

Оценка точности глобальных данных по влагозапасам в снежном покрове на примере бассейна р. Северная Двина

М. В. Георгиевский, В. А. Хомякова, Т. В. Паршина

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Георгиевский М. В., Хомякова В. А., Паршина Т. В. (2020). Оценка точности глобальных данных по влагозапасам в снежном покрове на примере бассейна р. Северная Двина. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (3), 433–454.

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.302>

В статье представлена комплексная оценка точности глобальных архивов данных по запасу воды в снежном покрове для территории бассейна р. Северная Двина, где снег играет важную роль в формировании стока весеннего половодья. В качестве исходной информации использовались шесть глобальных баз данных по влагозапасам в снежном покрове, представленных на веб-ресурсе Национального центра данных по снегу и льду США (все доступные глобальные данные по влагозапасам на данный момент). В качестве данных наземных наблюдений анализировались результаты маршрутных снегомерных съемок, представленных на веб-ресурсе Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. Оценка точности архивных значений влагозапасов осуществлялась путем сравнения с наземными наблюдениями в три последовательных этапа для территорий различных размеров. На первом этапе рассматривался участок площадью 625 км² (1 ячейка равномерной сетки архива) с расположенной на нем метеостанцией, на втором — бассейн р. Малая Северная Двина (86 тыс. км²), на заключительном этапе — бассейн р. Северная Двина (357 тыс. км²). Для осуществления поставленной задачи (оценки точности и взаимосравнения данных) была разработана методика ранжирования, основанная на сравнении нескольких параметров, характеризующих количественные изменения снежного покрова в периоды формирования и перед началом таяния (максимальных влагозапасов). Ранжирование позволило выявить наиболее перспективные для использования в научных исследованиях глобальные архивы данных по влагозапасам. Было показано, что с увеличением площади рассматриваемой территории увеличивается степень соответствия между архивными данными и данными наземных наблюдений. Кроме того, был отмечен феномен обратной зависимости данных микроволнового дистанционного зондирования влагозапасов от приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: Северная Двина, глобальные архивы данных, максимальные влагозапасы в снеге, снегомерные съемки, сравнительный анализ точности.

1. Введение

Основной количественной характеристикой снежного покрова является величина запаса воды в снеге (или влагозапасов/снегозапасов, эквивалента воды в снежном покрове), которая отражает объем накопленных за зимний период твер-

дых осадков и является одним из основных параметров, используемых в методиках прогноза весеннего половодья и талого стока.

В настоящее время основной источник информации о запасе воды в снеге — маршрутные снегомерные съемки, выполняемые на станциях гидрометеорологической сети. Однако этих данных не всегда бывает достаточно для исследований, так как они имеют точечный характер, причем наземные наблюдения распределены по территории страны крайне неравномерно. Особенно остро эта проблема встала в последние десятилетия, поскольку гидрометеорологическая сеть Росгидромета в конце XX века была сокращена более чем на 30 % по сравнению с 1986 г. (Обзор..., 2019; О деятельности..., 2019). В качестве дополнительного источника информации могут быть использованы данные глобальных архивов (баз данных) по запасу воды в снежном покрове (включая полученные на основе спутникового зондирования), поскольку они имеют ряд преимуществ, восполняющих недостатки данных наземных наблюдений. Среди этих преимуществ, прежде всего, стоит назвать: глобальность (данные доступны для всей территории Российской Федерации и сопредельных территорий); регулярность и возможность выбора данных различной периодичности; отсутствие пропущенных значений (т.е. возможность формирования многолетних рядов данных без пропусков) и т.п.

Необходимо отметить, что одним из важнейших и приоритетных направлений «Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 г. (с учетом изменения климата)», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации в 2010 г. (Стратегия..., 2010), является перенос основной информационной нагрузки с наземной гидрометеорологической сети наблюдений на дистанционные методы измерения и альтернативные источники информации.

Цель данной статьи — выполнить комплексный анализ точности и взаимосравнение всех доступных в настоящий момент глобальных баз данных по запасу воды в снежном покрове (под глобальным пространственным покрытием подразумевается минимальное покрытие размером с Северное полушарие или близкое к этому); выявить, какая из баз данных предоставляет наиболее близкие к наблюдаемым по снегомерным съемкам значения влагозапасов, а также дать рекомендации для дальнейшего использования данного типа информации.

Для осуществления поставленной задачи были специально разработаны программный комплекс обработки и анализа информации глобальных баз данных по влагозапасам в снежном покрове, а также методика ранжирования и оценки точности данных путем сравнения с данными наземных наблюдений (снегомерными съемками).

2. Методика исследования

2.1. Бассейн р. Северная Двина

Река Северная Двина является одним из крупнейших водотоков европейского северо-востока России (рис. 1). Образуется при слиянии рек Сухоны и Юга и впадает в Белое море. Ее протяженность вместе с р. Сухона составляет 1300 км, а по площади водосбора (357 тыс. км²) река занимает 11 место в России (Ильина и Грахов, 1987).



Рис. 1. Местоположение водосбора р. Малая Северная Двина в пределах бассейна р. Северная Двина, а также расположение метеорологических станций, используемых в исследованиях, включая метеостанцию г. Никольска (выделена розовым кругом)

Выбор бассейна р. Северная Двина в качестве объекта исследований объясняется рядом причин. Во-первых, территория бассейна является идеальным полигоном для осуществления поставленной цели исследований, так как около шести месяцев в году (с ноября по апрель) бассейн полностью покрыт снежным покровом. Во-вторых, р. Северная Двина имеет восточноевропейский тип водного режима: преимущественно снеговое питание (50–60%), мощное весеннее половодье, летне-осеннюю межень, нарушаемую паводками, устойчивую зимнюю межень. Половодье обычно начинается в середине — третьей декаде апреля, его продолжительность 75–80 суток, на половодье приходится 50–70% годового стока воды, т. е. в случае успешной разработки метода определения максимального запаса воды в снежном покрове перед началом таяния снега, на основе информации одного из анализируемых архивов глобальных данных, максимальные влагозапасы могут быть потенциально использованы в одной из методик прогноза стока весеннего половодья. В-третьих, в последние десятилетия в бассейне наблюдаются значительные изменения климата, касающиеся в первую очередь зимнего и переходных периодов, которые напрямую влияют на изменения водного, уровня и ледового режимов рек исследуемого бассейна. Глобальные архив-

ные данные позволяют сформировать многолетние непрерывные ряды данных по запасам воды в снеге, что позволяет использовать их в комплексной оценке анализа причин и взаимосвязи происходящих гидрологических и климатических изменений в бассейне. Кроме того, проблема заторных наводнений на реках бассейна Северной Двины, прежде всего р. Малая Северная Двина (Георгиевский и др., 2017; 2018), сопрягается с вопросами формирования и прогноза половодного стока, подавляющую долю которого составляет запас воды, накопленный в снежном покрове.

