

# СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.578.46

doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-343-354

## Определение снегозапасов Западной Сибири по расчётам на модели локального теплообмена SPONSOR с использованием данных реанализа

© 2017 г. Д.В. Турков, В.С. Сократов, Т.Б. Титкова

Институт географии РАН, Москва, Россия

turkovdv@yandex.ru

## Evaluation of snow storage in Western Siberia based on the land-surface model SPONSOR simulation using reanalysis data

D.V. Turkov, V.S. Sokratov, T.B. Titkova

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

turkovdv@yandex.ru

Received December 25, 2016

Accepted April 12, 2017

**Keywords:** *LSM Model SPONSOR, meteorological reanalyses, simulation, snow cover, snow depth, snow spatial distribution, snow water equivalent, space data, West Siberia.*

### Summary

Obtaining of reliable information about the characteristics of snow cover with high spatial and temporal resolution for large areas of Northern Eurasia, with rare or absent network of ground-based observations stations is an important and urgent task. Currently estimation of the value of the snow water equivalent (SWE) and the snow depth have a large degree of uncertainty, especially if we are moving from data at the point of observation stations to distributed space values. In this article, the simulations of SWE and the snow depth using Land-Surface Model (LSM) SPONSOR with input meteorological data taken from the ECMWF ERA-Interim reanalysis was performed for Western Siberia for the period from 1979 to 2013. Fields of SWE and of the snow depth with high spatial and temporal resolution corresponding to the resolution of meteorological data of the ECMWF ERA-Interim reanalysis (time step of 6 hours, the grid resolution of  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$  in latitude and longitude) were obtained. For the entire period SWE data were compared with observations, as simulated using the model and taken directly from the reanalysis ERA-Interim at points corresponding of observation stations. Also comparison of observations and satellite data of SWE for points of observation stations was performed. Correlation coefficients between observations and model and satellite data for SWE and the snow depth were calculated for the period from 1979 to 2013. These correlation coefficients between observations and results of simulations using LSM SPONSOR for SWE, and especially for the snow depth are the best of all methods. Maps with high spatial resolution for SWE, obtained by different methods, were constructed for February averaged. Comparing of constructed maps shows significant uncertainty of the SWE fields, besides field's distortions are not evenly distributed across the region. It appears that no one of these methods currently can be used as a reference (unique) to determine SWE in the absence of data of ground-based observations. Overall, model simulations using LSM SPONSOR somewhat overstate SWE, however, this overestimation is not more than 10–20% for most part of the territory, except in the South. Model data are reasonably well reproduce SWE for Central, Eastern and, most probably, for Northern parts of the region, differing from a real at 10–15%. Data from used satellite archive a few underestimate of SWE. SWE data taken directly from the reanalysis ERA-Interim, give large distortions of the SWE field: these values for Northern parts of the region, are likely greatly underestimated, and for Western and Eastern parts of the region – inflated. It is shown that in general, the method of simulation of snow cover characteristics using LSM SPONSOR with input data taken from the ECMWF ERA-Interim reanalysis gives good results for the region of Western Siberia.

**Citation:** Turkov D.V., Sokratov V.S., Titkova T.B. Evaluation of snow storage in Western Siberia based on the land-surface model SPONSOR simulation using reanalysis data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017. 57 (3): 343–354. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-343-354

Поступила 25 декабря 2016 г.

Принята к печати 12 апреля 2017 г.

**Ключевые слова:** *водный эквивалент снега, Западная Сибирь, модель теплообмена SPONSOR, пространственное распределение снежного покрова, реанализы, снежный покров, спутниковые данные, толщина снега.*

Для территории Западной Сибири за период с 1979 по 2013 г. проведены расчёты снегозапасов и толщины снежного покрова с помощью модели локального теплообмена SPONSOR с входными метеоданными, взятыми из реанализа ECMWF ERA-Interim. Показано, что коэффициенты корреляции между данными наблюдений и результатами численных расчётов на модели SPONSOR – наилучшие из всех методов. С помощью модели SPONSOR достаточно хорошо воспроизводятся данные снегозапасов по центральной, восточной и, наиболее вероятно, северной частям Западной Сибири.

## Введение

Развитие методов получения достоверной информации о снежном покрове с высоким пространственным и временным разрешением для слабо охваченных наземными наблюдениями высокоширотных территорий Северного полушария приобретает в настоящее время большое научное и практическое значение. Это связано с важностью оценок экологических и экономических последствий высокой естественной пространственно-временной изменчивости снежного покрова и его быстрых систематических изменений под воздействием меняющегося климата. Цель работы – сравнение различных методов получения информации о снежном покрове с высоким пространственно-временным разрешением на основе использования модели локального теплообмена SPONSOR, реанализов и восстановленных спутниковых данных для территории с достаточно редкой сетью станций наземных наблюдений. В качестве примера такой территории выбран север Западной Сибири. Данная работа фактически представляет собой вторую часть опубликованной ранее статьи [1], поэтому мотивация исследования, постановка задачи, обзор литературы, а также методов и источников данных, которые могли бы быть использованы для её решения, остаются теми же, что и для предлагаемой работы. Чтобы избежать дублирования материалов, мы рекомендуем читателям познакомиться с вводной частью статьи [1].

