого водосбора с индексацией по дате (по пять временных рядов для каждого проекта). Создана собственная БД, которая содержит следующую информацию:

1) временные ряды данных, полученные в результате расчетов по данным проекта *GlobSnow* за период с 1978 по 2016 год;

2) временные ряды данных, полученные в результате расчетов по данным проекта *GLADAS_NOAH025_M.2.0* за период с 1978 по 2010 год;

3) временные ряды данных, полученные в результате расчетов по данным проекта *GLADAS_NOAH025_M.2.1* за период с 2000 по 2017 год;

4) временные ряды данных, полученные в результате расчетов по данным модели «*SnoWE*» за период с 2011 по 2017 год;

5) временные ряды данных на основе маршрутных снегомерных наблюдений, полученные в результате работы с БД ВНИИГИ-МЦД за период с 1978 по 2016 год и дополненные данными, полученными в отделе гидрологии Гидрометцентра России за 2017 год.

4. Результаты и обсуждение

В ходе выполнения работы получены ряды осредненных по бассейнам данных с информацией о состоянии снежного покрова за период с 1987 по 2017 год. В результате работы сформировано три ряда данных на основе спутниковой информации, один ряд на основе результатов работы со «*SnoWE*» и один ряд на основе маршрутных снегомерных наблюдений (в работе данный ряд использовался в качестве независимой характеристики). На основе полученных рядов данных построены графики динамики развития снежного покрова с 1987 года (рис. 5, 6). Следует отметить, что данные по модели «*SnoWE*» получены за период с 2011 по 2017 год. Связано это, прежде всего, с тем, что для корректной работы модели требуются спутниковые данные и архивные материалы. К сожалению, из-за большого объема спутниковых данных, данные хранятся только до 2011 года.

На основе имеющихся рядов данных выполнена статистическая обработка рядов. При выполнении статистической обработки рассчитывался коэффициент корреляции, среднеквадратическое отклонение, средняя ошибка и среднеквадратическая ошибка. Результаты статистической обработки представлены в табл. 2–5.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (r), полученные при сравнении рассчитанных и фактических значений запаса воды в снежном покрове

Table 2. Correlation coefficients (r), obtained by comparing the model SWE data and in-situ SWE data

Исследуемый объект: водосбор	<i>GLADAS NOAH025_M.2.0</i>	<i>GLADAS NOAH025_M.2.1</i>	<i>GlobSnow</i>	<i>SnoWE</i>
р. Дон	0.526	0.712	–	0.632
р. Ока	0.704	0.888	0.080	0.923
р. Онега	0.519	0.812	0.099	0.641
р. Северная Двина	0.659	0.824	0.226	0.895
р. Надым	0.743	0.813	0.088	0.826

