

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.578.46

doi:10.15356/2076-6734-2016-3-369-380

Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области

© 2016 г. Д.В. Турков*, В.С. Сократов

Институт географии РАН, Москва
*turkovdv@yandex.ru

Calculating of snow cover characteristics on a plain territory using the model SPONSOR and data of reanalyses (by the example of Moscow region)

D.V. Turkov*, V.S. Sokratov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
*turkovdv@yandex.ru

Received 14 April, 2016

Accepted May 19, 2016

Keywords: meteorological reanalysis, Model SPONSOR, simulation of snow mass, snow depth, spatial distribution of snow cover, water equivalent.

Summary

The technique for calculating the snow cover characteristics (a water equivalent and a snow cover thickness) with high spatial and time resolution on spacious plains is proposed. The model SPONSOR of local heat- and moisture exchange (Land-Surface Model, LSM) and data of reanalyses NCEP/DOE and ECMWF ERA-Interim were used for calculations. The above characteristics of the snow cover on the test area of the Moscow region were calculated using this method over the period 1979–1996. The results were compared with actual data of the snow gauge stations and with data on snow cover, derived directly from reanalysis. The data from the NCEP/DOE reanalysis did not show satisfactory agreement with data of the observations for both the water equivalent and the thickness (Fig. 1, б and Fig. 2, б): deviations reached 60–70%. Monthly mean values of snow water equivalent from the ERA-Interim reanalysis were in a good agreement with the observations, but the snow thicknesses were reproduced much worse. At the same time, using the LSM SPONSOR with input meteorological data from the reanalyses allowed obtaining the snow cover characteristics which were in a good agreement with data of the observations for both the monthly means and individual daily values. The correlation coefficients with the data of snow gauge surveys increased, on the average, up to 0.83–0.89 for the water equivalent, and up to 0.85–0.91 for the snow depth (see the Table in the text). Especially good results were obtained when meteorological data from the ERA-Interim reanalysis were used together with the LSM SPONSOR (Fig. 1, д and Fig. 2, д). It allows us to conclude that meteorological data from the ERA-Interim reanalysis together with data of regular observational network can be used as an additional source of information for calculations of the snow characteristics. This conclusion is especially important for areas with sparse network of regular observations.

Поступила 14 апреля 2016 г.

Принята к печати 19 мая 2016 г.

Ключевые слова: моделирование водного эквивалента снега, модель SPONSOR, реанализ, толщина и пространственное распределение снежного покрова.

Предложена методика расчёта характеристик снежного покрова с высоким пространственным и временным разрешением с использованием модели локального теплообмена (Land-Surface Model, LSM) SPONSOR и метеоданных реанализов NCEP/DOE и ECMWF ERA-Interim. Выполнены расчёты для тестового региона Московской области за период 1979–1996 гг. и проведено сравнение с данными наблюдений и реанализа. Данные о снежном покрове из реанализа существенно отличаются от данных наблюдений. Использование модели SPONSOR с входными метеоданными, взятыми из реанализа ECMWF ERA-Interim, позволяет получить характеристики снежного покрова с высоким пространственным и временным разрешением, которые хорошо согласуются с данными наблюдений.

Введение

Развитие методов получения достоверной информации о снежном покрове с высоким пространственным и временным разрешением на обширных территориях приобретает большое значение в связи с высокой естественной пространственно-временной изменчивостью снежного покрова и его быстрыми направленными изменениями под действием меняющегося климата. Благодаря экстремальным теплофизическим характеристикам, большой изменчивости параметров и продолжительности залегания на обширных площадях суши снежный покров влияет практически на все процессы взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью умеренных и высоких широт в холодное время года [1–3]. Влияние потепления климата на снежный покров (более ранний сход снега, уменьшение периода с устойчивым снежным покровом) может привести к серьёзному воздействию на естественные и антропогенные системы. Снежный покров в горных районах и на равнинах, в регионах с умеренным климатом весьма чувствителен к температурным флуктуациям, поэтому такие регионы наиболее вероятно пострадают от возможного усиления снеготаяния [4, 5]. Изменения в режиме снегонакопления и снеготаяния влияют на водные ресурсы (изменение уровня весеннего половодья, увеличение потенциала для испарения) и отрасли экономики, зависящие от них. К ним относятся гидроэнергетика и сельское хозяйство [6].

В настоящее время основной источник информации о снежном покрове — данные сети метеонаблюдений. На станциях регулярной сети в основном измеряется только толщина снежного покрова, измерения же водного эквивалента методом маршрутных снегосъёмок проводятся только на специализированных станциях, неравномерно расположенных по территории России: при достаточно высокой плотности станций на Европейской России (особенно в её южной части) их намного меньше на севере России, в Сибири и на Дальнем Востоке. Методика выполнения снегомерных съёмок описана, например, в работе [7], там же приведены карты с расположением станций наблюдений за снежным покровом. Кроме того, ряды параметров снежного покрова, полученные на станциях снегомерных съёмок, часто имеют разную продолжительность и перерывы, что требует до начала их использования привлечения методов восстановления непрерывности и однородности ряда. Кроме того, при переходе от наблюдений в точке к пространствен-

ному распределению свойств снега на обширных территориях следует использовать методы интер- и экстраполяции, имеющие ограниченную точность, особенно в случае редкой сети станций [8].

Один из способов восполнения отсутствующей информации, особенно для обширных площадей, — использование спутниковых данных [5, 9]. Однако их качество в области получения дополнительной информации о толщине и водном эквиваленте снежного покрова невысокое [10]. Другой путь получения дополнительной информации о свойствах снежного покрова — привлечение методов моделирования. Разработано достаточно много численных моделей снежного покрова. Некоторые из них весьма сложны и учитывают большинство физических процессов в снежной толще на кристаллическом и/или молекулярном уровне [11, 12 и др.]. Снежный покров, как правило, моделируется вместе с гидротермическим режимом почвы, а нередко и с учётом сезонной динамики растительности. В наиболее продвинутые модели снежного покрова встроены процедуры выделения специфических слоёв снега (ледяные корки, глубинная изморозь и т.д.) и их эволюция в течение сезона.

В большинстве современных моделей климата используются упрощённые схемы расчёта характеристик снежного покрова; набор описываемых процессов и подробность их описания диктуются поставленными задачами [13–20 и др.]. Подробный обзор и сравнение моделей снежного покрова (как автономных, так и интегрированных в модели климата) приведены в работе [2]. Важным этапом в развитии численного моделирования снежного покрова стал Международный эксперимент по сравнению моделей снежного покрова SnowMIP [18, 21], в процессе которого было показано, что при наличии входных метеоданных высокого качества многие современные модели снежного покрова способны удовлетворительно воспроизвести характеристики снега (прежде всего его толщину и водный эквивалент) в разных природных зонах. Именно развитие системы знаний о физических закономерностях формирования и методах моделирования снежного покрова позволяет рассчитать его характеристики на основе данных регулярной сети метеонаблюдений — более густой по сравнению с сетью станций снегомерных съёмок. Вместе с тем в информации, поставляемой регулярной сетью, отсутствуют некоторые важные для работы моделей данные, а именно: потоки коротко- и длинноволновой радиации. Их следует восполнять из других источников.