## Данные и методы

**Модель SPONSOR** детально описана в работах [1–4], поэтому здесь мы ограничимся её сокращённым описанием. Численная модель теплообмена на суше (Land-Surface Model, LSM) SPONSOR разработана в лаборатории климатоло-

гии Института географии РАН под руководством чл.-корр. А.Б. Шмакина. Модель рассчитывает все составляющие теплового и водного баланса на суше, а также переменные состояния (эффективная температура поверхности ландшафта, распределение температуры в почве, её влагосодержание, количество замёрзшей воды в почве, альbedo и т.д.). Все эти величины рассчитываются на каждом шаге по времени. Шаг по времени может быть от нескольких минут до суток и зависит от поставленной задачи, но для адекватного воспроизведения суточного хода он должен составлять не более шести часов. При работе модели требуется на каждом шаге задавать значения нескольких метеорологических переменных (температура и влажность воздуха, скорость ветра, количество осадков, потоки радиации и атмосферное давление). Также необходимо задавать значения ландшафтных параметров, связанных с типом растительности и грунтов в данной расчётной точке. Часть параметров может иметь сезонный ход. Кроме того, задаются (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 модели почвы.

**Модель снежного покрова** включена в качестве отдельного блока в модель SPONSOR. Подробно модель снежного покрова описана в работах [1, 4]. 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 развитии снежной толщии соседние слои одного типа, близкие по свойствам, могут объединяться. Снежный покров рассматривается как многослойная среда,

каждый слой которой характеризуется собственными температурой, массой (водным эквивалентом), толщиной, плотностью, влажностью, фазовым состоянием содержащейся воды, теплоёмкостью, теплопроводностью и максимальной водоудерживающей способностью.

Модель снежного покрова содержит описание процессов, вносящих наибольший вклад в формирование теплофизических характеристик снега, важных для описания взаимодействия снежного покрова с атмосферой и почвой. Среди них – образование нового слоя снега; изменение плотности слоёв снега за счёт вязкого и ветрового уплотнения; изменение температуры слоёв снега в результате теплообмена с атмосферой и почвой, а также за счёт поглощения солнечной радиации и фазовых переходов воды в толще снега; испарение, в том числе метелевое, по схеме А.К. Дюнина [5]; таяние, перенос талой воды и её вторичное замерзание; изменение влажности снега, обусловленное таянием и просачиванием талой воды в толщу, а также поглощением жидких осадков; изменение альбедо снега, его теплопроводности и теплоёмкости; изменение свойств снега при смене типа слоёв. Набор процессов, включаемых в модель, а также детальность их описания выбирались нами для соблюдения баланса между сложностью (и соответственно ресурсоёмкостью) модели и качеством вычисления характеристик снежного покрова, в наибольшей степени влияющих на особенности взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью.

Модельные расчёты, выполненные с использованием этих данных для нескольких полигонов, расположенных в разных районах Северного полушария, показали хорошее качество воспроизведения снегозапаса (водного эквивалента снега) и толщины снежного покрова [4]. После успешного применения модели SPONSOR для расчёта характеристик снежного покрова в отдельных точках мы использовали разработанную методику для расчёта его пространственно-распределённых характеристик на примере Московской области, которая была выбрана в качестве тестового равнинного региона с достаточно густой сетью станций наблюдений [1].

Входными данными служили метеоданные реанализов ECMWF ERA-Interim и NCEP/DOE. Показано, что использование модели SPONSOR

с входными метеоданными из реанализа ECMWF ERA-Interim позволяет получить характеристики снежного покрова, которые хорошо согласуются с материалами наблюдений. Однако данные о снежном покрове из реанализа NCEP/DOE плохо соответствуют данным наблюдений и для водного эквивалента снега, и для толщины снежного покрова. Модельные расчёты характеристик снежного покрова с использованием метеоданных из реанализа NCEP/DOE также показали невысокий результат, поэтому в настоящей работе реанализ NCEP/DOE был исключён из дальнейшего рассмотрения как не удовлетворяющий предъявляемым требованиям. В качестве входных для модели SPONSOR мы использовали поля метеоэлементов из реанализа ECMWF ERA-Interim [6] за период с 1979 по 2013 г.

**Спутниковые данные.** Один из способов восполнения отсутствующей информации с высоким пространственным разрешением, особенно для обширных площадей, – использование спутниковых данных [7, 8]. И хотя качество этих данных в области получения дополнительной информации о толщине снежного покрова и снегозапаса остаётся относительно невысоким [9], спутниковые данные для многих регионов – один из часто используемых источников информации, особенно при отсутствии других сведений о снежном покрове. Для совершенствования алгоритмов обработки спутниковых данных необходимо регулярно сравнивать полученные восстановленные спутниковые данные о снежном покрове с материалами из других источников, прежде всего наблюдений и реанализов. С этой целью мы включили в настоящую статью результаты сравнения рассчитанных данных о снежном покрове с восстановленными спутниковыми данными.

Для восстановления данных о водном эквиваленте по измеряемым спутниковыми радиометрами радиоярким температурам используются различные модели. Так, двухчастотная модель восстановления водного эквивалента  $S$  основана на уравнении [10]

$$S = 4,8(T_{18H} - T_{37H}),$$

где  $T_{18H}$ ,  $T_{37H}$  – радиояркие температуры яркости в каналах соответственно 18 и 37 ГГц на горизонтальной поляризации, К.