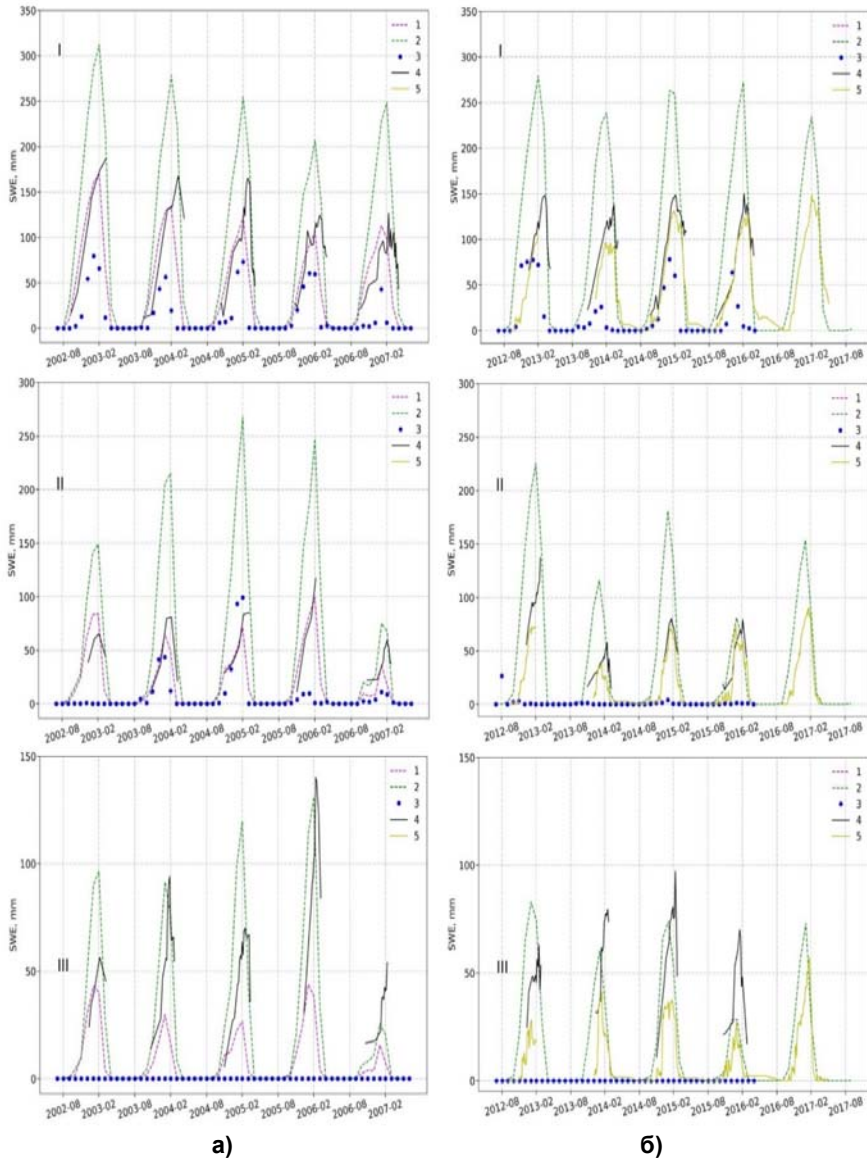


Рис. 5. Графики сравнения рассчитанных и фактических значений запаса воды в снежном покрове (SWE) для различных водосборов: I – р. Северная Двина; II – р. Ока; III – р. Дон за определенный временной период: а) с 01.08.2002 по 01.07.2007; б) с 01.08.2012 по 01.10.2017; 1 – GLADAS 1987 – 2010; 2 – GLADAS 2000 – 2017; 3 – GlobSnow; 4 – маршрутные снегомерные наблюдения; 5 – SnoWE.

Fig.5. Comparison charts of the model and real values of SWE for different catchments: I – the Northern Dvina river; II – the Oka river; III – the Don river for time period: а) from 01.08.2002 to 01.07.2007; б) from 01.08.2012 to 01.10.2017; 1 – GLADAS 1987 – 2010; 2 – GLADAS 2000 – 2017; 3 – GlobSnow; 4 – in-situ data; 5 – SnoWE.