Ещё один источник метеоданных, используемых в качестве входных параметров для работы

моделей снежного покрова, — современные реанализы высокого пространственно-временного разрешения. Преимущество реанализов состоит в полноте и однородности предоставляемых данных (включая солнечную и длинноволновую радиацию), в глобальном охвате, включая области с недостаточной регулярной сетью метеостанций. Последним версиям свойственно высокое пространственное (до $0,75^\circ$ по широте и долготе) и временное (до шести часов) разрешение. Однако данные реанализов содержат определённые ошибки. Со временем, правда, реанализы совершенствуются, а методы усвоения данных постоянно обновляются, исправляются и ошибки более ранних версий. Реанализы, кроме данных о характеристиках атмосферы, позволяют получать сведения и о свойствах поверхности, в том числе о снежном покрове. Качество таких данных также требует специальной оценки.

Цель данного исследования — разработка методики получения информации о снежном покрове на обширных территориях суши (в том числе с недостаточным объёмом данных регулярной сети наблюдений) с высоким пространственно-временным разрешением на основе использования модели локального тепловлагообмена SPONSOR и современных реанализов, дополняющих имеющиеся сведения о снежном покрове. Дополнительный результат настоящей работы — анализ качества данных о снежном покрове, предоставляемых реанализом.

Модель SPONSOR

Численная модель тепловлагообмена на суше (Land-Surface Model, LSM) SPONSOR разработана в лаборатории климатологии Института географии РАН под руководством А.Б. Шмакина. Она участвовала во многих международных экспериментах по сравнению подобных моделей [20, 22 и др.]. Модель SPONSOR позволяет рассчитывать все составляющие теплового и водного баланса на суше, а также переменные характеристики: эффективную температуру поверхности ландшафта; температуру в почве и её влагосодержание; количество замёрзшей воды в почве; альбедо и т.д. Все перечисленные параметры рассчитываются на каждом шаге по времени, который может составлять от нескольких минут до суток и зависит от поставленной задачи, но для адекватного воспроизведения суточного хода шаг должен составлять не более шести часов. При работе модели требуется на каждом шаге задавать значения нескольких метеорологических перемен-

ных (температура и влажность воздуха, скорость ветра, осадки, поток радиации и т.д.). Также необходимо задавать ландшафтные параметры, часть из которых может иметь сезонный ход. Эти параметры связаны с типом растительности или с типом почвы в каждой ячейке суши. Задаются также (в качестве нижних граничных условий по теплу и влаге) значения глубинной температуры грунта и глубины залегания грунтовых вод. Число и толщина расчётных уровней в почве могут меняться; в данной работе использована семиуровневая версия. Детальное описание модели SPONSOR приведено в работах [19, 23, 24].

К числу параметров и переменных, рассчитываемых моделью на каждом шаге по времени, для блока расчёта характеристик снежного покрова относятся следующие:

1) *переменные состояния системы «почва—растительность»*: эффективная температура поверхности ландшафта, взаимодействующей с атмосферой (растительности или почвы, либо снега); температура поверхности почвы под снегом (при его наличии); температура в почве на всех расчётных уровнях; влагосодержание почвы в жидком и твёрдом виде на всех расчётных уровнях; количество осадков, перехваченных растительностью;

2) *параметры переноса тепла и влаги, фазовых переходов*: турбулентные потоки явного и скрытого тепла в приземном слое атмосферы; поток тепла в подстилающую поверхность (почву или снег); потоки тепла между расчётными уровнями в почве; таяние и замерзание воды в почвенных слоях; потоки воды между слоями почвы; сток воды из почвенной колонки.

Модель снежного покрова

В модель SPONSOR модель снежного покрова включена в качестве отдельного блока. Основная структурная единица модели снежного покрова — слой снега. Считается, что в общем случае на каждом шаге по времени при наличии твёрдых осадков формируется отдельный слой снега с определёнными начальными свойствами. В дальнейшем под воздействием различных процессов свойства слоя плавно или скачкообразно изменяются. При росте снежной толщи соседние слои одного типа, близкие по свойствам, могут объединяться. При вычислениях снежный покров рассматривается как многослойная среда, каждый слой которой характеризуется температурой, массой (водным эквивалентом), толщиной, плотностью, влажностью,

фазовым состоянием содержащейся воды, теплоёмкостью, теплопроводностью и максимальной водоудерживающей способностью.

Модель снежного покрова включает в себя описание процессов, вносящих наибольший вклад в формирование теплофизических характеристик снега, важных для описания взаимодействия снежного покрова с атмосферой и почвой. К ним относятся: образование нового слоя снега; изменение плотности слоёв снега в результате вязкого и ветрового уплотнения; изменение температуры слоёв снега вследствие теплообмена с атмосферой и почвой, а также поглощения солнечной радиации и фазовых переходов воды в толще снега; испарение, в том числе метелевое по схеме А.К. Дюнина [25]; таяние, перенос талой воды и её вторичное замерзание; изменение влажности снега в результате таяния и просачивания талой воды в толщу, а также поглощения жидких осадков; изменение альбедо снега и свойств снега при смене типа слоёв. Для определения изменений температуры важную роль играет корректное описание изменяющейся теплопроводности и теплоёмкости снега.

В данной версии модели не рассматриваются процессы газообмена и испарения в толще снега, взаимодействия снега с растительностью в толще снега, а также взаимодействия снега с примесями (пыль, химические соединения и т.п.). Кроме того, процессы изменения кристаллической структуры снега и переноса солнечной радиации в толще описываются упрощённо. Набор процессов, включаемых в модель, а также детальность их описания выбирались нами, чтобы соблюсти баланс между сложностью (и ресурсоёмкостью) модели и качеством вычисления характеристик снежного покрова, в наибольшей степени влияющих на особенности взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью.

Метод расчёта вязкого уплотнения сухого снега приведён в статье [26]. Коэффициент компрессионной вязкости η (Па·с) вычисляется по формуле

$$\eta = C\rho^a,$$

где $C = 0,392 \text{ Па}\cdot\text{с}\cdot(\text{кг}/\text{м}^3)^{-a}$; ρ – плотность сухого снега, $\text{кг}/\text{м}^3$; $a \approx 4$ – эмпирические параметры.