Коэффициент 4,8 используется для учёта свойств снежного покрова при осреднённых его

характеристиках — плотности  $0,30 \text{ г/см}^3$  и размере зерна  $0,3 \text{ мм}$ . Уравнение разработано для данных радиометра SSRMR, а затем уточнялось для данных SSRM/I в связи с использованием здесь других частот:

$$S = 4,8[(T19H - 5) - T37H].$$

Учёт лесистости выполнен при восстановлении снеготазов путём введения некоторого коэффициента  $f$ :

$$S = 4,8(T18H - T36H)/(1 - 0,2f).$$

Авторы модели и соответствующих карт предполагают среднюю ошибку восстановленных снеготазов в пределах  $\pm 25\%$ . Однако данная оценка слишком оптимистична. Одна из основных проблем оценки снеготазов по восстановленным спутниковым данным связана с тем, что их погрешность зависит от толщины, структуры и состояния снежной толщи, на которые сильно влияют изменения температуры воздуха [11]. Структура снежного покрова, в свою очередь, влияет на взаимодействие с микроволновым излучением. При оттепели в снежном покрове образуются прослойки влажного снега и льдистые включения, что искажает реальные снеготазы по восстановленным данным из-за недостаточной глубины проникновения микроволнового излучения в снежную толщу [7]. С помощью данной технологии водный эквивалент с наименьшей погрешностью устанавливается на безлесных участках с сезонным сухим снежным покровом. Погрешность определения водного эквивалента для районов с мокрым снегом или тонким слоем снега, как правило, весьма велика. При этом для стратифицированного снежного покрова, содержащего льдистые включения, сильно уплотнённые или влажные слои, наблюдается тенденция к занижению восстановленных по спутниковым измерениям значений снеготазов.

С ростом числа рассматриваемых точек по спутниковым данным статистическая значимость результатов существенно улучшается, так как с ростом числа измерений уменьшается роль случайных факторов, не учтённых в простейшей двухчастотной модели. Погрешность оценки снеготазов по спутниковым данным относительно наблюдаемых «выходит» на стабильный уровень менее  $40\%$  при осреднении на площади около  $300 \times 300 \text{ км}$ . Поэтому алгоритмы оценки снеготазов нуждаются в существенном пространствен-

ном осреднении [9], при этом точность определения этого параметра не превышает  $30\text{--}40\%$ . Пока это ещё слишком большая ошибка, чтобы использовать спутниковые данные для количественных оценок толщины снежного покрова и водного эквивалента снега на обширных территориях, и в настоящее время прилагаются значительные усилия по разработке методов уточнения восстановленных спутниковых данных с использованием наземных наблюдений о снежном покрове. Это позволяет надеяться, что, сохранив хорошее пространственно-временное разрешение, можно нивелировать погрешности спутниковых измерений. Полученные таким способом архивы данных о снежном покрове, строго говоря, нельзя назвать спутниковыми в чистом виде, но интересно оценить их качество. В дальнейшем мы будем называть их спутниковыми, но речь будет идти именно о данных конкретного архива, описанного далее.

В работе использовался архив спутниковых данных по снеготазам Европейского космического агентства, предоставленный Национальным центром льда и снега [12], версии v2.0. Архив содержит информацию, полученную для снеготазов Северного полушария, за исключением ледников и ледниковых щитов, с 1979 по 2014 г. Вычисление водного эквивалента ведётся по методологии, описанной в работах [13, 14]. Подход основан на ассимиляции данных спутникового микроволнового радиометра с наземными данными синоптических метеостанций. Используются данные спутниковых датчиков в диапазонах 19 и 37 ГГц с пространственным разрешением около 25 км. Применяется описанная ранее двухчастотная модель восстановления водного эквивалента по спутниковым данным. Основные источники данных получены с платформ DMSP 5D-2/F11, DMSP 5D-2/F13, DMSP 5D-2/F8, DMSP 5D-3/F17, GROUNDSTATIONS и NIMBUS-7 по сенсорным датчикам SMMR, SSM/I и SSMIS. Большие водоёмы (океан и озёра) маскируются и удаляются из анализа.

### **Определение характеристик снежного покрова для севера Западной Сибири: результаты и обсуждение**

После тестирования методики на территории Московской области мы применили её для исследования территории Западной Сибири (точнее северной и центральной её частей, куда вхо-

Коэффициенты корреляции данных наблюдений за период с 1979 по 2013 г. с характеристиками снежного покрова, полученными различными методами

| Индекс<br>WMO | Метеостанции   | Коэффициенты корреляции данных наблюдений                |   |   |  |   |
|---------------|----------------|--|---|---|--|---|
|               |                | с высотой снежного покрова по расчётам на модели SPONSOR | с водным эквивалентом снега по расчётам на модели SPONSOR | с высотой снежного покрова по ERA-Interim | с водным эквивалентом снега по ERA-Interim | с водным эквивалентом снега по спутниковым данным |
| 23146         | Мыс Каменный   | 0,91   | –   | 0,54                                      | –  | –   |
| 23256         | Тазовское      | 0,69   |   | 0,45                                      |  |   |
| 23330         | Салехард       | 0,69   | 0,7   | 0,6                                       | 0,58                                       | 0,36  |
| 23445         | Надым          | 0,85   | 0,85  | 0,58                                      | 0,51                                       | 0,55  |
| 23552         | Тарко-Сале     | 0,88   | 0,84  | 0,46                                      | 0,4  | 0,53  |
| 23625         | Сосьва         | 0,92   | 0,78  | 0,61                                      | 0,5  | 0,79  |
| 23631         | Березово       | 0,87   | 0,75  | 0,59                                      | 0,52                                       | 0,87  |
| 23662         | Толька         | 0,89   | 0,85  | 0,64                                      | 0,58                                       | 0,62  |
| 23724         | Няксимволь     | 0,85   | –   | 0,7                                       | –  |   |
| 23734         | Октябрьское    | 0,92   | 0,88  | 0,63                                      | 0,56                                       | 0,59  |
| 23849         | Сургут         | 0,92   | –   | 0,64                                      | –  |   |
| 23867         | Ларьяк         | 0,87   | 0,73  | 0,6                                       | 0,54                                       | 0,45  |
| 23929         | Шаим           | 0,88   | 0,78  | 0,73                                      | 0,64                                       | 0,71  |
| 23933         | Ханты-Мансийск | 0,89   | 0,81  | 0,6                                       | 0,55                                       | 0,78  |
| 28064         | Леуши          | 0,89   | –   | 0,74                                      | –  |   |
| 28275         | Тобольск       | 0,84   |   | 0,7                                       |  |   |
| 28367         | Тюмень         | 0,85   | 0,8   | 0,72                                      | 0,62                                       | 0,62  |
| 28465         | Ялуторовск     | 0,85   | 0,76  | 0,71                                      | 0,6  | 0,69  |
| 28573         | Ишим           | 0,86   | 0,81  | 0,73                                      | 0,66                                       | 0,63  |