2.2. Глобальные архивы данных по запасам воды в снежном покрове

В сравнительном анализе участвовали шесть баз данных, предоставляющих информацию по запасу воды в снеге. В табл. 1 представлены их основные характеристики. Все рассматриваемые архивы данных находятся в свободном доступе на веб-ресурсе Национального центра данных по снегу и льду США (www.nsidc.org). Общей для них характеристикой является минимальное покрытие размером с Северное полушарие, что дает возможность применять эти данные для любого региона Российской Федерации, а также сопредельных территорий.

Необходимо отметить, что одновременная комплексная оценка точности всех существующих глобальных баз данных по запасу воды в снежном покрове до настоящего момента не осуществлялась как в России, так и за рубежом.

Из шести баз данных, указанных в таблице, многие имеют по несколько модификаций: три представлены в различном временном разрешении (суточное, пятидневное/недельное и месячное), и одна помимо среднемесячных предоставляет максимальные значения влагозапасов за месяц. Однако при таком обилии доступных для исследования данных необходимо иметь в виду трудоемкость обработки информации и осуществления расчетов (базы данных имеют разные форматы данных, периоды наблюдений, пространственные и временные разрешения). Это привело авторов к решению ограничиться анализом только среднемесячных влагозапасов.

Ниже приводится краткое описание используемых в исследовании архивов информации.

Глобальная климатическая база данных месячных значений снегозапасов Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology (далее — SWEC) является родоначальником всех глобальных баз данных по запасу воды в снеге, представленным веб-ресурсом Национального центра данных по льду и снегу США. Она содержит среднемесячные значения запаса воды в снежном покрове. Первый релиз базы данных датируется 1 мая 2005 г., последние обновления — 1 февраля 2008 г. Данные представлены в 25-километровых равновеликих масштабируемых ячейках сетки земной поверхности Equal-Area Scalable Earth Grids (EASE-Grids) для Северного и Южного полушарий за период с ноября 1978 г. по май 2007 г. (период наблюдений составляет чуть меньше 30 лет). Расчет запаса воды в снеге основан на спутниковых данных о радиояркостной температуре, фиксируемой сканирующим многоканальным микроволновым радиометром Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) с использованием специального сенсора Special Sensor

Таблица 1. Глобальные архивы данных по влагозапасам в снежном покрове, используемые в исследованиях для сравнительного анализа и оценки точности (данные доступны на сайте Национального центра данных по снегу и льду США: www.nsidc.org)

№ п/п	Название базы данных	Разрешение		Тип данных	Период наблюдений	Размер массива для Северного полушария	Формат данных	Описание базы данных
		временное	пространственное					
1	Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology, Version 1	месяц	25 × 25 км	влагозапас в снеге (мм)	1978-01 — 2007-12	721 × 721	Binary	(Armstrong et al., 2005)
2	AMSR-E/Aqua L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2	сутки 5 дней месяц	25 × 25 км	влагозапас в снеге (мм)	2002-06-20 — 2011-10-03	721 × 721	HDF	(Tedesco et al., 2004a; 2004b; 2004c)
3	AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1	сутки 5 дней месяц	25 × 25 км	влагозапас в снеге (мм)	2012-07-02 — наст. время	721 × 721	HDF-EOS	(Tedesco and Jeayaratnam, 2019a; 2019b; 2019c)
4	ESA GlobSnow Snow Water Equivalent (SWE), Version 2	сутки неделя месяц*	25 × 25 км	влагозапас в снеге (мм)	1979-09-11 — наст. время	721 × 721	HDF NetCDF	(Takala et al., 2011)
5	Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover, Version 1	8 дней	25 × 25 км	влагозапас (мм) / площадь снежного покрова (%)	2000-03-05 — 2008-02-01	721 × 721	HDF	(Brodzik et al., 2007)
6	Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1	месяц	24 × 24 км	влагозапас (мм) / Высота снежного покрова (см)	1998-08-01 — 2018-12-31	706 × 706	ASCII GeoTIFF	(Brown and Brasnett, 2010)

* месячные данные по влагозапасу в снеге представлены в двух вариантах: в виде максимальных и среднемесячных значений.

Microwave/Imagers (SSM/I) для получения изображений в микроволновом диапазоне. Детальное описание алгоритма и уравнений представлено в работах, например, (Chang et al., 1987; 1997).

Вторая база данных — AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids (далее — AMSR-E) является в своем роде продолжением и правопреемником архива SWEC. Месячные данные по запасу воды в снеге AMSR-E доступны в том же пространственном и временном разрешениях, а также в той же проекции (EASE-Grids) за период с июня 2002 г. по октябрь 2011 г. Исходные данные для определения запаса воды в снеге получены с помощью усовершенствованного пассивного микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR), запущенного на спутнике Aqua в мае 2002 г. Основой алгоритма определения запаса воды в снеге является та же двухчастотная модель, базирующаяся на его восстановлении по данным о радиояркостной температуре двух каналов радиометра, что использовалась для создания данных SWEC. В исходную модель были внесены модификации с целью усовершенствования метода расчета, описанные в (Kelly et al., 2005a; 2005b).

Третья база данных, рассмотренная в рамках исследования, — продукт объединения данных усовершенствованных микроволновых сканирующих радиометров AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent (далее — AMSR-U2). Этот архив, как видно из названия и характеристик (табл. 1), является логическим продолжением проекта AMSR-E (более современный радиометр AMSR2 является улучшенной версией радиометра AMSR-E). Однако предварительный анализ данных AMSR-U2 выявил, что они демонстрируют практически полное отсутствие снеготпасов в исследуемом бассейне (как и для всей европейской территории России), что с точки зрения климатических и географических особенностей исследуемого региона не является возможным. Поэтому данные базы AMSR-U2 не были использованы в сравнительном анализе. Авторы надеются, что эта ошибка будет исправлена создателями базы в ближайшее время.

Четвертой базой данных является ESA GlobSnow Snow Water Equivalent (далее — ESA), разработанная в Европейском космическом агентстве. Этот архив представляет несомненный интерес, поскольку содержит данные иного генезиса, чем архивы SWEC и AMSR-E: вычисление запаса воды в снежном покрове основано на ассимиляции данных спутникового микроволнового радиометра с наземными данными синоптических метеостанций (Takala et al., 2011; Турков и др., 2017). Большим преимуществом этой базы данных является тот факт, что она содержит информацию за достаточно длительный период (с 1979 г.) и продолжает регулярно пополняться. Данные предоставляются в различном временном разрешении (сутки/неделя, месяц) в ячейках регулярной сетки EASE-Grids.