Температура поверхности снега рассчитывается с помощью уравнения теплового баланса верхнего бесконечно тонкого слоя:

$$S_0(1 - \alpha_{sn}) - S(z) + R + H_s + L_v E_s + B = 0,$$

где S_0 – интенсивность падающей коротковолновой радиации, $\text{Вт}/\text{м}^2$; α_{sn} – альбедо поверх-

ности, доли ед.; $S(z)$ – интенсивность радиации, проникшей в глубь снега, $\text{Вт}/\text{м}^2$; R – баланс длинноволновой радиации, $\text{Вт}/\text{м}^2$; H_s и $L_v E_s$ – соответственно турбулентные потоки явного и скрытого тепла, $\text{Вт}/\text{м}^2$; B – кондуктивный поток тепла в снег, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Уравнение, нелинейное относительно температуры поверхности, решается методом итераций. Процессы теплообмена и изменения температуры внутри толщи снега описываются уравнением

$$\rho_{sn} C_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial z} + L_i F_{sn}(z) + S(z), \quad (1)$$

где z – глубина, м; T_{sn} – температура снега, К; ρ_{sn} – плотность снега, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_{sn} – теплоёмкость снега, $\text{Дж}/\text{кг}/\text{К}$; λ_{sn} – коэффициент теплопроводности снега, $\text{Вт}/\text{м}/\text{К}$; L_i – удельная теплота таяния/замерзания, $\text{Дж}/\text{кг}$; $F_{sn}(z)$ – интенсивность таяния/замерзания воды в снеге, $\text{кг}/\text{с}\cdot\text{м}^3$; $S(z)$ – поток проникающей в снег коротковолновой радиации, $\text{Вт}/\text{м}^3$.

Для решения уравнения (1) используется неявная конечно-разностная схема с прогонкой по вертикали, причём потоки тепла и новая температура каждого из слоёв вычисляются не только для снега, но одновременно и для слоёв почвы. Коротковолновая часть радиации может проникать в снежную толщу на значительную глубину [1, 27, 28]. С большой точностью интенсивность радиации с глубиной изменяется по закону Бугера – Ламберта

$$S(z) = S_0 e^{-\beta z},$$

где $S(z)$ – интенсивность радиации на глубине z (м) от поверхности снега, $\text{Вт}/\text{м}^2$; S_0 – интенсивность радиации, пришедшей на поверхность снега, $\text{Вт}/\text{м}^2$; β – коэффициент ослабления, зависящий от плотности снега, м^{-1} ; используя литературные данные, мы принимаем для коэффициента ослабления β следующую зависимость от плотности снега ρ_{sn} , $\text{кг}/\text{м}^3$: $\beta = \min(65, 0,25\rho_{sn})$.

Альбедо верхнего слоя снега α_{sn} вычисляется, согласно работе [15], как

$$\alpha_{sn} = (1 - 0,2f_{age})\alpha_{sn.new},$$

где $\alpha_{sn.new}$ – альбедо свежего снега, доли ед. (параметр может меняться от 0,7 до 0,9); f_{age} – функция возраста снега, которая находится по формуле

$$f_{age} = \tau_{sn}/(1 + \tau_{sn}),$$

где τ_{sn} – возраст верхнего слоя снега в днях.

Если верхний слой снега талый, то его альbedo может принимать значения от 0,4 до 0,55. Таяние снега происходит, когда температура его поверхности становится равной 0 °С. Скорость таяния M (кг/м²/с) определяется как

$$M = E_{melt}/L_i,$$

где E_{melt} – затраты тепла на таяние, Вт/м²; L_i – удельная теплота таяния/замерзания, Дж/кг.

Жидкая вода, образовавшаяся в результате таяния снега и выпадения жидких осадков, просачивается в глубь толщи снега. В данной версии модели принимается, что каждый слой снега может впитать количество воды, соответствующее его максимальной водоудерживающей способности, определяемой по эмпирическим данным и составляющей 8–15% массы слоя [1]. Если масса жидкой воды больше, чем необходимо для насыщения всех слоёв, то остаток формирует сток в почву. Подробно модель снежного покрова описана в работе [24].

С целью тестирования модели снежного покрова выполнен ряд численных экспериментов для нескольких полигонов, расположенных в различных районах Северного полушария. Качество результатов оценивалось в соответствии с тем, насколько хорошо модель воспроизводит сезонную динамику водного эквивалента и толщины снежного покрова. Несколько численных экспериментов проведено по данным полигонов, включённых в Международный проект сравнения моделей снежного покрова SnowMIP [22]. Полигоны расположены в различных регионах Евразии и Северной Америки, причём климатические условия полигонов значительно отличались друг от друга. Самые длительные численные эксперименты проведены по данным полигона Валдай – за 17 сезонов – с 1966 по 1983 г. Данные этого полигона использовались в одной из стадий Международного эксперимента сравнения моделей PILPS [20]. Модельные расчёты с этими данными показали хорошее качество воспроизведения водного эквивалента и толщины снежного покрова, и только в отдельных случаях наблюдаемые точки выпадали из полосы модельных решений. Коэффициенты корреляции с рядом данных наблюдений составляют около 0,86. Особенно успешно воспроизведены режим снеготаяния и момент схода снега практически во все годы (ошибка расчёта времени схода снежного покрова не превышает 2–4 дней). Расчёты для других полигонов также показали хорошие результаты [24].

Расчёт характеристик снежного покрова для Московской области

После успешного применения модели SPONSOR для расчёта характеристик снежного покрова в отдельных точках мы использовали разработанную методику для расчёта его пространственно распределённых характеристик на обширных равнинных территориях России. Приведённые здесь расчёты показали, что при наличии метеоданных достаточного качества и полноты модель SPONSOR способна воспроизвести характеристики снежного покрова с высокой точностью. Однако качественные и полные данные наблюдений, содержащие все необходимые для расчётов метеопараметры, могут быть получены только для отдельных, как правило, специализированных станций, находящихся друг от друга на значительном расстоянии. Если же перед нами стоит задача расчёта полей характеристик снежного покрова для обширных территорий, то мы вынуждены или интерполировать имеющиеся данные, или пытаться найти дополнительные источники информации. К последним относится современный реанализ с высоким пространственным разрешением. Правда, необходимо оценить, достаточно ли высоко качество метеоданных, получаемых из реанализа, которые предполагается использовать для расчёта пространственно распределённых характеристик снежного покрова.

В дальнейших расчётах мы использовали метеоданные реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [29, 30] и американского Национального центра прогнозов окружающей среды (NCEP) [31]. Реанализ NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) (National Centre for Environmental Prediction/Department of energy) представляет собой доработанную предыдущую версию реанализа – NCEP-NCAR Reanalysis (R-1). Кроме исправления найденных ранее ошибок, в проект R-2 были внесены дополнения в прогностическую модель и диагностический пакет. В проекте R-2, как и в R-1, используется горизонтальное разрешение T63, присутствует 28 вертикальных уровней и временной шаг предоставляемых данных составляет шесть часов. В отличие от R-1 в проекте R-2 исправлены ошибки анализа снежного покрова, влажности, альbedo поверхности океана и периодов снеготаяния [32].