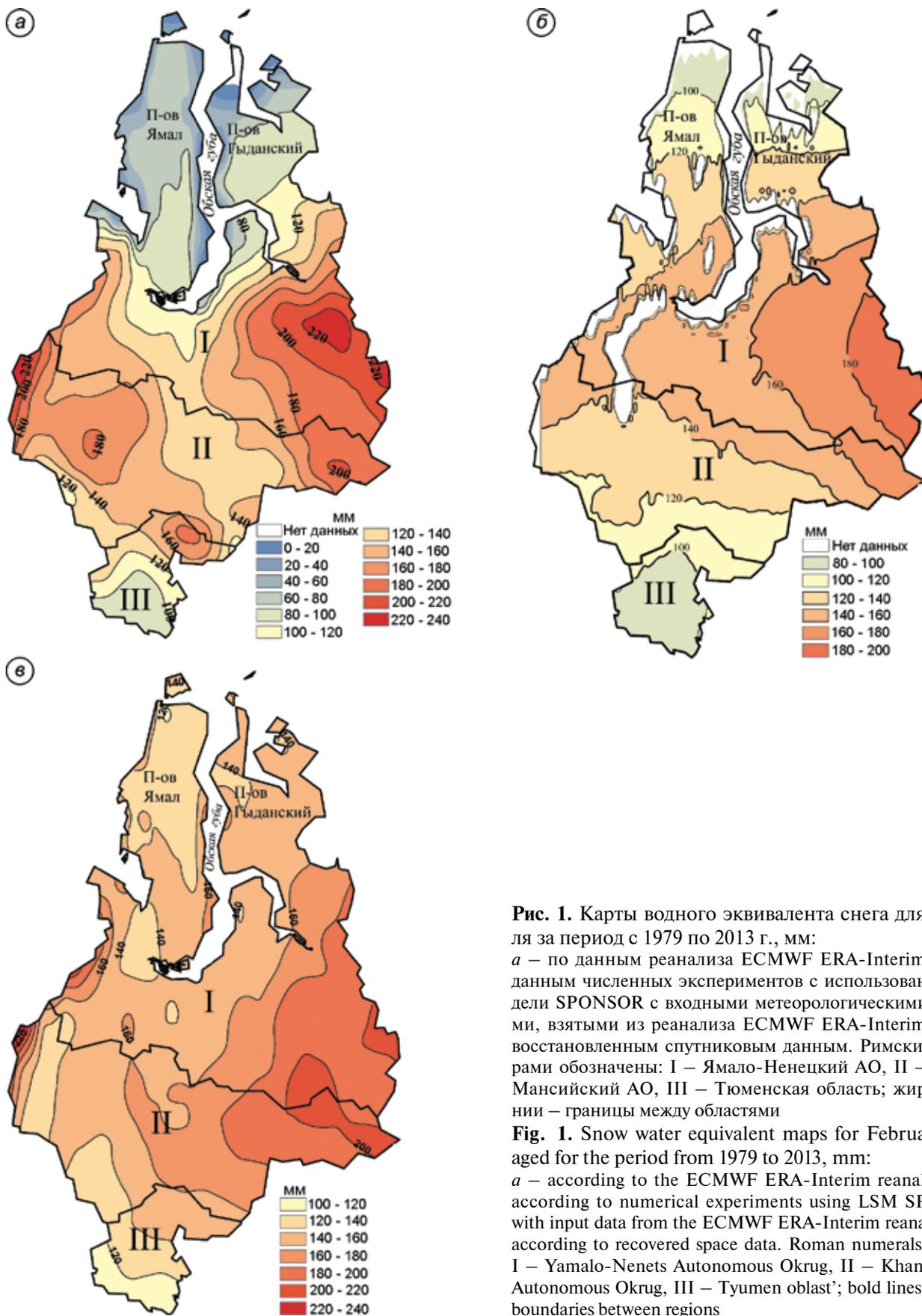
\*Прочерки – данные отсутствуют.

дят Тюменская область, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа). Данная территория отличается обильным сезонным снежным покровом, неравномерно распределённым на ней [15]. Значительная часть территории, прежде всего её север и северо-восток, практически не охвачена сетью метеостанций, поэтому полученные результаты расчётов характеристик снежного покрова имеют большое практическое значение. Анализ, выполненный разными авторами, показал, что в последние десятилетия снежный покров здесь испытывал сильные изменения, природа которых до конца не выяснена [8, 16 и др.].

Как уже отмечалось, при расчёте характеристик снежного покрова на территории Западной Сибири в качестве входных данных для модели SPONSOR мы использовали поля метеоэлементов из реанализа ECMWF ERA-Interim [6] за период с 1979 по 2013 г. Пространственное

разрешение сетки данного реанализа составляет  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  по широте и долготе. Расчёты вели по области, площадь которой превышала площадь исследуемого региона. При проведении изолиний использовались точки, лежащие в том числе и вне границ региона. Результаты расчётов сравнивались с имеющимися данными станций снегомерных съёмов.