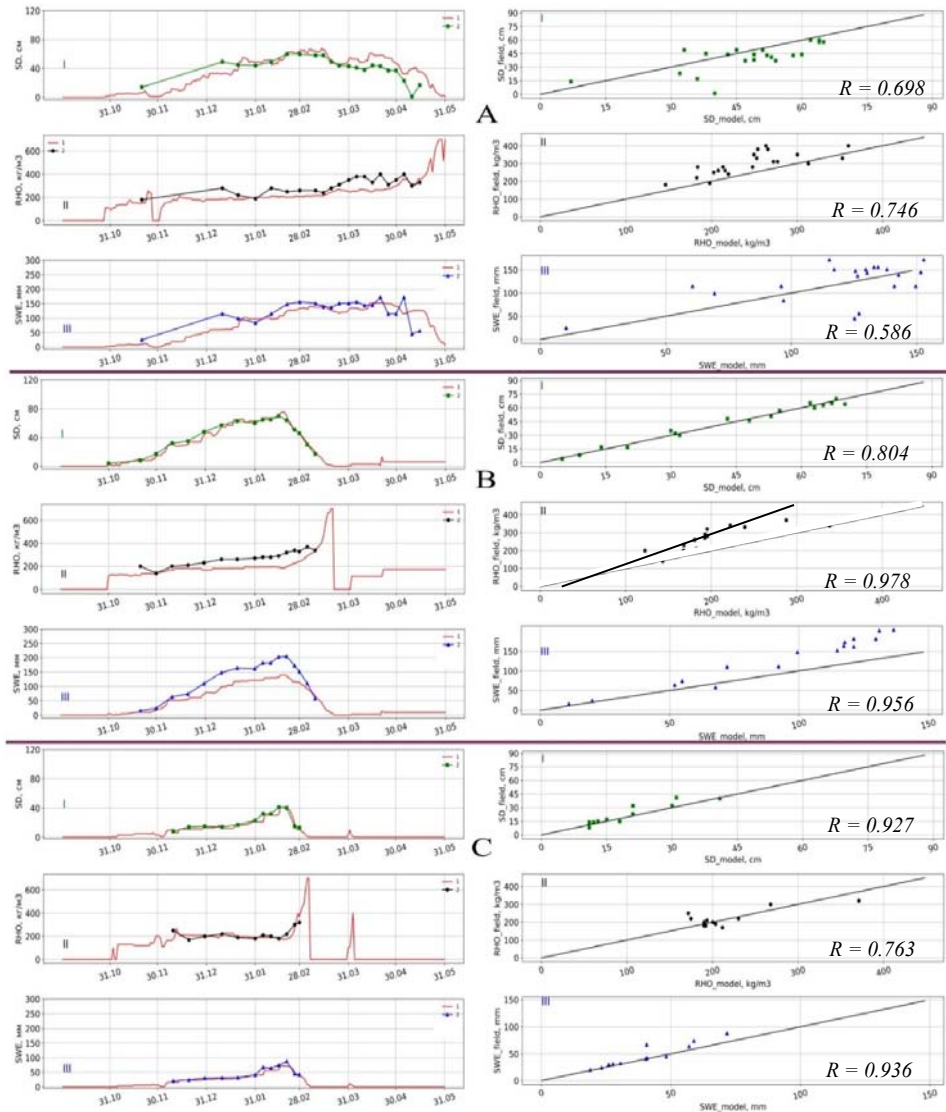


Рис. 6. Графики сравнения рассчитанных и фактических значений: I – высота снежного покрова; II – плотность снежного покрова; III – запасы воды в снежном покрове; на метеорологических станциях в бассейнах рек в течении зимнего сезона 2016/17 года: метеорологическая станция Мезень – водосбор р. Северная Двина (А); метеорологическая станция Мичуринск – водосбор р. Ока (Б); метеорологическая станция Калач – водосбор р. Дон (С); 1 – *SnoWE*; 2 – маршрутные снегомерные наблюдения.

Fig.6. Comparison charts of the model and real values of SWE for different catchments: I – snow depth; II – snow density; III – SWE; on the meteorological stations in the river basins in winter time 2016/17 year: A) The meteorological station Mezen; B) The meteorological station Michurinsk; C) The meteorological station Kalach; 1 – *SnoWE*; 2 – in-situ data.

Таблица 3. Среднеквадратические отклонения (σ , мм), полученных при сравнении рассчитанных и фактических значений запаса воды в снежном покрове

Table 3. Standard deviation (σ , mm), obtained by comparing the model SWE data and in-situ SWE data

Исследуемый объект: водосбор	GLADAS NOAH025_M.2.0	GLADAS NOAH025_M.2.1	GlobSnow	SnoWE
р. Дон	26.6	33.0	–	23.9
р. Ока	29.1	67.6	33.2	23.9
р. Онега	53.9	73.9	58.0	41.5
р. Северная Двина	50.1	78.4	53.0	40.0
р. Надым	56.9	95.7	68.3	60.0

Таблица 4. Средняя ошибка (мм), полученная при сравнении рассчитанных и фактических значений запаса воды в снежном покрове

Table 4. Bias values, obtained by comparing the model SWE data and in-situ SWE data

Исследуемый объект: водосбор	GLADAS NOAH025_M.2.0	GLADAS NOAH025_M.2.1	GlobSnow	SnoWE
р. Дон	-29.3	5.33	–	-34.0
р. Ока	-10.8	61.4	-46.7	-14.8
р. Онега	-28.3	62.1	-82.9	-28.1
р. Северная Двина	-22.9	63.9	-67.8	-22.6
р. Надым	-41.3	96.2	-102	-7.08