В наших расчётах, помимо данных NCEP/DOE, использовались данные реанализа ERA-Interim, подготовленные Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

Проект ERA-Interim проводится для замены предыдущего поколения реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA-40 с целью продления периода подготовки данных до начала XX в. [30]. В список основных улучшений ERA-Interim по сравнению с ERA-40 входят: улучшенная система усвоения данных; горизонтальное разрешение T255 ($0,75 \times 0,75^\circ$); лучшая формулировка ограничений фоновых ошибок; обновлённый анализ влажности; обновлённая физика модели; управление качеством данных, обновлённое за счёт опыта реанализов ERA-40 и JRA-25 и др. ERA-Interim в основном использует те же данные наблюдений, что и ERA-40, дополненные более поздними наблюдениями из операционного архива ECMWF с некоторыми изменениями. Главные отличия от предыдущего поколения реанализа ERA-40 — незначительные изменения в проверке сумм осадков, пересмотренная схема получения коротковолновой радиации, облачности, новый метод анализа снежного покрова и др. Толщина снежного покрова, водный эквивалент и плотность снега, рассчитанные на основе прогностической модели, изменяются за счёт сопоставления со стационарными и спутниковыми данными наблюдений и их усвоения [33].

При модельных расчётах использовались данные реанализа с шагом по времени шесть часов; все характеристики были взяты на уровне поверхности или вблизи неё (для температуры воздуха — на высоте 2 м, ветра — 10 м). Для приведения данных из узлов сетки реанализа к координатам точек станций использовался метод билинейной интерполяции из четырёх ближайших к станции узлов. В случае с реанализом ERA-Interim, где пространственный шаг относительно небольшой, билинейная интерполяция практически не вносит искажений в используемые моделью метеорологические характеристики. Для реанализа NCEP/DOE также применялась билинейная интерполяция, хотя это может привести к возникновению ошибок из-за большого шага по пространству, прежде всего для полей осадков. Однако с целью сохранения однородности условий расчётов было решено использовать одинаковые методы подготовки данных для ввода в модель как для реанализа ERA-Interim, так и для NCEP/DOE.

Предложенная методика расчёта характеристик снежного покрова с помощью модели SPONSOR и метеоданных, взятых из реанализа, была протестирована по данным, полученным в Московском регионе. Этот регион выбран в качестве тестового, так как он относительно полно ха-

рактеризуется данными наблюдений, что позволяет достоверно оценить качество рассчитанных характеристик снежного покрова по сравнению с материалами станций снегомерных съёмок. Для водного эквивалента снежного покрова выбрано восемь таких станций, для толщины снежного покрова — девять. Материалы наблюдений не всегда отвечают требованиям непрерывности по времени, поэтому, несмотря на наличие на большинстве станций измерений с середины XX в. до настоящего момента, пришлось использовать относительно небольшой временной отрезок для анализа — с 1979 по 1996 г. Обусловлено это, во-первых, имеющимися данными реанализа (начинаются с 1979 г.), а во вторых — большими пробелами в наблюдениях после 1996 г. Для каждой станции снегомерных съёмок сравнивались значения толщины и водного эквивалента снежного покрова согласно наблюдениям с этими же значениями из реанализов NCEP/DOE и ERA-Interim, а также с данными численных экспериментов с использованием модели SPONSOR и метеорологических полей из соответствующих реанализов. Данные интерполировались в точки, соответствующие по координатам станциям наблюдений, затем строились ряды характеристик снежного покрова с разрешением по времени, соответствующим временному разрешению данных снегомерных съёмок, и вычислялись коэффициенты корреляции с данными наблюдений. Результаты представлены в таблице.

Значения в графах ERA-Interim и NCEP/DOE характеризуют коэффициент корреляции водного эквивалента снежного покрова по данным соответствующих реанализов с данными снегомерных съёмок, два других столбца получены с использованием результатов численных экспериментов с моделью SPONSOR, где в качестве входных значений использовались метеорологические поля из реанализов ERA-Interim и NCEP/DOE. Анализ таблицы показывает, что данные о водном эквиваленте снежного покрова, полученные непосредственно из реанализа, имеют относительно невысокую корреляцию с данными наблюдений. Согласно данным ERA-Interim, коэффициенты корреляции попадают в интервал 0,5–0,65, согласно реанализу NCEP/DOE — в интервал 0,35–0,65. В то же время использование метеоданных реанализа ECMWF ERA-Interim совместно с моделью SPONSOR даёт значительно лучшие результаты: коэффициент корреляции с данными наблюдений составляет 0,78–0,88. Отметим также, что применение метеоданных реанализа NCEP/

Коэффициенты корреляции и среднеквадратическое отклонение от данных наблюдений характеристик снежного покрова по реанализам и расчётам на модели SPONSOR за период 1979–1996 гг.*

Индекс WMO	Наименование станции	ECMWF ERA-Interim				NCEP/DOE				Расчёты SPONSOR (по дан- ным ECMWF ERA-Interim)				Расчёты SPONSOR (по данным NCEP/DOE)			
		А	Б	В	Г	А	Б	В	Г	А	Б	В	Г	А	Б	В	Г
27417	Клин	0,55	30,0	0,62	8,5	0,65	30,0	0,54	11,3	0,78	27,6	0,90	6,8	0,55	25,4	0,67	8,3
27625	Коломна	0,51	35,8	0,62	8,8	0,58	34,7	0,56	11,9	0,81	29,6	0,85	8,7	0,65	23,7	0,63	8,0
27509	Можайск	0,54	27,6	0,66	7,8	0,49	36,0	0,55	11,2	0,88	27,0	0,91	6,6	0,65	23,9	0,72	7,4
27611	Наро-Фоминск	0,63	25,8	0,76	9,8	0,56	30,7	0,56	10,9	0,87	22,5	0,89	8,0	0,79	21,5	0,79	10,4
27511	Ново-Иерусалим	0,65	27,2	0,70	8,4	0,57	30,2	0,58	10,2	0,83	23,4	0,91	7,0	0,59	21,2	0,77	8,8
27523	Павлов-Посад	0,62	29,4	0,72	8,9	0,49	31,7	0,45	12,3	0,87	24,2	0,89	7,5	0,71	25,3	0,72	8,9
27618	Серпухов	0,68	27,0	0,70	6,8	0,54	38,1	0,52	11,5	0,83	28,9	0,89	7,3	0,59	22,0	0,67	7,9
27502	Волоколамск	0,56	27,5	0,64	8,2	0,35	34,2	0,42	11,3	0,80	28,6	0,86	8,2	0,70	21,2	0,83	6,8
	<i>Среднее</i>	0,59	28,8	0,68	8,4	0,53	33,2	0,52	11,3	0,83	26,5	0,89	7,5	0,65	23,0	0,73	8,3

* А – коэффициенты корреляции между данными снегомерных съёмок на станциях Московской области и значениями водного эквивалента снежного покрова; Б – среднеквадратическое отклонение значений водного эквивалента снежного покрова, мм; В – коэффициенты корреляции между данными снегомерных съёмок на станциях Московской области и значениями толщины снежного покрова; Г – среднеквадратическое отклонение значений толщины снежного покрова, см.