На рис. 1 показаны распределённые по площади исследуемого региона значения водного эквивалента снега для февраля в среднем за период с 1979 по 2013 г. В таблице приведены индексы WMO и названия станций, данные которых сравнивали с результатами расчётов. На рис. 2, в дано пространственное распределение станций по территории региона. Видно, что распределены они весьма неравномерно, а в северной и северо-восточной частях региона наземные наблюдения практически отсутствуют. Показаны только те станции, для которых есть

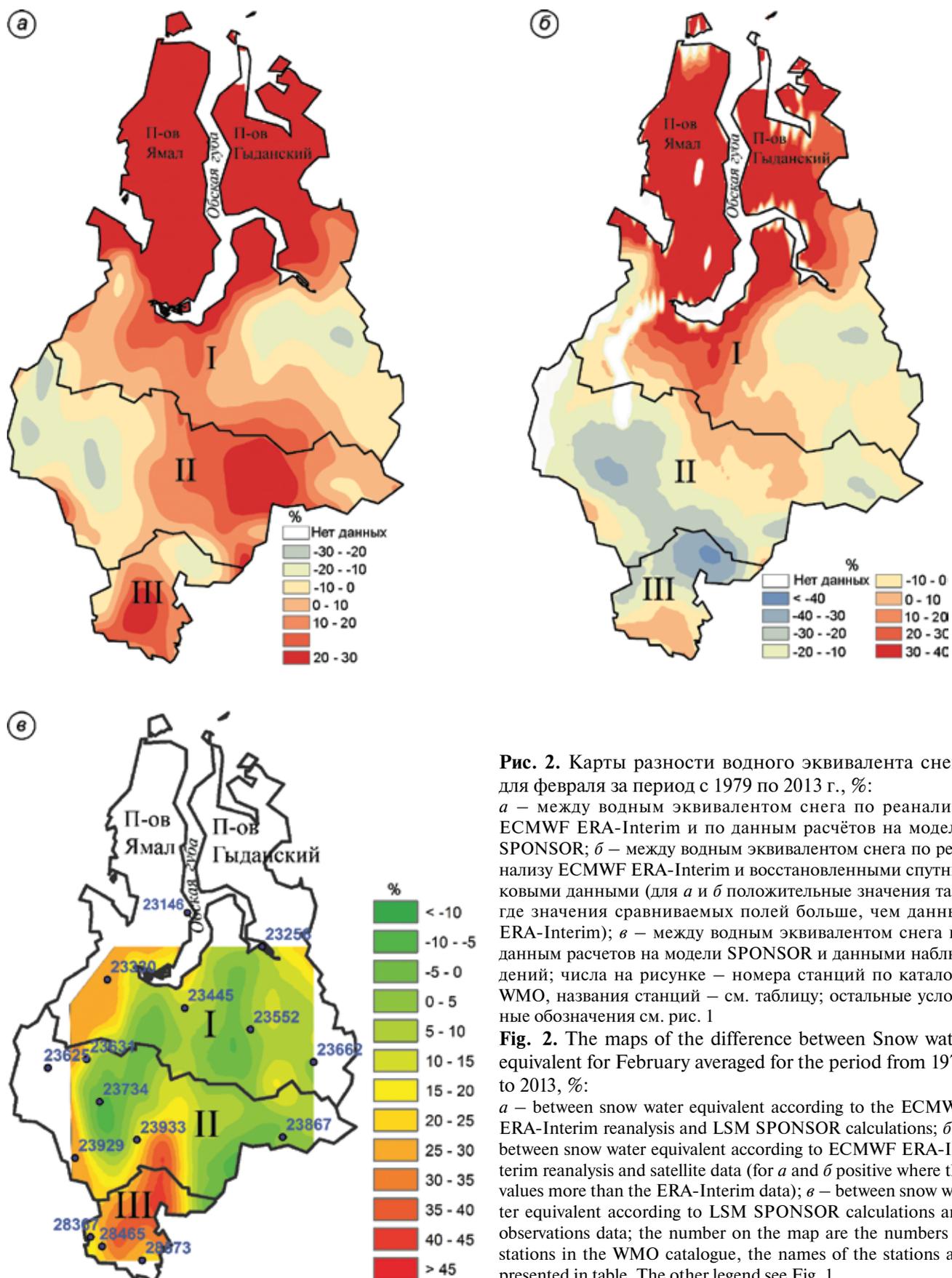


**Рис. 1.** Карты водного эквивалента снега для февраля за период с 1979 по 2013 г., мм:

*a* – по данным реанализа ECMWF ERA-Interim; *б* – по данным численных экспериментов с использованием модели SPONSOR с входными метеорологическими данными, взятыми из реанализа ECMWF ERA-Interim; *в* – по восстановленным спутниковым данным. Римскими цифрами обозначены: I – Ямало-Ненецкий АО, II – Ханты-Мансийский АО, III – Тюменская область; жирные линии – границы между областями

**Fig. 1.** Snow water equivalent maps for February averaged for the period from 1979 to 2013, mm:

*a* – according to the ECMWF ERA-Interim reanalysis; *б* – according to numerical experiments using LSM SPONSOR with input data from the ECMWF ERA-Interim reanalysis; *в* – according to recovered space data. Roman numerals indicate: I – Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, II – Khanty-Mansi Autonomous Okrug, III – Tyumen oblast'; bold lines show the boundaries between regions



**Рис. 2.** Карты разности водного эквивалента снега для февраля за период с 1979 по 2013 г., %:

*а* – между водным эквивалентом снега по реанализу ECMWF ERA-Interim и по данным расчётов на модели SPONSOR; *б* – между водным эквивалентом снега по реанализу ECMWF ERA-Interim и восстановленными спутниковыми данными (для *а* и *б* положительные значения там, где значения сравниваемых полей больше, чем данные ERA-Interim); *в* – между водным эквивалентом снега по данным расчетов на модели SPONSOR и данными наблюдений; числа на рисунке – номера станций по каталогу WMO, названия станций – см. таблицу; остальные условные обозначения см. рис. 1