Таблица 5. Среднеквадратические ошибки (RMSE, мм), полученные при сравнении рассчитанных и фактических значений запаса воды в снежном покрове

Table 5. Root mean square deviation, obtained by comparing the model SWE data and in-situ SWE data

Исследуемый объект: водосбор	GLADAS NOAH025_M.2.0	GLADAS NOAH025_M.2.1	GlobSnow	SnoWE
р. Дон	37.3	27.5	–	37.8
р. Ока	24.5	81.9	56.7	17.3
р. Онега	58.3	79.0	99.4	43.3
р. Северная Двина	46.3	85.7	84.8	28.6
р. Надым	57.7	115	120	35.6

На основании полученных результатов для водосборов исследуемых рек можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее сложным для точного расчета характеристик снежного покрова является водосбор реки Дон с неустойчивым снежным покровом. Для данного водосбора характерно занижение рассчитанных значений запаса воды в снежном покрове, что может быть связано с частыми оттепелями, и, как следствие, неправильным учетом плотности снежного покрова.

2. Наилучшие результаты были получены для водосборов рек Северная Двина и Ока. Прежде всего, данные результаты могут быть связаны с тем, что эти водосборы имеют наибольшую площадь из исследуемых объектов. Перечисленные регионы не являются труднодоступными и сеть наблюдений за снежным покровом представлена наиболее густо. Для моделей доступно больше всего фактической информации для исходной калибровки. Кроме того, на водосборе реки Северная Двина наблюдается наиболее устойчивый снежный покров в течение зимнего периода времени. Однако, при работе с данным водосбором наблюдается значительное влияние растительности. Для водосбора реки Ока наблюдается обратная ситуация, и наибольшее влияние на качество полученных результатов оказывают частые оттепели.

3. На точность расчета характеристик снежного покрова на водосборе реки Онега сильно влияет лесная растительность; кроме того, все маршрутные снегомерные наблюдения производятся на лесных маршрутах. Таким образом, ни один из исследуемых проектов не предоставляет удовлетворительных результатов. Это заставляет нас задуматься о том, что в модели «*SnoWE*» блок по учету влияния леса на снежный покров недостаточно развит и требует дальнейшего усовершенствования.

4. На водосборе реки Надым представлена только одна метеорологическая станция, производящая наблюдения за состоянием снежного покрова, поэтому для моделей недостаточно фактических данных для первичной калибровки. Для водосбора реки Надым получены самые неудовлетворительные результаты по всем проектам.

Наилучшие результаты для территории Российской Федерации достигаются при выполнении расчетов по модели «*SnoWE*». Следует также принять во внимание, что модель сравнивалась с фактическими данными наблюдений только за последние 6 лет, что, безусловно, требует дополнительного тестирования технологии. Исходя из визуальной оценки полученных статистических характеристик можно сделать вывод о том, что данная модель наиболее точно описывает динамику развития состояния снежного покрова в зимний период года.

Наибольшие ошибки по «*SnoWE*» зафиксированы на водосборах рек Онега и Надым. Ошибки вызваны рядом факторов: 1) технология недостаточно хорошо учитывает снежный покров в лесу; 2) сеть наблюдений за снежным покровом на территории этих водосборов редкая, особенно

это касается водосбора реки Надым (на водосборе реки находится только одна метеорологическая станция, выполняющая наблюдения за снежным покровом.). Кроме того, установлено, что, чем меньше метеорологических станций участвует в расчетах (счет для станций), тем больше среднеквадратическая ошибка и отклонение (например, для водосборов рек Онега и Надым в расчетах использовалось три и одна метеорологическая станция соответственно). В целом, модель занижает полученные значения восстановленных *SWE* на 21,3 мм. В условиях с устойчивым снежным покровом модель работает практически безошибочно и точно воспроизводит снежный покров; в условиях с неустойчивым снежным покровом (водосбор реки Дон) модель довольно точно воспроизводит ход накопления снеготпасов и их стаивание, при этом занижает полученные значения практически в два раза.