Пятый архив — Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover (далее — Blended) — включает в себя восьмидневные глобальные данные по заснеженности (площади, покрытой снегом) и запасу воды в снеге за период с 2000 по 2008 г. Пространственное разрешение — сетка EASE-Grids с ячейками 25 × 25 км (то же, что и у всех вышеперечисленных архивов). Расчет запаса воды в снеге осуществляется на основе информации SSM/I по алгоритмам, близким к алгоритмам создания данных SWEC и AMSR-E, для территории, покрытой снежным покровом, со-

гласно микроволновым данным по заснеженности MODIS/Terra Snow Cover 8-Day Level 3 Global 0.05 degree Climate Modeling Grid (CMG) data. В рамках исследования оригинальные данные в восьмидневном временном масштабе осреднялись до месячных значений.

Шестая база данных — Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data (далее — CMC), разработанная в Метеорологическом центре Канады. Среднемесячный запас воды в снеге в ячейках сетки разрешением 24×24 км рассчитывается на основе данных о высоте снежного покрова, которые получены по результатам наземных наблюдений (данные ВМО) путем моделирования с помощью специально разработанной модели аккумуляции и таяния снежного покрова. Архив CMC содержит данные за период с 1998 по 2018 г. и продолжает регулярно пополняться. Как указано авторами архива в описании (Brown and Brasnett, 2010), данные не являются однородными, так как создаются на основе оперативной информации, часто подверженной различным изменениям. Однако предварительный анализ выявил, что величины запаса воды в снеге CMC близки к значениям наземных наблюдений (снегомерных съёмок) в исследуемом бассейне, поэтому данные CMC были включены авторами в дальнейшие исследования.

Завершить описание глобальных данных можно обобщением: SWEC, AMSR-E, AMSR-U2 и Blended — данные дистанционного зондирования; ESA и CMC — данные ассимиляции и моделирования на основе наземных наблюдений; ESA, CMC и AMSR-U2 — актуальные данные, периодически пополняющиеся новой информацией.

Как видно из описания, рассматриваемые архивы данных содержат информацию за различные промежутки времени. Период совместных наблюдений составил всего шесть лет (с 2002 по 2007 г.), т. е. пять полноценных зимних периодов. Основной анализ проводился на этом общем для всех баз временном отрезке. Однако на последующем этапе наиболее достоверные данные по итогам сравнения за период 2002–2007 гг. отдельно были сопоставлены с данными наземных наблюдений за весь доступный период, о чем более подробно пойдет речь ниже.

На рис. 2 в качестве примера представлено пространственное распределение запасов воды в снеге на европейской территории России по каждой из вышеописанных баз данных за февраль 2003 г. (за исключением данных AMSR-U2, которые доступны только с 2012 г.). Представленная визуализация достаточно наглядно демонстрирует особенности анализируемых данных.

Для анализа и обработки информации по запасу воды в снежном покрове выперечисленных архивов данных было специально разработано программное обеспечение, представляющее из себя набор программ-утилит на языке C++, позволяющих осуществлять: анализ качества исходной информации; расчет осредненных по площади значений запаса воды в снеге в зависимости от заданного временного периода или сезона различной периодичности; расчет максимальных значений запаса воды перед началом таяния снежного покрова; конвертацию исходных и рассчитанных данных в различные форматы (текстовые, бинарные, растровые, HDF и т. п.), а также в различные проекции земной поверхности. Основной особенностью разработанного программного комплекса является его взаимодействие с геоинформационной системой ArcGIS, т. е. реализована возможность ис-

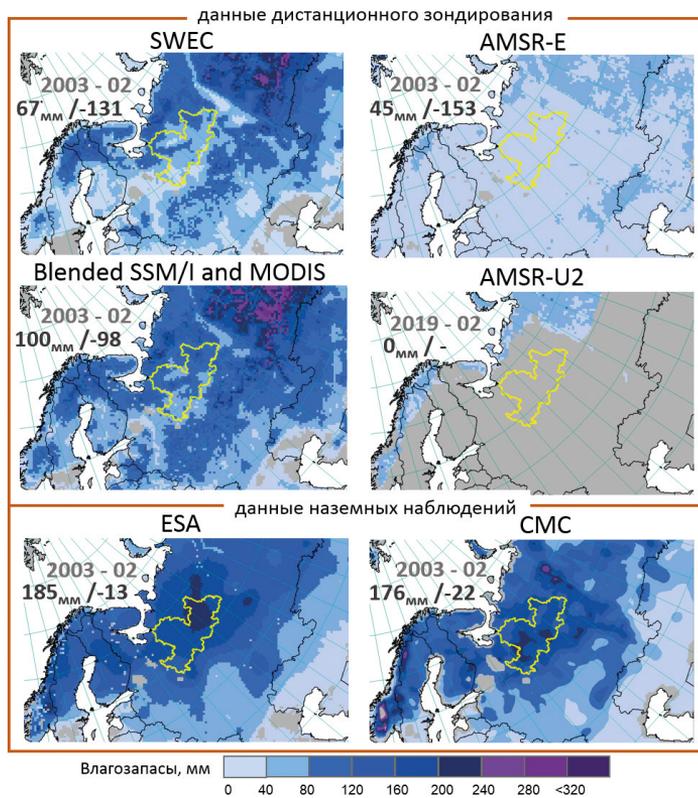


Рис. 2. Пространственное распределение месячных значений влагозапасов в снежном покрове шести глобальных баз данных, участвующих в анализе, на европейской территории России (бассейн р. Северная Двина выделен желтой линией) за февраль 2003 г. (февраль 2019 г. для данных AMSR-U2). Источники данных: (Armstrong et al., 2005; Tedesco et al., 2004a; 2004b; 2004c; Tedesco and Jeyaratnam, 2019a; 2019b; 2019c; Takala et al., 2011; Brodzik et al., 2007; Brown and Brasnett, 2010)

пользования исходной информации и полученных результатов в форматах ArcGIS, а также их визуализации в данной геоинформационной системе.

2.3. Данные наземных наблюдений (снегомерные съемки)

В качестве эталона для оценки точности глобальных данных по запасу воды в снеге использовались данные маршрутных снегомерных наблюдений, которые находятся в открытом доступе на веб-ресурсе Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (<http://meteo.ru>). Подробное описание архива представлено в работе (Булыгина и др., 2013). Использовались данные семи метеостанций, расположенных в бассейне р. Северная Двина (см. рис. 1): Суры (22 676), Шенкурска (22 768), Котласа (22 887), Великого Устюга (22 981), Тотьмы (27 051), Никольска (27 066), Опарина (27 083).

Так как по регламенту маршрутные снегомерные съемки осуществляются через каждые 10 дней в течение холодного периода и каждые пять дней в период интенсивного снеготаяния, то декадные и пентадные значения запаса воды в снежном покрове были использованы для расчета среднемесячных значений.