**Fig. 2.** The maps of the difference between Snow water equivalent for February averaged for the period from 1979 to 2013, %:

*a* – between snow water equivalent according to the ECMWF ERA-Interim reanalysis and LSM SPONSOR calculations; *b* – between snow water equivalent according to ECMWF ERA-Interim reanalysis and satellite data (for *a* and *b* positive where the values more than the ERA-Interim data); *v* – between snow water equivalent according to LSM SPONSOR calculations and observations data; the number on the map are the numbers of stations in the WMO catalogue, the names of the stations are presented in table. The other legend see Fig. 1

полные ряды наблюдений за снеозапасами за весь рассматриваемый период. Станции 23146 (Мыс Каменный) и 23256 (Тазовское), для которых нет полных данных о снегозапасах, приведены только для обозначения северной границы распространения сети метеонаблюдений.

К сожалению, не на всех использованных станциях ведутся измерения и толщины снежного покрова, и водного эквивалента снега. Отметим, что по сравнению с имеющейся сетью станций наблюдений сетка реанализа ECMWF ERA-Interim имеет значительно лучшее пространственное разрешение. Мы предполагаем, что при получении хорошего совпадения результатов расчётов характеристик снежного покрова со стационарными данными наблюдений аналогичные результаты для территорий, не охваченных станциями, будут иметь высокую степень достоверности.

В таблице показаны коэффициенты корреляции между имеющимися данными наблюдений по толщине снежного покрова и снегозапасам на станциях снегомерных съёмок и результатами численных экспериментов с использованием модели SPONSOR с входными метеоданными из реанализа ECMWF ERA-Interim для тех же координат (все расчёты за период с 1979 по 2013 г.). Для приведения данных из узлов сетки реанализа к координатам точек станций использовался метод билинейной интерполяции из четырёх ближайших к станции узлов. Анализ таблицы показывает, что качество результатов, полученных с помощью модели SPONSOR, достаточно высокое, особенно по толщине снежного покрова: коэффициенты корреляции составляют 0,84–0,91 для толщины и 0,73–0,88 для водного эквивалента (несколько ниже значения коэффициента корреляции только на станции Салехард). Они существенно выше, чем для данных, взятых непосредственно из реанализа. Кроме того, качество воспроизведения моделью наблюдаемых значений толщины и водного эквивалента снега, в общем, равномерно по исследуемой территории. Анализ временных рядов показал, что для всего периода (с 1979 по 2013 г.) величины линейного тренда водного эквивалента снега незначимы для большей части данной территории.

В последней колонке таблицы приведены коэффициенты корреляции между данными на-

блюдений станций снегомерных съёмок и восстановленными спутниковыми данными по снегозапасам из архива [12]. Отметим, что для большинства станций данные архива удовлетворительно согласуются с данными наблюдений. Однако следует помнить, что использованный архив данных о водном эквиваленте представляет собой не просто восстановленные спутниковые данные, а некую комбинацию спутниковых и наземных данных, что, по-видимому, увеличивает степень согласованности с наблюдениями в окрестностях точек станций.

На рис. 1 показаны распределённые по площади исследуемого региона значения водного эквивалента для февраля в среднем за 1979–2013 гг. по данным реанализа ECMWF ERA-Interim, численных экспериментов с использованием модели SPONSOR и по данным водного эквивалента снега из архива [12]. Пробелы на рис. 1, в связаны с отсутствием данных для озёр, больших рек (нижнее течение р. Обь) и океанов, что за счёт осреднения по площади приводит к искажению данных и на побережьях. Выбор февраля обусловлен тем, что снегозапасы в этот период близки к максимальным для всей территории региона.

Отметим, что распределение снегозапасов по территории региона, полученное разными методами, качественно схоже: максимальные значения снегозапасов наблюдаются в центральной и особенно в восточной частях (для рис. 1, а, б отмечаются также максимумы вблизи западной границы региона, связанные с влиянием больших снегозапасов Полярного и Приполярного Урала). К северу и югу региона снегозапасы уменьшаются, причём для модельных данных (см. рис. 1, б) градиенты их поля существенно меньше, чем для спутниковых, особенно для данных реанализа. В северной части региона, не охваченной данными наземных наблюдений, реанализ даёт наименьшие из трёх карт значения, наибольшие данные показывают модельные расчёты. По спутниковым данным получаются значения, близкие к данным модельных расчётов, отличие их в меньшую сторону составляет 10–20%. В южной части региона спутниковые значения снегозапасов наименьшие для трёх методов, а данные модельных расчётов показывают наибольшие значения.

На рис. 2, а, б приведены карты сравнения данных о снегозапасах согласно реанали-

за ECMWF ERA-Interim с данными модельных расчётов (см. рис. 2, *а*) и с восстановленными спутниковыми данными (см. рис. 2, *б*). Построены карты разности в процентах по отношению к данным ERA-Interim. Положительные значения там, где значения сравниваемых полей больше, чем данные ERA-Interim, отрицательные — где меньше, чем у ERA-Interim. Анализ карт показывает, что различия полей снегозапасов, определённых различными способами, весьма существенны. Для севера региона и спутниковые данные, и данные модельных расчётов показывают значительно большие значения снегозапасов, чем данные реанализа (различия превышают 40%). Для востока и запада, а для спутниковых данных и для юго-запада региона данные реанализа, напротив, дают более высокие значения снегозапасов (на 20–40%), чем оба других метода, причём различия со спутниковыми данными более значительны (т.е. спутниковые данные занижают значение водного эквивалента снега по сравнению и с данными реанализа, и с модельными расчётами). На юге региона спутниковые данные хорошо согласуются с данными реанализа, а модельные расчёты показывают завышенные, иногда весьма существенно, значения.