Проект *GLADAS_NOAH025_M.2.0* на текущий момент времени является закрытым. Расчеты по проекту *GLADAS_NOAH025_M.2.0* показали лучшие результаты, чем расчеты по его последующей версии, при этом рассчитанные значения занижали оценки *SWE* и недостаточно хорошо воспроизводили динамику развития снежного покрова. Отметим, что до 2010 года этот проект является лучшим из рассмотренных и может быть применен для использования в расчетах для метеорологических станций с устойчивым снежным покровом (в том случае, если данные маршрутных снегомерных наблюдений отсутствуют). Данный вывод сделан на основе сравнения полученных материалов и их оценки.

Проект *GLADAS_NOAH025_M.2.1* является единственным из рассмотренных проектов, данные которого завышают значения полученных результатов, при этом довольно точно воспроизводят максимальные значения снеготпасов. При оценке результатов проекта наиболее точные значения *SWE* наблюдаются в условиях неустойчивого снежного покрова (бассейн реки Дон), при этом в случаях с устойчивым снежным покровом наблюдается значительное завышение восстановленных снеготпасов. Полученные по проекту значения о запасае воды в снежном покрове не рекомендуется применять для расчетных целей, но они могут использоваться для получения первичной информации для бассейнов рек с неустойчивым снежным покровом. Для оценки возможности использования данного проекта в бассейнах рек с устойчивым снежным покровом требуется проведение дополнительных испытаний.

Результаты расчетов характеристик снежного покрова по проекту *FMI GlobSnow* оказались неудовлетворительными. Кроме того, данный проект не работает для водосбора реки Дон. Для территории России проект *GlobSnow* применять не рекомендуется. В связи с тем, что на веб-ресурсе ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/>) на момент написания статьи отсутствовали данные о состоянии снежного покрова за зиму 2016/2017 гг., для выполнения контрольных вычислений по модели «*SnoWE*» была привлечена дополнительная информация.

Заключение

На настоящий день в целях ежедневной оценки запаса воды в снежном покрове для территории Российской Федерации доступны следующие источники данных: 1) данные проекта *GlobSnow*; 2) данные проекта *GLADAS*; 3) данные на основе технологии «*SnoWE*». Среди них выделяется функционирующая в режиме реального времени система на основе одномерной модели снежного покрова «*SnoWE*», разработанная в Гидрометцентре России. Система является наиболее точным и технологически адаптированным источником данных с высокой пространственно-временной детализацией для задач мониторинга ежедневного снежного покрова.

Следует также отметить, что модель снежного покрова «*SnoWE*» в дальнейшем будет развиваться по нескольким направлениям: изменение физического блока модели (усовершенствование усвоения метаморфизма снежного покрова), улучшение работоспособности модели для лесных водосборов, применение спутниковых данных с более высоким разрешением. Необходимость более полного учета процессов при таянии снежного покрова усиливается тем фактом, что высота снежного покрова за последние 30 лет непрерывно уменьшается. Наблюдается большое количество оттепелей в зимний период года, и территория с устойчивым снежным покровом в течение зимнего периода, где моделирование характеристик снега производится с наименьшими ошибками, сокращается.

Привлечение информации о состоянии снежного покрова для территории Российской Федерации по данным космического мониторинга Земли возможно, но на предварительной стадии привлечения такого рода информации требуется тщательная проверка с натурными наблюдениями на станциях. В случае отсутствия данных наблюдений возможно привлечение метеостанций-аналогов.

В ходе проделанной работы было установлено, что в период с 1987 по 2010 год наилучший результат показал проект *GLADAS_NOAH025_M.2.0*.

За предоставление данных маршрутных снегомерных наблюдений за 2016/2017 гг. авторы выражают благодарность С. В. Борщу и Ю. А. Симонову.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-05-00753-а) (разделы 1 и 3) и РНФ (№14-37-00053-П) (раздел 2).

Список литературы

1. Борщ С.В., Симонов Ю.А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 58-79.
2. Казакова Е.В. Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды COSMO-Ru : Дис. ... канд. ф.-мат. М.: Гидрометцентр России, 2015.

3. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Модель для расчета характеристик снежного покрова на основе данных наблюдений стандартной метеорологической сети // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 352. С. 85-102.
4. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Система расчетов характеристик снежного покрова для формирования начальных полей при численном моделировании погоды (на примере COSMO-Ru) // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 20-33.
5. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели. М.: Наука, 1983. 230 с.
6. Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. Исследование возможности моделирования стока северных рек с использованием глобальных баз данных // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2011. № 2. URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2011-2/Articles/69.pdf>
7. Негидростатическая система Гидрометцентра России мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru / Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Перов В.Л., Суркова Г.В., Алферов Д.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: Труды Международной конференции, посвященной памяти академика А.М. Обухова М: ГЕОС, 2014. С. 265-273.
8. Рихтер Г.Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе (Труды Института географии АН СССР; Вып. 40). М.; Л.: Из-во АН СССР, 1948. 171 с.
9. 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.
10. Deems J.S., Painter T.H. Lidar measurement of snow depth: accuracy and error sources // Proc. 2006 International Snow Science Workshop: Telluride, Colorado, USA, International Snow Science Workshop, 2006. P. 330-338.
11. Durand M., Singh V.P., Haritashya U.K. Snow Water Equivalent // Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers (Encyclopedia of Earth Sciences Series). Dordrecht: Springer, 2011. P. 170-171.
12. Garvelmann J., Pohl S., Weiler M. From observation to the quantification of snow processes with a time-lapse camera network // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2013. No. 17. P. 1415-1429.
13. Gutmann E.D., Larson K.M., Williams M.W., Nevinski F.G., Zavorotny V. Snow Measurement by GPS Interferometric Reflectometry: An Evaluation at Niwot Ridge, Colorado // Hydrol. Process. 2012. No. 26. P. 2951-2961.
14. Harpold A.A., Guo Q., Molotch N., Brooks P., Bales R., Fernandez-Diaz J.C. LiDAR derived snowpack dataset from mixed conifer forests in the Western United States // Water Resour. Res. 2014. Vol. 50, no. 3. P. 2749-2755. DOI: 10.1002/2013WR013935
15. McCreight J.L., Small E.E. Modeling bulk density and snow water equivalent using daily snow depth observations // The Cryosphere. 2014. Vol. 8. P. 521-536.
16. Parajka J., Haas P., Kirnbauer R., Jansa J., Blöschl G. Potential of time-lapse photography of snow for hydrological purposes at the small catchment scale // Hydrol. Process. 2012. Vol. 26. P. 3327-3337.
17. Prokop A., Schirmer M., Rub M., Lehning M., Stocker M. A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes // Ann. Glaciol. 2008. Vol. 49. P. 210-216.
18. Ryan W.A., Doesken N.J., Fassnacht S.R. Evaluation of ultrasonic snow depth sensors for US snow measurements // J. Atmos. Ocean. Technol. 2008. Vol. 25. P. 667-684.
19. Saloranta T.M. Simulating snow maps for Norway: description and statistical evaluation of the seNorge snow model // The Cryosphere. 2016. Vol. 6. P. 1323-1337.
20. Snow process modeling in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Evaluation of model simulated snow water equivalent // J. Geoph. Res. 2003. Vol. 108. P. 1220-1235.