3. Методика ранжирования данных глобальных архивов на основе сравнения с данными наблюдений

Для достижения основной цели исследования была специально разработана методика ранжирования данных по запасу воды в снежном покрове, позволяющая выявить данные, которые в наибольшей степени соответствуют наземным наблюдениям.

В основе методики лежат параметры, вычисляемые для каждой базы данных относительно принятого эталона и позволяющие оценить достоверность информации в них, а также выявить слабые стороны. Поскольку короткий ряд совместных наблюдений не позволяет получить информативные статистические характеристики, набор параметров в данной работе был сокращен до двух: разности средних за период величин запаса воды в снеге (в процентах) и отношения коэффициента угла наклона линии тренда.

При ранжировании каждая из шести рассматриваемых баз данных получает ранг от 1 до 5 (от лучшего к худшему) по каждому параметру. Итоговый набор полученных рангов характеризует качество информации в каждой конкретной базе данных относительно остальных, а вычисленные значения параметров показывают, насколько эти данные соответствуют наземным наблюдениям.

Ранжирование проводилось отдельно для периода накопления снежного покрова (ноябрь — январь), для периода деградации снежного покрова (февраль — апрель), для максимального годового запаса воды в снеге (по среднемесячным значениям).

Сравнение осуществлялось в рамках периода совместных наблюдений, т.е. тех месяцев, когда информация о запасе воды в снеге доступна по всем базам данных — с 2002 по 2007 г. (5 зимних периодов). Несмотря на ограниченные возможности для статистически обоснованного анализа из-за короткого ряда совместных наблюдений, используемая схема оценки позволяет достаточно достоверно (как будет показано ниже) сравнить базы данных. Необходимо отметить, что до сих пор не существует универсальной методики сравнения данных пространственного разрешения 25×25 км (625 км²) с точечными данными наземных наблюдений (в том числе с пентадными и декадными данными снегомерных съемок).

Вторым этапом работы стало сравнение максимальных среднемесячных запасов воды в снеге по данным наиболее достоверных архивов (согласно выполненному на первом этапе ранжированию) с соответствующей информацией, полученной в результате наземных снегомерных съемок, за весь период совместных наблюдений, имеющийся на момент написания статьи.

Анализ данных глобальных архивов осуществлялся на трех масштабах пространственного осреднения исходной информации: для одной ячейки (625 км²), для бассейна р. Малая Северная Двина (86 тыс. км²), для всего бассейна р. Северная Двина (357 тыс. км²).

Такой подход дает возможность выявить, как изменяется соответствие данных глобальных архивов наземным наблюдениям с увеличением площади исследуемой территории.

Дополнительно анализировалась взаимосвязь многолетних колебаний максимальных сезонных влагозапасов в снежном покрове с изменениями климата, прежде всего с температурой воздуха в течение зимы.

4. Комплексная оценка точности в исследуемом бассейне

Как уже было сказано выше, в ходе анализа выяснилось, что (на момент подготовки статьи) значения запаса воды в снеге по данным AMSR-U2 близки к нулевым значениям, что, вероятно, является результатом системной ошибки в алгоритмах обработки исходной информации. По этой причине база данных была исключена из дальнейших исследований, а анализ точности и взаимосравнения осуществлялся для оставшихся пяти архивов данных (SWEC, AMSR-E2, ESA, Blended и СМС).

В табл. 2 и на рис. 3 представлены результаты ранжирования данных по запасу воды в снеге для пяти баз данных за период совместных наблюдений 2002–2007 гг., полученные отдельно для трех исследуемых районов р. Северная Двина, различных по площади анализируемой территории: одной ячейки, где расположена метеорологическая станция г. Никольска (625 км²), бассейна р. Малая Северная Двина (86 тыс. км²) и всего бассейна р. Северная Двина (357 тыс. км²). Ранжирование осуществлялось путем сравнения рассчитанных для исследуемого района значений запаса воды в снеге из архивов данных с месячными значениями, полученными по результатам снегомерных съемок. В случае бассейна р. Малая Северная Двина использовались данные четырех метеостанций, предоставляющих информацию по снегомерным съемкам, в случае всего бассейна р. Северная Двина — семи метеостанций.

Анализируя полученные результаты (см. табл. 2, рис. 3), можно отметить, что площадь рассматриваемой территории не влияет на распределение рангов: наиболее приближенные к наземным наблюдениям данные в случае одной ячейки (ESA и СМС), остались таковыми и для бассейна р. Северная Двина. Кроме того, стоит обратить внимание на то, что в некоторых архивах качество данных для всех трех районов лучше для периода накопления снежного покрова (AMSR-E2 и Blended), а в некоторых — для периода максимальных снегозапасов (SWEC, ESA и СМС) (см. табл. 2).

Данные СМС, несмотря на предупреждение создателей архива о том, что они не являются однородными, продемонстрировали наиболее достоверные результаты как для различных периодов, так и для территорий разного пространственного масштаба (см. табл. 2, рис. 3). Значения влагозапасов ESA очень близки к значениям СМС и, соответственно, наземных наблюдений. Особенно это касается воспроизведения запасов воды в снеге для тех месяцев, когда их величина максимальна. В случае бассейна р. Северная Двина данные СМС и ESA показывают практически в равной степени удовлетворительные результаты. Однако стоит отметить, что в начальный период снегонакопления (ноябрь и декабрь) значения ESA несколько хуже соответствуют данным снегомерных съемок.

Средние значения запаса воды в снеге, рассчитанные на основе данных SWEC и AMSR-E за период совместных наблюдений 2002–2007 гг., занижены на 50–80%

Таблица 2. Ранжирование баз данных по рассчитанным значениям параметров за общий период наблюдений (2002–2007 гг.)