Таким образом, мы можем отметить весьма высокую неопределённость поля снегозапасов, воспроизводимого тремя методами. Для некоторого уменьшения этой неопределённости мы дополнительно сравнивали поля, построенные по данным модельных расчётов и по материалам наблюдений. Трудность такого сравнения состоит в том, что построение карт для всей рассматриваемой территории только по данным наблюдений невозможно из-за недостатка станций наблюдений, особенно в северных и восточных областях, поэтому можно показать лишь часть исследуемой территории. Но и для исследуемой части, строго говоря, уверенное проведение изолиний водного эквивалента снега возможно только для юго-западной части региона с достаточной плотностью станций. На остальной территории станции находятся друг от друга на значительном расстоянии, и изолинии схематично отражают только основные особенности пространственной вариации поля снегозапасов.

На рис. 2, *в* показаны карты разности (%) между данными о водном эквиваленте снега для

модельных расчётов и данными наблюдений для февраля за исследуемый период (с 1979 по 2013 г.) по той части региона, которая хотя бы в некоторой степени охвачена сетью наземных станций. Используемые для построения поля станции показаны точками с их номерами по каталогу WMO; соотнесение названия станций с их номерами см. в табл. 1. Анализ карты показывает, что для большей части региона, кроме юга, отмечается хорошее соответствие между полем водного эквивалента снега по данным наблюдений и по модельным расчётам: различия не превышают 10–15%. Данные модельных расчётов почти везде несколько превышают наблюдаемые значения снегозапасов, но для юга региона это завышение велико (более 30%). Возможно, причины такого завышения заключаются в ошибках данных реанализа, особенно осадков, использованных в качестве входных параметров для модельных расчётов: для «чистоты» эксперимента в модельных расчётах использованы только данные реанализа; метеоданные наземных станций не принимали во внимание. Однако для большей части региона, где возможно (с оговорками) построение изолиний поля снегозапасов по данным наблюдений, можно констатировать хорошее соответствие расчётных и наблюдаемых данных.

На возможность возникновения больших ошибок реанализа в определении интегрального влагосодержания атмосферы (прямо влияющего на величину осадков по данным реанализа) по спутниковым данным именно для исследуемого региона указывает анализ данных реанализа, выполненный в работе [17]. Согласно данным этой работы, для реанализа ERA ошибка определения интегрального влагосодержания атмосферы для Сибири наибольшая из всех континентальных районов и зимой может достигать 25–30%. В этой же работе приведены исследования возможных искажений трендов различных метеоданных из-за неоднородности данных, вызванной изменением систем наблюдений в период времени, охваченный реанализом. Для севера исследуемого региона, где отсутствуют данные наземных наблюдений, различия модельных и спутниковых данных о снегозапасах составляют не более 20%, за исключением территорий, прилегающих к Северному Ледовитому океану, где спутниковые данные дают существенно

меньшие (на 30–35%) значения снеготазпасов по сравнению с модельными. Данные же реанализа ERA-Interim для северной части региона, по-видимому, существенно занижены.

### Выводы

1. Сравнение данных о снеготазпасах, полученных различными методами (расчёты с помощью модели SPONSOR, восстановленные спутниковые данные и данные реанализа) для февраля, показывает существенную неопределённость полей снеготазпасов, причём искажения поля неравномерно распределены по территории региона. Пока ни один из методов не может быть использован как эталонный (единственный) для определения водного эквивалента снега с высоким пространственным разрешением при отсутствии данных наземных наблюдений.

2. Расчёты с использованием модели SPONSOR несколько завышают значения снеготазпасов, однако это завышение составляет не более 10–20% для большей части территории, за исключением юга. Коэффициенты корреляции между данными наблюдений за период с 1979 по 2013 г. и результатами численных расчётов на модели для рядов водного эквивалента и особенно для рядов толщины снежного покрова — наилучшие из всех методов (см. таблицу).

3. Восстановленные спутниковые данные из использованного архива [12] несколько занижают значения снеготазпасов, но для центра и юга территории наблюдается удовлетворительное соответствие с данными наблюдений. Использованный архив данных о водном эквиваленте снега предоставляет не просто восстановленные спутниковые данные, а ассимилирует спутниковые и наземные данные, т.е., строго говоря, их нельзя назвать спутниковыми в чистом виде, а результаты их сравнения с наблюдениями независимыми.

4. Данные расчётов на модели SPONSOR достаточно хорошо воспроизводят снеготазпасы для центральной, восточной и, наиболее вероятно, северной частей региона, отличаясь от реальных на 10–15% в большую сторону. В южной части региона (Тюменская область) данные ERA-Interim лучше воспроизводят снеготазпасы, чем модельные данные. Причиной таких сильных отклонений расчётных данных от данных

наблюдений в этой части региона могут быть ошибки входных метеоданных, взятых из реанализа, прежде всего осадков.

5. Данные о снеготазпасах, взятые непосредственно из реанализа ERA-Interim, дают большие искажения поля водного эквивалента как в сторону занижения, так и в сторону завышения в разных частях региона: значения снеготазпасов для севера региона, скорее всего, сильно занижены, а для запада и востока — завышены. Это также может указывать на ошибки в полях зимних осадков, определяемых реанализом для данного региона. Водный эквивалент снега для территории Западной Сибири в отличие от Московской области [1] воспроизводится реанализом ERA-Interim хуже.