DOE совместно с моделью SPONSOR даёт существенное увеличение качества воспроизведения снежного покрова на большинстве станций. В таблице приведены также среднеквадратические отклонения водного эквивалента снежного покрова, рассчитанные на модели SPONSOR, а также взятые из реанализов ERA-Interim и NCEP/DOE, от данных снегомерных съёмок на станциях Московской области за 1979–1996 гг. Отметим, что расчёты, проведённые на модели SPONSOR с входными данными из реанализов, позволили существенно улучшить качество воспроизведения водного эквивалента. Особенно это заметно для реанализа NCEP/DOE.

В этой же таблице представлены данные для толщины снежного покрова. Использование метеоданных реанализов совместно с моделью SPONSOR существенно увеличивает качество воспроизведения толщины снежного покрова на всех станциях. Особенно это заметно для расчётов с использованием метеоданных реанализа за ECMWF ERA-Interim совместно с моделью SPONSOR: коэффициенты корреляции рассчитанной толщины снежного покрова с данными наблюдений составляют 0,85–0,91, а среднеквадратические отклонения в среднем равны 7,5 см. Как и для водного эквивалента, расчёты, проведённые с моделью SPONSOR, позволили намного улучшить качество воспроизведения толщины снежного покрова для реанализа NCEP/DOE.

По данным расчётов для всех зимних месяцев построены карты водного эквивалента и толщины снежного покрова. Для проведения изолиний наблюдаемых характеристик снежного покрова

вблизи границ области мы использовали данные станций, расположенных, в том числе, и вне Московской области; при проведении изолиний по реанализам также использовались точки сетки, расположенные за пределами региона, т.е. везде изолинии строились по интерполированным, а не экстраполированным данным. На рис. 1, а представлено поле водного эквивалента снежного покрова (мм), построенное по данным наблюдений для февраля за период 1979–1996 гг.; на рис. 1, б–д показаны отклонения от данных наблюдений значений водного эквивалента, полученных по данным реанализа и расчётов с использованием метеоданных реанализа совместно с моделью SPONSOR.

Наибольшие отклонения от данных наблюдений даёт реанализ NCEP/DOE: значения водного эквивалента сильно занижены – до 50–60%. Водный эквивалент снежного покрова, полученный из реанализа ERA-Interim, напротив, даёт очень хорошее совпадение с данными наблюдений для среднемесячных значений. Если учесть, что коэффициенты корреляции между данными снегомерных съёмок на станциях Московской области и значениями водного эквивалента снежного покрова, полученными по реанализам ERA-Interim, не очень высоки, то можно предположить, что для этого реанализа производится усвоение данных наблюдений (станционных и спутниковых) и коррекция результатов модельных расчётов с учётом этих данных таким образом, чтобы наиболее качественно воспроизводились именно среднемесячные значения водного эквивален-

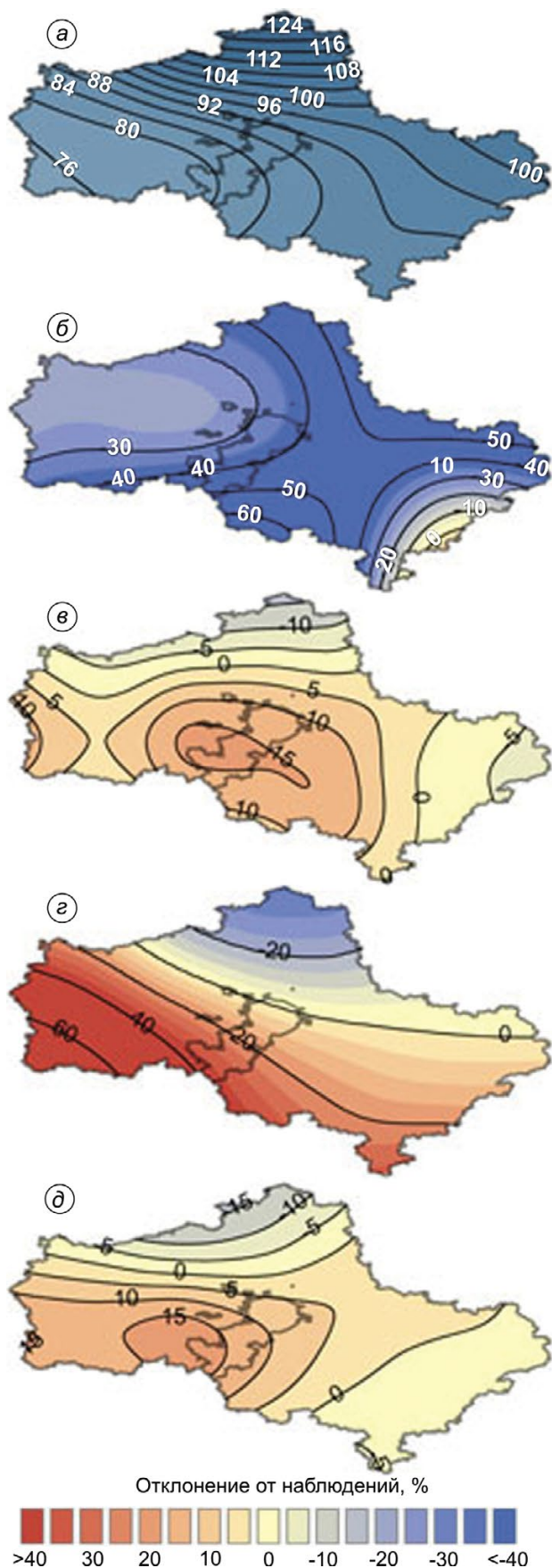


Рис. 1. Расчёты водного эквивалента снежного покрова для Московской области и их сравнение с данными наблюдений.

a – водный эквивалент по данным наблюдений для февраля в среднем за период 1979–1996 гг., мм; *б* – отклонения водного эквивалента, полученного из реанализа NCEP/DOE, от данных наблюдений, %; *в* – отклонения водного эквивалента, полученного из реанализа ERA-Interim, от данных наблюдений, %; *г* – отклонения водного эквивалента, полученного из расчётов с использованием метеоданных реанализа NCEP/DOE совместно с моделью SPONSOR, от данных наблюдений, %; *д* – отклонения водного эквивалента, полученного из расчётов с использованием метеоданных реанализа ERA-Interim совместно с моделью SPONSOR, от данных наблюдений, %

Fig. 1. Simulations of snow water equivalent for the Moscow region and their comparison with observations.

a – snow water equivalent from observed data for February in average for the period from 1979 to 1996, mm; *б* – NCEP/DOE reanalysis snow water equivalent deviations from observed data, %; *в* – ERA-Interim reanalysis snow water equivalent deviations from observed data, %; *г* – snow water equivalent deviations, simulated with the usage of SPONSOR with NCEP/DOE reanalysis meteorological data, from observations, %; *д* – snow water equivalent deviations, simulated with the usage of SPONSOR with ERA-Interim reanalysis meteorological data, from observations, %

та [33]. Анализ рис. 1, *г* показывает, что расчёт водного эквивалента с использованием метеоданных реанализа NCEP/DOE совместно с моделью SPONSOR значительно улучшает воспроизведение снежного покрова по сравнению с исходным на большей части Московской области, однако качество остаётся неудовлетворительным: на западе области отклонения превышают 50–60%. Наконец, расчёты водного эквивалента с применением метеоданных реанализа ERA-Interim совместно с моделью SPONSOR дают весьма высокое качество воспроизведения снежного покрова. Это, в частности, показывает, что метеоданные, предоставляемые реанализом ERA-Interim, прежде всего осадки холодного периода, значения температуры и радиационных потоков, имеют достаточно хорошее качество для расчёта полей снежного покрова с высоким разрешением при использовании модели SPONSOR. Таким образом, метеоданные из реанализа ERA-Interim можно использовать в качестве дополнительных (к стационарным данным) для расчёта водного эквивалента снежного покрова.