Территория	База	ноябрь — январь		февраль — апрель		максимальные годовые		Общий ранг
		Δ , %	K_t , б/р	Δ , %	K_t , б/р	Δ , %	K_t , б/р	
Никольск (1 ячейка), 625 км ²	CMC	14 (1)	0.87 (1)	15 (1)	0.73 (2)	5 (1)	1.13 (1)	1
	ESA	24 (2)	1.61 (2)	25 (2)	0.92 (1)	13 (2)	1.36 (2)	2
	Blended	49 (3)	0.39 (2)	53 (3)	0.26 (3)	50 (3)	0.40 (3)	3
	SWEC	83 (5)	0.27 (5)	73 (4)	0.14 (4)	69.7 (4)	0.14 (4)	4
	AMSR-E	75 (4)	0.28 (4)	76 (5)	0.04 (5)	69.8 (5)	-0.37 (5)	5
р. Малая Северная Двина, 86 тыс. км ²	CMC	15 (1)	0.94 (1)	22 (1)	0.70 (1)	16 (1)	0.89 (1)	1
	ESA	16 (2)	1.23 (2)	28 (2)	0.60 (2)	19 (2)	0.74 (2)	2
	Blended	45 (3)	0.39 (3)	50 (3)	0.16 (3)	50 (3)	0.16 (3)	3
	SWEC	80 (5)	0.23 (5)	72 (4)	0.06 (4)	68 (4)	-0.07 (4)	4
	AMSR-E	73 (4)	0.30 (4)	76 (5)	0.04 (5)	70 (5)	-0.18 (5)	5
р. Северная Двина, 357 тыс. км ²	CMC	4 (1)	0.77 (2)	4 (2)	0.690 (1)	2 (2)	0.79 (1)	1
	ESA	-8 (2)	1.07 (1)	2 (1)	0.688 (2)	1 (1)	0.72 (2)	1
	Blended	23 (3)	0.47 (3)	27 (3)	0.12 (3)	34 (3)	0.03 (3)	3
	SWEC	64 (4)	0.36 (4)	56 (4)	0.03 (4)	53 (4)	-0.06 (4)	4
	AMSR-E	66 (5)	0.30 (5)	68 (5)	0.01 (5)	63 (5)	-0.13 (5)	5

Примечание: Δ — занижение средней величины влагозапасов в снеге относительно наземных наблюдений, %; K_t — отношение коэффициента угла наклона линии тренда по данным архива к тому же коэффициенту по данным наземных наблюдений (в случае $K_t = 1$ тренды полностью совпадают, в случае $K_t < 0$ тренды противоположны).

по отношению к данным наземных наблюдений, на основе базы Blended — более чем на 25 % (см. табл. 2). Кроме того, влагозапасы SWEC и AMSR-E неверно отражают направление тренда максимальных влагозапасов (наблюдается тенденция к увеличению максимальных снегозапасов, тогда как наземные наблюдения демонстрируют уменьшение). При этом с увеличением рассматриваемой площади достоверность данных SWEC, AMSR-E и Blended повышается незначительно — они продолжают демонстрировать серьезные расхождения с данными наземных наблюдений (см. табл. 2).

Что касается данных CMC и ESA, то количественную оценку максимальных запасов воды в снеге, предоставленную этими архивами данных, можно считать достоверной: за рассматриваемый период средняя величина в большинстве случаев не отклоняется от среднего по наземным наблюдениям более чем на 15 %, а для всего бассейна р. Северная Двина величина отклонения составляет всего лишь около 2–4 % (см. табл. 2). С увеличением площади исследования архивные данные

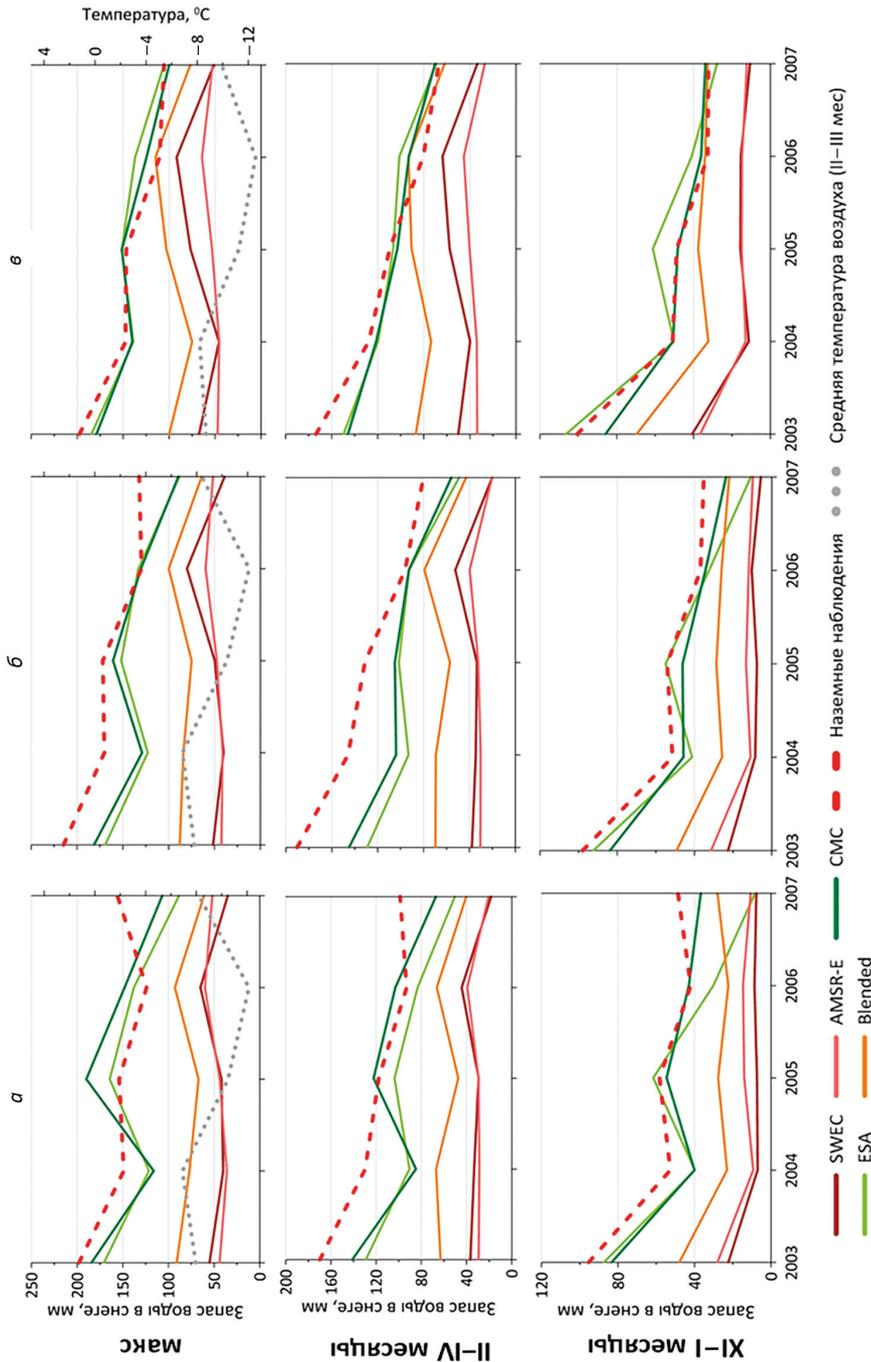


Рис. 3. Изменения влагозапасов за пять зимних периодов (с 2002–2003 до 2006–2007) по данным глобальных архивов и наземных наблюдений (снегомерных съемок) за периоды накопления (XI–I месяцы) и абляции снежного покрова (II–IV месяцы), а также максимальных влагозапасов перед началом таяния снежного покрова (макс) в трех масштабах пространственного осреднения: а — 1 ячейка (ст. Норильск), б — бассейн р. Малая Северная Двина, в — бассейн р. Северная Двина. Источники данных: (Armstrong et al., 2005; Tedesco et al., 2004a; 2004b; 2004c; Tedesco and Jeayaratnam, 2019a; 2019b; Takala et al., 2011; Brodzik et al., 2007; Brown and Brasnett, 2010)

приближаются к наблюдаемым. Соответственно, ESA и СМС предоставляют приблизительную оценку некоторой пространственно осредненной величины влагозапасов в снеге. Это подтверждает тот факт, что сфера применения данных дистанционного зондирования снежного покрова ограничена в первую очередь масштабом рассматриваемой территории.