6. Сравнение результатов расчётов и данных наблюдений позволяет констатировать, что реанализ ERA-Interim даёт, в целом, достаточно качественные метеоданные для расчёта характеристик снежного покрова на обширных равнинных территориях, что подтверждает выводы, сделанные в работе [1]. Предложенная методика расчёта характеристик снежного покрова с высоким пространственным и временным разрешением с помощью модели локального теплообмена SPONSOR с входными метеоданными реанализов может давать достаточно хорошие результаты и на территориях с редкой сетью станций наблюдений.

**Благодарности.** Исследование характеристик снежного покрова для Западной Сибири выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00555. Валидация модели SPONSOR и модели снежного покрова проведена по теме 79.5 Госзадания ИГ РАН «Исследования механизмов изменений климата и их последствий для окружающей среды и социально-экономических процессов в России». Анализ спутниковых данных по снежному покрову выполнен при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

**Acknowledgments.** Study of characteristics of snow cover in Western Siberia performed with the support of RFBR grant № 17-05-00555. Validation of the snow cover model and the model SPONSOR per-

formed on the topic 79.5 State job IG RAS «Studies of the mechanisms of climate changes and their consequences for the environment and socio-economic processes in Russia». Analysis of satellite data for

snow cover was supported by the Fundamental research Program of Presidium of RAS «Search fundamental research in the development of the Arctic zone of the Russian Federation».

### Литература

### References

1. Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. P. 369–380. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380.
2. 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.
3. Шмакин А.Б., Рубинштейн К.Г. Валидация динамико-статистического метода детализации метеорологических параметров // Тр. Гидрометеоцентра России. 2006. Вып. 341. С. 186–208.
4. 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.
5. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Сибирское отделение АН СССР, 1963. 378 с.
6. Электронный ресурс: <http://www.ecmwf.int>.
7. Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Оценка снегозапасов по данным спутниковой информации // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 76–80.
8. Попова В.В., Морозова П.А., Титкова 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.
9. Березин К.Ю., Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. Оценка влагозапаса снежного покрова по данным спутниковой радиометрии для степной зоны Западной Сибири // Вестн. Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. Вып. 5 (51). С. 9–12.
10. Chang A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Hartline B.K. Snow water equivalence determination by microwave radiometry // Cold Regions Science and Technology. 1982. № 5. P. 259–267.
11. Кислов А.В. Связь границы снежного покрова на континентах с температурой и влажностью воздуха // Метеорология и гидрология. 1994. № 8. С. 52–56.
12. Электронный ресурс: <http://nsidc.org/data/NSIDC-0595>.
1. Turkov D.V., Sokratov V.S. Calculating of snow cover characteristics on a plain territory using the model SPONSOR and data of reanalyses (by the example of Moscow region). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (3): 369–380. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380.
2. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements. *Global and Planetary Change*. 1998, 19 (1–4): 49–62.
3. Shmakin A.B., Rubinshtein K.G. Validation of the dynamical-statistical method of detailsation of meteorological parameters. *Trudy Gidrometeotsentra Rossii. Proc. of Hydrometeocentre of Russia*. 2006, 341: 186–208. [In Russian].
4. 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, XIII (4): 69–79. [In Russian].
5. Dunin A.K. *Mekhanika meteley. Mechanics of blizzards*. Novosibirsk, Siberian Branch, Russian Academy of Siences, 1963: 378 p. [In Russian].
6. <http://www.ecmwf.int>
7. Kitaev L.M., Titkova T.B. Estimation of snow storage using satellite information. *Kriosfera Zemli. Earth Cryosphere*. 2010, XIV (1): 76–80. [In Russian].
8. Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryayeva 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: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86. [In Russian].
9. Berezin K.Yu., Dmitriev A.V., Dmitriev V.V. Estimation of snow water equivalent by using of satellite radiometry for the steppe zone of Western Siberia. *Vestnik Sibirskogo Aerokosmicheskogo Universiteta. Herald of the Siberian Aero cosmic University*. 2013, 5 (51): 9–12. [In Russian].
10. Chang A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Hartline B.K. Snow water equivalence determination by microwave radiometry. *Cold Regions Science and Technology*. 1982, 5: 259–267.
11. Kislov A.V. Relationship of the snow cover L boundary on continents with temperature and humidity. *Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and Hydrology*. 1994, 8: 52–56. [In Russian].
12. <http://nsidc.org/data/NSIDC-0595>

13. Pulliainen J. Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations // *Remote Sensing of Environment*. 2006. V. 101. P. 257–269. doi: 10.1016/j.rse.2006.01.002.
14. Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J.-P, Koskinen J., Bojkov B. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of spaceborne radiometer data and ground-based measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. Is. 12. 15 December 2011. P. 3517–3529. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.014.
15. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М.: изд. Ин-та географии РАН, 1997. Т. 2. Кн. 1. 264 с.
16. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 // *Environmental Research Letters*. 2011. № 6. 045204. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045204.
17. Bengtsson L., Hagemann S., Hodges K.I. Can climate trends be calculated from reanalysis data? // *Journ. of Geophys. Research*. 2004. V. 109. D11111. 8 p. doi: 10.1029/2004JD004536.
13. Pulliainen J. Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*. 2006, 101: 257–269. doi: 10.1016/j.rse.2006.01.002.
14. Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J.-P, Koskinen J., Bojkov B. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of spaceborne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2011, 115 (12). 15 December 2011: 3517–3529. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.014.
15. World atlas of snow and ice resources / Ed. V.M. Kotlyakov. Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 1997. V. 2. Book 1. 264 p. [In Russian].
16. Bulygina' O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environmental Research Letters*. 2011, 6: 045204. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045204.
17. Bengtsson L., Hagemann S., Hodges K.I. Can climate trends be calculated from reanalysis data? *Journ. of Geophys. Research*. 2004, 109. D11111: 8 p. doi: 10.1029/2004JD004536.