На рис. 2 приведены результаты расчётов, аналогичные рис. 1, только для толщины снежного покрова. Как и для рис. 1, отметим, что наилучшие результаты показал реанализ NCEP/DOE (см. рис. 2, *б*): отклонения от данных наблюдений достигают 60–70%. Реанализ ERA-Interim (см.

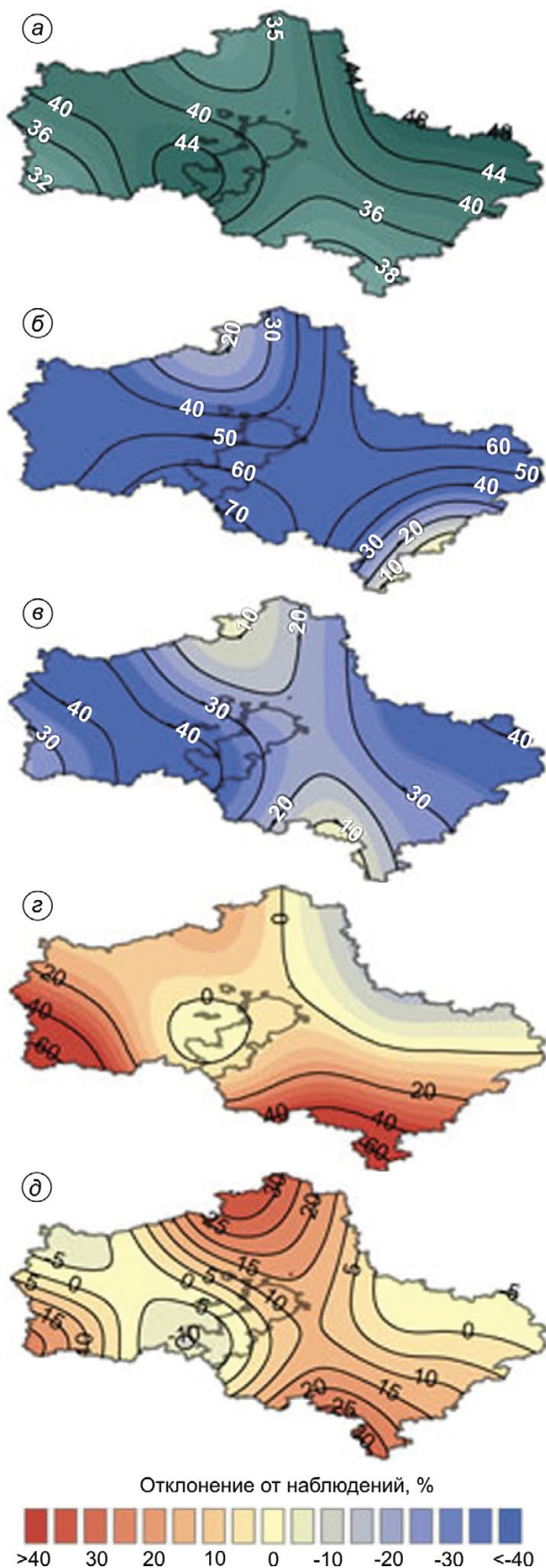


Рис. 2. Расчёты толщины снега для Московской области и их сравнение с данными наблюдений.

a – толщина снежного покрова по данным наблюдений для февраля за период 1979–1996 гг., см; *б* – отклонения толщины снежного покрова, полученной из реанализа NCEP/DOE, от данных наблюдений, %; *в* – отклонения толщины снежного покрова, полученной из реанализа ERA-Interim, от данных наблюдений, %; *г* – отклонения толщины снежного покрова, полученной из расчётов с использованием метеоданных реанализа NCEP/DOE совместно с моделью SPONSOR, от данных наблюдений, %; *д* – отклонения толщины снежного покрова, полученной из расчётов с использованием метеоданных реанализа ERA-Interim совместно с моделью SPONSOR, от данных наблюдений, %

Fig. 2. Simulations of snow depth for the Moscow region and their comparison with observations.

a – snow depth from observed data for February in average for the period from 1979 to 1996, cm; *б* – NCEP/DOE reanalysis snow depth deviations from observed data, %; *в* – ERA-Interim reanalysis snow depth deviations from observed data, %; *г* – snow depth deviations, simulated with the usage of SPONSOR with NCEP/DOE reanalysis meteorological data, from observations, %; *д* – snow depth deviations, simulated with the usage of SPONSOR with ERA-Interim reanalysis meteorological data, from observations, %

рис. 2, *в*) даёт значительно лучшие результаты, но и здесь отклонения от наблюдений достаточно велики и местами превышают 40%. Использование модели SPONSOR позволило существенно улучшить воспроизведение толщины снежного покрова как при использовании метеоданных реанализа NCEP/DOE (см. рис. 2, *г*), так и, особенно, в случае применения метеоданных реанализа ERA-Interim (см. рис. 2, *д*): отклонения от данных наблюдений на большей части территории не превышают 15%. Это подтверждает сделанный ранее вывод, что метеоданные из реанализа ERA-Interim можно использовать в качестве дополнительного источника данных для расчёта характеристик снежного покрова. Такой вывод особенно важен при расчёте снежного покрова на территориях, слабо освещённых данными наблюдений.

В дальнейшем планируется рассмотреть качество воспроизведения снежного покрова для других периодов (снеготаяния и установления снежного покрова), а также провести расчёты для иных регионов России.

Выводы

Несмотря на существенный прогресс, данные о характеристиках снежного покрова, полученные по результатам реанализа, значительно отличаются от данных наблюдений. Для реанализа NCEP/DOE эти различия настолько существенны, что позволяют считать неудовлетворительными предоставляемые

данные о снежном покрове, как среднемесячные, так и с более высоким временным разрешением. Реанализ ERA-Interim даёт значительно более качественные данные, особенно среднемесячные, о водном эквиваленте снежного покрова при более низком качестве внутримесячных данных. Это, по-видимому, показывает, что для этого реанализа проводится коррекция результатов модельных расчётов с использованием данных наблюдений таким образом, чтобы наиболее качественно воспроизвести именно среднемесячные значения водного эквивалента. В связи с этим остаётся открытым вопрос, будет ли реанализ ERA-Interim демонстрировать столь же высокое качество воспроизведения водного эквивалента в тех регионах, где отсутствуют данные наземных наблюдений или сеть наблюдений редка. Толщина снега (и его плотность) воспроизводится реанализом значительно хуже водного эквивалента, хотя реанализ ERA-Interim и здесь демонстрирует лучшие результаты, чем NCEP/DOE.