Подводя итог, можно сказать, что выполненный анализ выявил: две базы данных, предоставляющие информацию, значительно отличающуюся от наземных наблюдений (SWEC и AMSR-E), базу данных, дающую более объективную, но все же неудовлетворительную оценку запаса воды в снеге (Blended), и две базы, предоставляющие сведения (СМС и ESA), в целом соответствующие наземной информации с некоторой долей систематической погрешности (до 15%). Видно, что данные собственно дистанционного зондирования (SWEC и AMSR-E) явно проигрывают в качестве данным, алгоритмы создания которых основаны на использовании наземных наблюдений (ESA и СМС).

Следующим этапом комплексной оценки точности был анализ соответствия данных лучших (по результатам ранжирования) архивов информации СМС и ESA данным наземных наблюдений за все время совместных наблюдений: 1979–2016 гг. (37 зимних периодов) для ESA и 1998–2017 гг. (19 зимних периодов) для СМС. Дополнительно, в целях оценки разницы между данными дистанционного зондирования и данными, скорректированными с помощью наземных наблюдений, в анализ вошли данные SWEC (которые имеют наиболее длинный ряд наблюдений из всех микроволновых данных — с 1978 по 2007 г.). Полученные результаты представлены на рис. 4 и в табл. 3.

Были рассчитаны коэффициенты корреляции максимальных запасов воды в снеге по данным глобальных архивов и по наземным наблюдениям за указанные периоды для каждой из трех баз данных. Эти коэффициенты составили: 0.51 (ESA) и 0.55 (СМС) для бассейна р. Малая Северная Двина и 0.72 и 0.73 для всего бассейна р. Северная Двина соответственно. Для значений СМС характерно занижение в многоснежные периоды и завышение в малоснежные (см. рис. 4). Данные ESA более однородны, однако для бассейна р. Малая Северная Двина демонстрировали заниженные значения. Что касается многолетних трендов, то данные обеих баз данных отражают их с большой долей достоверности, однако, в этом отношении ESA имеет преимущество.

Авторы полагают, что данные ESA и СМС имеют потенциал в качестве источника информации о запасе воды в снежном покрове по крайней мере для крупных речных бассейнов, расположенных в области высоких широт Российской Федерации. Однако на настоящем этапе предпочтительнее использовать их в качестве дополнительного источника, опираясь на данные наземных наблюдений. С другой стороны, данные ESA и СМС могут использоваться для малоизученных бассейнов, либо в районах с отсутствием данных наземных наблюдений. С точки зрения анализа многолетних изменений влагозапасов и их взаимосвязи с изменениями климата и водного режима рек, наиболее перспективной является база ESA, поскольку она включает в себя данные с 1979 г.

В дополнение к основному анализу (оценке точности) была рассмотрена взаимосвязь изменений влагозапасов с колебаниями температуры воздуха за зимне-весенний период (осредненная для каждого года за I–IV месяцы). Для этого