References

1. Borsch S.V., Simonov Y.A. Operativnaya sistema kratkosrochnykh gidrologicheskikh prognozov raskhoda vody na rekakh basseina Kubani [Operational water discharge short-range forecasting system for the Kuban basin rivers]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2014, vol. 349, pp. 58-79 [in Russ.].
2. Kazakova E.V. Ezhednevnyaya otsenka lokal'nykh znachenii i ob'ektivnyi analiz kharakteristik snezhnogo pokrova v ramkakh sistemy chislennogo prognoza pogody COSMO-Ru: Dis. ... kand. f.-mat. Nauk. Moscow: Hydrometcentre of Russia Publ., 2015 [in Russ.].
3. Kazakova E.V., Chumakov M.M., Rozinkina I.A. Model' dlya rascheta kharakteristik snezhnogo pokrova na osnove dannykh nablyudeniia standartnoi meteorologicheskoi seti [Model for snow cover characteristics calculation based on standard net meteorological observations]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2014, vol. 352, pp. 85-102. [in Russ.].
4. Kazakova E.V., Chumakov M.M., Rozinkina I.A. The system for computing snow cover parameters for forming initial fields for numerical weather prediction based on the COSMO-Ru model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 5, pp. 296-304.
5. Kuchment L.S., Demidov V.N., Motovilov Yu.G. Formirovanie rechnogo stoka. Fiziko-matematicheskie modeli. Moscow: Nauka Publ., 1983, 230 p. [in Russ.].
6. Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev E.E. Issledovanie vozmozhnosti modelirovaniya stoka severnykh rek s ispol'zovaniem global'nykh baz dannykh [Investigating the ability of modeling the northern river runoff using global data sets]. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2011, no. 2, available at: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2011-2/Articles/69.pdf> [in Russ.].
7. Vil'fand R.M., Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Perov V.L., Surkova G.V., Alferov D.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. Negidrostaticheskaya sistema Gidromettsentra Rossii mezomasshtabnogo kratkosrochnogo prognoza pogody COSMO-Ru. *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata: Proc. Mezhdunarodnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika A.M. Obukhova*. Moscow: GEOS, 2014, pp. 265-273 [in Russ.].
8. Rikhter G.D. Rol' snezhnogo pokrova v fiziko-geograficheskom protsesse (Trudy Instituta geografii AS SSSR; vol. 40). Moscow; Leningrad: Из-во AS SSSR Publ., 1948, 171 p. [in Russ.].
9. Shmakin A.B., Turkov D.V., Mikhailov A.Yu. Model' snezhnogo pokrova s ucheto sloistoi struktury i ee sezonnoi evolyutsii. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, no. 4, pp. 69-79. [in Russ.].
10. Deems J.S., Painter T.H. Lidar measurement of snow depth: accuracy and error sources. Proc. 2006 International Snow Science Workshop: Telluride, Colorado, USA, International Snow Science Workshop, 2006, pp. 330-338.
11. Durand M., Singh V.P., Haritashya U.K. Snow Water Equivalent. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers (Encyclopedia of Earth Sciences Series)*. Dordrecht: Springer, 2011, pp. 170-171.
12. Garvelmann J., Pohl S., Weiler M. From observation to the quantification of snow processes with a time-lapse camera network. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013, no. 17, p. 1415-1429.
13. Gutmann E.D., Larson K.M., Williams M.W., Nievinski F.G., Zavorotny V. Snow Measurement by GPS Interferometric Reflectometry: An Evaluation at Niwot Ridge, Colorado. *Hydrol. Process*, 2012, no. 26, pp. 2951-2961.
14. Harpold A.A., Guo Q., Molotch N., Brooks P., Bales R., Fernandez-Diaz J.C. LiDAR derived snowpack dataset from mixed conifer forests in the Western United States. *Water Resour. Res.*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 2749-2755, DOI: 10.1002/2013WR013935
15. McCreight J.L., Small E.E. Modeling bulk density and snow water equivalent using daily snow depth observations. *The Cryosphere*, 2014, vol. 8, pp. 521-536.
16. Parajka J., Haas P., Kirnbauer R., Jansa J., Blöschl G. Potential of time-lapse photography of snow for hydrological purposes at the small catchment scale. *Hydrol. Process*, 2012, vol. 26, pp. 3327-3337.

17. Prokop A., Schirmer M., Rub M., Lehning M., Stocker M. A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes. *Ann. Glaciol.*, 2008, vol. 49, pp. 210-216.

18. Ryan W.A., Doesken N.J., Fassnacht S.R. Evaluation of ultrasonic snow depth sensors for US snow measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2008, vol. 25, pp. 667-684.

19. Saloranta T.M. Simulating snow maps for Norway: description and statistical evaluation of the seNorge snow model. *The Cryosphere*, 2016, vol. 6, pp. 1323-1337.

20. Snow process modeling in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Evaluation of model simulated snow water equivalent. *J. Geoph. Res.*, 2003, vol. 108, pp. 1220-1235.

Поступила в редакцию 15.04.2018 г.

Received by the editor 15.04.2018.