Использование модели SPONSOR с входными метеоданными из реанализов может значительно улучшить воспроизведение характеристик снежного покрова, особенно его толщины. Для достижения чистоты результата при проведении модельных расчётов мы брали только данные реанализа, без привлечения данных наблюдений, что позволило дополнительно улучшить качество расчётов характеристик снежного покрова. С помощью модели SPONSOR удалось улучшить качество расчёта не только среднемесячных, но и внутримесячных данных о снежном покрове: коэффициенты корреляции с рядами данных снегомерных съёмок возрастают до 0,83–0,89 для водного эквивалента и до 0,85–0,91 для толщины снега. Отметим, что модель SPONSOR, помимо толщины и водного эквивалента, позволяет одновременно рассчитывать и другие характеристики снежного покрова, прежде всего касающиеся его вертикальной структуры: распределение по глубине

снежной толщи плотности, температуры, влажности снега и его типов (ледяные корки, глубинная изморозь, насыщение влагой и т.п.), что не даёт реанализ. Кроме того, высокие коэффициенты корреляции и относительно невысокие среднеквадратические отклонения от данных наблюдений показывают, что модель SPONSOR при наличии метеоданных (станционных или данных реанализа ERA-Interim) можно использовать для достаточно достоверного заполнения пропусков в станционных рядах данных наблюдений за снежным покровом, которые нередки для многих станций.

Результаты сравнения расчётов и данных наблюдений позволяют констатировать, что реанализ ERA-Interim даёт достаточно качественные метеоданные для расчёта характеристик снежного покрова. Подобные выводы сделаны и другими исследователями [17]. Это позволяет предположить, что предложенная методика расчёта характеристик снежного покрова будет давать хорошие результаты и на территориях с редкой сетью станций наблюдений, для которых, наряду с данными наблюдений, имеются метеоданные реанализа ERA-Interim.

Благодарности. Исследование характеристик снежного покрова для Московской области выполнено по теме 79.5 Госзадания Института географии РАН «Исследования механизмов изменений климата и их последствий для окружающей среды и социально-экономических процессов в России». Валидация модели снежного покрова проведена при поддержке Программы ОНЗ РАН.

Acknowledgments. The study of snow cover in the Moscow region was supported by the Institute of Geography RAS (Program 79.5 «Research of climate change mechanisms and its consequences for the environment and socio-economic processes in Russia»). Validation of the snow cover model was supported by the Department of Earth Sciences RAS.

Литература

1. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
2. Snow and Climate / Ed. by R.L. Armstrong, E. Brun. Cambridge University Press, 2008. 222 p.
3. Vavrus S. The role of terrestrial snow cover in the climate system // *Climate Dynamics*. 2007. V. 29. P. 73–88.
4. МГЭИК: Изменение климата, 2013 г.: Резюме для политиков. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению

References

1. Kuzmin P.P. *Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova*. Physical properties of the snow cover. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1957: 179 p. [In Russian].
2. Snow and Climate. Ed. by R.L. Armstrong, E. Brun. Cambridge University Press, 2008: 222 p.
3. Vavrus S. The role of terrestrial snow cover in the climate system. *Climate Dynamics*. 2007, 29: 73–88.
4. IPCC, 2013: Summary for policymakers. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Inter-*

- климата. Кембридж Университи Пресс, Кембридж, Соединенное Королевство, и Нью-Йорк, США, 2013. 36 с. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
5. Попова В.В., Морозова П.А., Туткова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 4. С. 73–86. doi:10.15356/2076-6734-2015-4-73-86
 6. Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // *Nature*. 2005. V. 438. P. 303–309.
 7. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 // *Environment Research Letters*. 2011. № 6. 045204. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045204.
 8. Кислов А.В., Китаев Л.М., Константинов И.С. Статистическая структура крупномасштабных особенностей поля снежного покрова // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 8. С. 98–104.
 9. Китаев Л.М., Туткова Т.Б. Оценка снегозапасов по данным спутниковой информации // *Криосфера Земли*. 2010. Т. 14. № 1. С. 76–80.
 10. Телегина А.А., Фролова Н.Л., Китаев Л.М., Туткова Т.Б. Оценка точности спутниковой информации о снегозапасах крупных водосборов европейской территории России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 38–49.
 11. Гусева Е.В., Голубев В.Н. Математическая модель формирования строения и свойств снежного покрова // *МГИ*. 1989. Вып. 68. С. 18–25.
 12. Fierz C., Lehning M. Assessment of the microstructure-based snow-cover model SNOWPACK: thermal and mechanical properties // *Cold Regions Science and Technology*. 2001. V. 33. № 2–3. P. 123–131.
 13. Володина Е.Е., Бенетсон Л., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов теплообмена в снежном покрове для целей моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // *Метеорология и гидрология*. 2000. № 5. С. 16–28.
 14. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России // *Лёд и Снег*. 2014. Т. 54. № 2. С. 44–52. doi:10.15356/2076-6734-2014-2-44-52.
 15. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
 16. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Моделирование формирования стока рек и снежного покрова на севере Западной Сибири // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 4. С. 387–395.
 17. Brun E., Voynet V., Boone A., Decharme B., Peyngs Y., Valette R., Karbou F., Morin S. Simulation of Northern Eurasian local snow depth, mass, and density using a detailed snowpack model and meteorological reanalyses // *Journ. of Hydrometeorology*. 2013. V. 14. P. 203–219.
 18. Essery R.L.H. Seasonal snow cover and climate change in the Hadley Center GCM // *Annals of Glaciology*. 1997. V. 25. P. 362–366.
 19. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // *Global and Planetary Change*. 1998. V. 19. № 1–4. P. 49–62.
 20. Slater A.G., Schlosser C.A., Desborough C.E. The representation of snow in land surface schemes: results from the *governmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: 3–29. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
 5. Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryaeva A.V., Kitaev L.M. Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (4): 73–86. doi:10.15356/2076-6734-2015-4-73-8. [In Russian]
 6. Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*. 2005, 438: 303–309.
 7. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environment Research Letters*. 2011, 6: 045204. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045204
 8. Kislov A.V., Kitaev L.M., Konstantinov I.S. Statistical structure of large-scale properties of field of the snow cover. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2001, 8: 98–104. [In Russian].
 9. Kitaev L.M., Titkova T.B. Estimation of snow storage using satellite information. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2010, 14 (1): 76–80. [In Russian].
 10. Telegina A.A., Frolova N.L., Kitaev L.M., Titkova T.B. Estimation of precision of snow storage satellite data for large watersheds of European Russia. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2014, 11 (2): 38–49. [In Russian]
 11. Guseva E.V., Golubev V.N. Mathematical model of formation of structure and properties of snow cover // *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1989, 68: 18–25. [In Russian].
 12. Fierz C., Lehning M. Assessment of the microstructure-based snow-cover model SNOWPACK: thermal and mechanical properties. *Cold Regions Science and Technology*. 2001, 33 (2–3): 123–131.
 13. Volodina E.E., Bengtsson L., Lykosov V.N. Parameterization of moisture and heat transfer processes in the snow cover for modeling the seasonal variations of the land hydrological cycle. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2000, 5: 16–28. [In Russian]
 14. Gelfan A.N., Moreido V.M. Dynamic-stochastic modeling of snow cover formation on the European territory of Russia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 54 (2): 44–52. doi:10.15356/2076-6734-2014-2-44-52. [In Russian].
 15. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. Modeling Heat and Water Exchange between the Land Surface and the Atmosphere. Moscow: Nauka, 2010: 328 p. [In Russian].
 16. Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya., Aizel G.V. Modeling of the formation of river runoff and snow cover in the North of Western Siberia. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2015, 42 (4): 387–395. [In Russian]
 17. Brun E., Voynet V., Boone A., Decharme B., Peyngs Y., Valette R., Karbou F., Morin S. Simulation of Northern Eurasian local snow depth, mass, and density using a detailed snowpack model and meteorological reanalyses. *Journ. of Hydrometeorology*. 2013, 14: 203–219.
 18. Essery R.L.H. Seasonal snow cover and climate change in the Hadley Center GCM. *Annals of Glaciology*. 1997, 25: 362–366.
 19. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements. *Global and Planetary Change*. 1998. 19, 1–4: 49–62.
 20. Slater A.G., Schlosser C.A., Desborough C.E. The representation of snow in land surface schemes: results