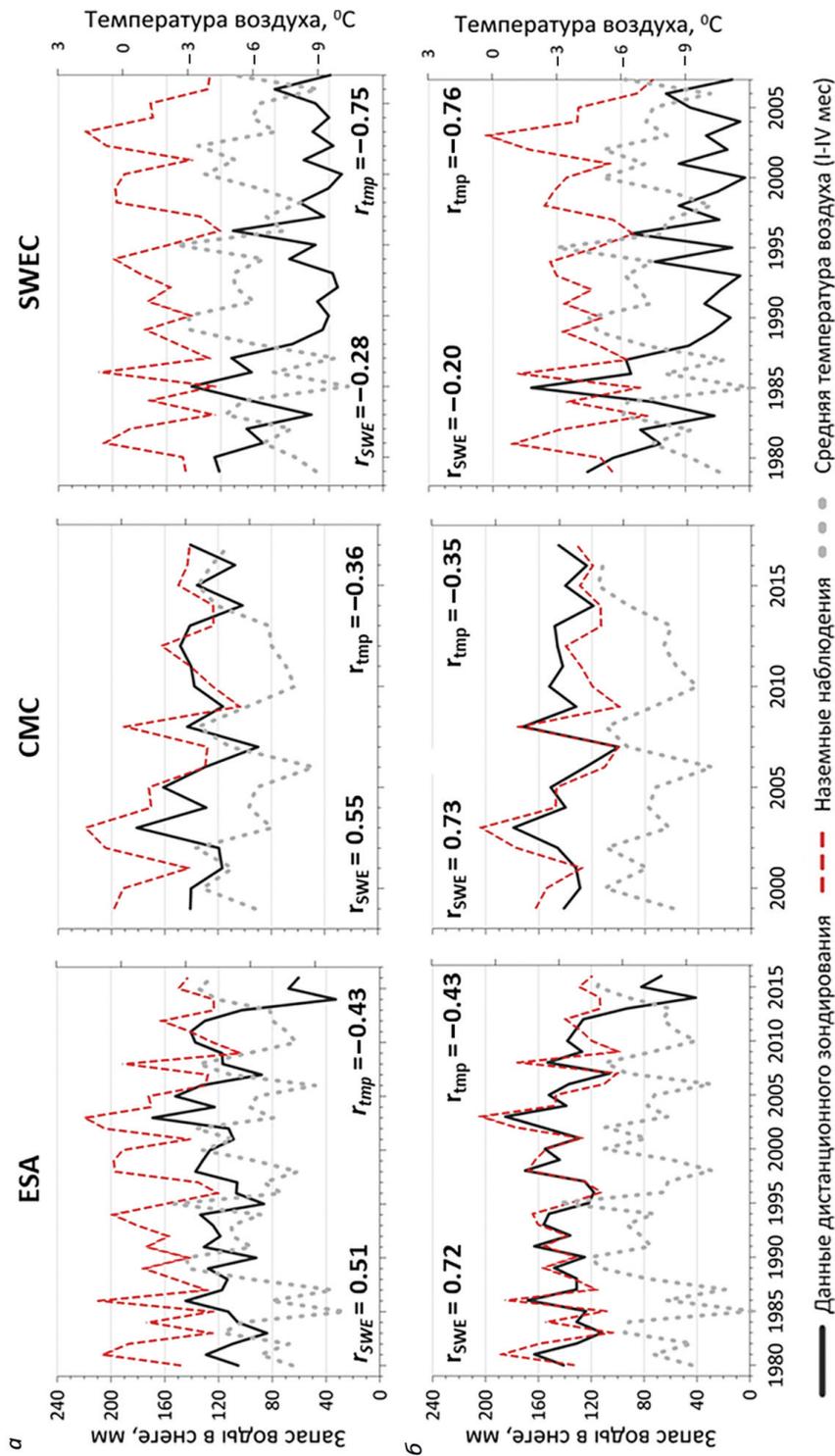


Рис. 4. Совмещенные графики взаимосвязи между максимальными влагозапасами, рассчитанными по архивам ESA, CMC и SWEC за весь период наблюдений, максимальными влагозапасами, полученными на основе данных наземных наблюдений, и температурой воздуха, осредненной для каждого года за I–IV месяцы (r_{SWE} и r_{tmp} — коэффициенты корреляции между наземными и архивными влагозапасами и между архивными влагозапасами и приземной температурой воздуха соответственно): а — бассейн р. Малая Северная Двина, б — бассейн р. Северная Двина. Источники данных: (Armstrong et al., 2005; Tedesco et al., 2004a; 2004b; 2004c; Tedesco and Jeayaratnam, 2019a; 2019b; 2019c; Takala et al., 2011; Brodzik et al., 2007; Brown and Brasnett, 2010)

Таблица 3. Рассчитанные значения параметров, характеризующие данные трех архивов за периоды совместных наблюдений

База	Период, гг.	Параметр	р. Малая Северная Двина, 86 тыс. км ²	р. Северная Двина, 357 тыс. км ²
СМС	1998–2017	r_{swe}	0.55	0.73
		Δ , %	15	–2
		r_{tmp}	–0.36	–0.31
ESA	1979–2016	r_{swe}	0.51	0.72
		Δ , %	28	5
		r_{tmp}	–0.43	–0.40
SWEC	1978–2007	r_{swe}	–0.28	–0.2
		Δ , %	59	43
		r_{tmp}	–0.75	–0.76

Примечание: r_{swe} — коэффициент корреляции с данными наземных наблюдений; Δ — занижение средней за период величины максимальных снегозапасов относительно наземных наблюдений, %; r_{tmp} — коэффициент корреляции с температурой воздуха, осредненной для каждого года за I–IV месяцы.

использовались данные по среднемесячной температуре воздуха из климатического сеточного архива Climate Research Unit TS v. 4.02 (Harris et al., 2014). Еще на первом этапе выполненных исследований была выявлена интересная особенность данных дистанционного зондирования (см. рис. 2). Данные SWEC, AMSR-E2 и Blended продемонстрировали определенную (обратную) зависимость от температуры воздуха. Это наблюдение подтверждается результатами исследования, выполненного авторами для бассейнов р. Нева и верхней Волги, где была продемонстрирована сильная взаимосвязь между данными SWEC и зимне-весенней температурой воздуха (коэффициент корреляции более –0.70). По всей видимости, объяснение данного феномена можно найти в самом алгоритме расчета значений запаса воды в снежном покрове (для SWEC, AMSR-E2, AMSR-U2 и Blended используется один и тот же базовый алгоритм). Одним из основных недостатков оригинального алгоритма, который применялся для создания данных SWEC (Armstrong et al., 2005), является то, что при большом количестве влаги в снежном покрове, характерном для тающего снега во время оттепелей, алгоритм выдает заниженные значения запаса воды в снеге либо его отсутствие, так как из-за увеличения внутреннего поглощения резко изменяются характеристики микроволнового излучения. Серьезное влияние на микроволновое излучение оказывают жидкие осадки, а также сферическая форма зерен снега. В модифицированном алгоритме, используемом для создания данных AMSR-E2 (Chang and

Rango, 2000), дополнительно были введены ограничения, когда при обнаружении состояния влажного снега, жидких осадков и положительной приземной температуры воздуха расчет запаса воды в снеге не осуществляется.

Для подтверждения отмеченной закономерности были рассчитаны коэффициенты корреляции максимальных влагозапасов с зимне-весенней температурой воздуха (I–IV месяцы) для трех баз данных, имеющих наибольшие ряды наблюдений: SWEC, ESA и СМС (см. рис. 3). В результате было выявлено, что данные ESA и СМС не отражают сильной обратной зависимости от температуры воздуха (коэффициент корреляции: -0.43 и -0.35 соответственно), в то время как данные SWEC показали статистически значимую зависимость (коэффициент корреляции -0.75). При этом анализ данных наземных наблюдений продемонстрировал, что связь между максимальными запасами воды в снеге и зимне-весенней температурой воздуха отсутствует (коэффициент корреляции 0.15). Это подтверждает предположение о том, что температура воздуха является фактором, влияющим на результат определения значений запаса воды в снеге на основе микроволнового дистанционного зондирования.

5. Основные выводы и заключение

Обобщая полученные в ходе выполненных исследований результаты, можно сделать следующие выводы, относящиеся к северу европейской территории России:

- в настоящий момент база данных AMSR-U2 содержит некорректную информацию по влагозапасам для высоких широт европейской территории России, поэтому не использовалась в представленных исследованиях;
- осуществленные на основе специально разработанной методики оценка точности и ранжирование глобальных данных по запасам воды в снеге выявили, что независимо от размеров рассматриваемой территории наиболее приближенными к наземным наблюдениям являются данные архивов СМС и ESA, наименее — данные архивов AMSR-E и SWEC;
- данные о запасах воды в снеге архивов SWEC, AMSR_E и Blended имеют значительные отклонения от данных наземных наблюдений (величина занижения в большинстве случаев превышает 60 % для SWEC и AMSR_E и 30 % для Blended), а также неправильно или с серьезными искажениями отображают основные тенденции, зачастую с полным визуальным отсутствием какой-либо корреляции с наземными данными;
- данные архивов ESA и СМС в среднем отклоняются от наземных по величине не более чем на 20 %;
- с увеличением площади рассматриваемой территории данные ESA и СМС в большей степени соответствуют наземным наблюдениям: лучшие результаты были получены для всего бассейна р. Северная Двина (356 тыс. км²);
- по мнению авторов данные ESA и СМС имеют хорошие перспективы для использования в научных и прикладных исследованиях крупных речных бассейнов (площадью более 100 тыс. км²);

- использование данных ESA и СМС для территорий меньшего масштаба может быть осуществимо при условии разработки методики внесения в них соответствующих поправок;
- данные по запасам воды в снеге архивов SWEC, AMSR_E и Blended не соответствуют данным наземных наблюдений, по крайней мере для северной части европейской территории России, чтобы служить надежным источником информации;
- данные SWEC, AMSR_E и Blended находятся в тесной обратной зависимости от зимне-весенней температуры воздуха; на этом основании можно предположить, что результаты микроволнового зондирования снежного покрова зависят от приземной температуры воздуха, что создает систематическую ошибку с одной стороны, а с другой — позволяет им воспроизводить изменения температурного режима в исследуемом бассейне; в свою очередь данные ESA и СМС избавлены от этой проблемы благодаря иным методам определения запаса воды в снежном покрове;
- необходимо продолжение исследований в этой области; прежде всего, необходим более детальный анализ, основанный на сравнении с данными наземных наблюдений для территории Российской Федерации: анализ для большего количества речных бассейнов разного пространственного масштаба и различных климатических условий.