20. Slater A.G., Schlosser C.A., Desborough C.E. The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(d) // Journ. of Hydrometeorology. 2001. V. 2. № 1. P. 7–25.
21. Rutter N., Essery R., Pomeroy J., Altimir N., Andreadis K., Baker I., Barr A., Bartlett P., Boone A., Deng H., Douville H., Dutra E., Elder K., Ellis C., Feng X., Gelfan A., Goodbody A., Gusev Y., Gustafsson D., Hellstrom R., Hirabayashi Y., Hirota T., Jonas T., Koren V., Kuragina A., Lettenmaier D., Li W.-P., Luce C., Martin E., Nasonova O., Pumpanen J., Pyles R.D., Samuelsson P., Sandells M., Schadler G., Shmakin A., Smirnova T.G., Stahli M., Stockli R., Strasser U., Su H., Suzuki K., Takata K., Tanaka K., Thompson E., Vesala T., Viterbo P., Wilshire A., Xia K., Xue Y., Yamazaki T. Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2) // Journ. of Geophys. Research. 2009. V. 114. D06111. doi:10.1029/2008JD011063.
22. Etchevers P., Martin E., Brown R. Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project) // Annals of Glaciology. 2004. V. 38. P. 150–158.
23. Шмакин А.Б., Рубинштейн К.Г. Валидация динамико-статистического метода детализации метеорологических параметров // Тр. Гидрометцентра России. 2006. Вып. 341. С. 186–208.
24. Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 69–79.
25. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: СО АН СССР, 1963. 378 с.
26. Kominami Y., Endo Y., Niwano Sh., Ushioda S. Viscous compression model for estimating the depth of new snow // Annals of Glaciology. 1998. V. 26. P. 77–82.
27. Красс М.С., Мерзлик В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 262 с.
28. Glendinning J.H.G., Morris E.M. Incorporation of spectral and directional radiative transfer in a snow model // Hydrological Processes. 1999. V. 13. P. 1761–1772.
29. Электронный ресурс: <http://www.ecmwf.int>
30. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society. 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828.
31. Электронный ресурс: NCEP Reanalysis 2 data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
32. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bulletin of the American Meteorological Society. November 2002. P. 1631–1643.
33. Drusch M., Vasiljevic D., Viterbo P. ECMWF's global snow analysis: Assessment and revision based on satellite observations // Journ. of Applied Meteorology and Climatology. 2004. № 43. P. 1282–1294.
- from PILPS 2(d). Journ. of Hydrometeorology. 2001, 2 (1): 7–25.
21. Rutter N., Essery R., Pomeroy J., Altimir N., Andreadis K., Baker I., Barr A., Bartlett P., Boone A., Deng H., Douville H., Dutra E., Elder K., Ellis C., Feng X., Gelfan A., Goodbody A., Gusev Y., Gustafsson D., Hellstrom R., Hirabayashi Y., Hirota T., Jonas T., Koren V., Kuragina A., Lettenmaier D., Li W.-P., Luce C., Martin E., Nasonova O., Pumpanen J., Pyles R.D., Samuelsson P., Sandells M., Schadler G., Shmakin A., Smirnova T.G., Stahli M., Stockli R., Strasser U., Su H., Suzuki K., Takata K., Tanaka K., Thompson E., Vesala T., Viterbo P., Wilshire A., Xia K., Xue Y., Yamazaki T. Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2). Journ. of Geophys. Research. 2009, 114: D06111. doi:10.1029/2008JD011063.
22. Etchevers P., Martin E., Brown R. Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project). Annals of Glaciology. 2004, 38: 150–158.
23. Shmakin A.B., Rubinshtein K.G. Validation of the dynamical-statistical method of detailsation of meteorological parameters. Trudy Gidrometeorotentra Rossii. Proc. of the Hydrometcentre of Russia. 2006, 341: 186–208. [In Russian]
24. Shmakin A.B., Turkov D.V., Mikhailov A.Yu. Model of snow cover considering its layered structure and seasonal evolution. Kriosfera Zemli. Earth Cryosphere. 2009, 13 (4): 69–79. [In Russian]
25. Dyunin A.K. Mekhanika meteley. Mechanics of blizzards. Novosibirsk: Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1963: 378 p. [In Russian].
26. Kominami Y., Endo Y., Niwano Sh., Ushioda S. Viscous compression model for estimating the depth of new snow. Annals of Glaciology. 1998, 26: 77–82.
27. Krass M.S., Merzlikin V.G. Radiation thermophysics of snow and ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 262 p. [In Russian].
28. Glendinning J.H.G., Morris E.M. Incorporation of spectral and directional radiative transfer in a snow model. Hydrological Processes. 1999, 13: 1761–1772.
29. <http://www.ecmwf.int>
30. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q.J.R. Meteorol. Society. 2011, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828
31. NCEP Reanalysis 2 data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
32. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bulletin of the American Meteorological Society. November 2002: 1631–1643.
33. Drusch M., Vasiljevic D., Viterbo P. ECMWF's global snow analysis: Assessment and revision based on satellite observations. Journ. of Applied Meteorology. 2004, 43: 1282–1294.