Одной из основных задач исследований, представленных в данной статье, являлась разработка и апробация методики оценки точности и сравнения влагозапасов, где в качестве объекта исследований был взят бассейн р. Северная Двина. Логичным продолжением и следующим этапом работы является анализ точности, выполненный для основных речных бассейнов Российской Федерации, т. е. для всей территории России.

Литература

- Булыгина, О. Н., Разуваев, В. Н., Александрова, Т. М. (2013). *Описание массива данных «Маршрутные снегомерные съемки»*. [online] Доступно на: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys> [Дата доступа 15.10.2019].
- Георгиевский, М. В., Горошкова, Н. И., Полякова, В. С., Голованов, О. Ф., Георгиевский, Д. В. (2018). Экстремальное заторное наводнение весной 2016 г. на р. Сухона у г. Великий Устюг (формирование, прогноз, последствия). *Метеорология и гидрология*, (2), 108–114.
- Георгиевский, М. В., Горошкова, Н. И., Полякова, В. С., Голованов, О. Ф., Георгиевский, Д. В., Скрипник, Е. Н. (2017). Условия формирования и полевые исследования ледового затора, послужившего причиной наводнения на р. Сухона у г. Великий Устюг весной 2016 г. *Геориск*, (4), 40–48.
- Ильина, Л. Л., Грахов, А. К. (1987). *Реки Севера*. Л.: Гидрометеозидат.
- О деятельности Росгидромета в 2018 году и задачах на 2019 год*. (2019). [online] Доступно на: <http://www.meteorf.ru/press/releases/18665/> [Дата доступа 15.10.2019].
- Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2018 году*. (2019). Санкт-Петербург: Росгидромет. [online] Доступно на: http://hydrology.ru/sites/default/files/Books/obzor_seti_2018_240519.pdf [Дата доступа 15.10.2019].
- Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата)*. (2010). [online] Доступно на: http://www.pfo.meteorf.ru/assets/files/96/stateg_2030.PDF [Дата доступа 15.10.2019].

- Турков, Д. В., Сократов, В. С., Титкова, Т. Б. (2017). Определение снеготолщин Западной Сибири по расчётам на модели локального теплообмена SPONSOR с использованием данных реанализа. *Лёд и Снег*, 57 (3), 343–354. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-343-354>
- Armstrong, R., Brodzik, M. J., Knowles, K. and Savoie, M. (2005). *Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/KJVERY3MIBPS> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Brodzik, M. J., Armstrong, R. and Savoie, M. (2007). *Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/KIGGFNVROX9V> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Brown, R. D. and Brasnett, B. (2010). *Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Chang, A. T. C., Foster, J. L. and Dorothy, H. K. (1987). Nimbus-7 Derived Global Snow Cover Parameters. *Annals of Glaciology*, 9, 39–44.
- Chang, A. T. C., Foster, J. L., Dorothy, H. K., Goodison, B. E., Walker, A. E. and Metcalfe, J. R. (1997). Snow Parameters Derived from Microwave Measurements During the BOREAS Winter Field Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 102, 29663–29671.
- Chang, A. T. C. and Rango, A. (2000). *Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm. November 30, 2000. Version 3.1*. [online] National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/technical-references/amsr_atbd_snow.pdf [Accessed 15 Oct. 2019].
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. and Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Kelly, R. E. J., Foster, J. L. and Dorothy, K. H. (2005). The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Status and Future Development. Poster presented at the *American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, 5–9 December 2005*.
- Kelly, R. E. J., Foster, J. L. and Dorothy, K. H. (2005). The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Algorithm Development and Progress in Product Validation. Poster presented at the *Proceedings of the 28th General Assembly of the Union of International Radio Science, New Delhi, India, 23–29 October 2005*.
- Takala, M., Luojus, K., Pulliainen, J., Derksen, C., Lemmetyinen, J., Kärnä, J., Koskinen, J. and Bojkov, B. (2011). Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3517–3529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>
- Tedesco, M. and Jeyaratnam, J. (2019a). *AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global Daily 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/8AE2ILXB5SM6> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M. and Jeyaratnam, J. (2019b). *AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 5-Day 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/0PX911G6417E> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M. and Jeyaratnam, J. (2019c). *AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global Monthly 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/43NH9LHM9YRK> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M., Kelly, R., Foster, J. L. and Chang, A. T. (2004a). *AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_DYSNO.002 [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M., Kelly, R., Foster, J. L. and Chang, A. T. (2004b). *AMSR-E/Aqua 5-Day L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and

Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_5DSNO.002 [Accessed 15 Oct. 2019].

Tedesco, M., Kelly, R., Foster, J. L. and Chang, A. T. (2004c). *AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_MOSNO.002 [Accessed 15 Oct. 2019].

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2019 г.
Статья рекомендована к печати 15 июня 2020 г.

Контактная информация:

Георгиевский Михаил Владимирович — mgeorgievsky@hotmail.com

Хомякова Виктория Андреевна — curcuma162@gmail.com

Паршина Татьяна Владимировна — tat_shurik@mail.ru

Accuracy evaluation of snow water equivalent global data: The case of the Northern Dvina River basin

M. V. Georgievsky, V. A. Khomyakova, T. V. Parshina

St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Georgievsky M. V., Khomyakova V. A., Parshina T. V. (2020). Accuracy evaluation of snow water equivalent global data: The case of the Northern Dvina River basin. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (3), 434–454. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.302> (In Russian)

The article presents a comprehensive multilevel accuracy evaluation of global snow water equivalent (SWE) datasets performed for the territory of the Northern Dvina River basin, where snow plays an important role in the formation of spring runoff and the increase in winter runoff during recent decades due to ongoing climate change. Six global snow water equivalent datasets, available on the National Snow and Ice Data Center website (all currently available global SWE data), were used in this study. Snow survey data of the Roshydromet observation network were used as ground-based observations. The accuracy of dataset values of SWE was evaluated by comparison with ground observations in several successive stages. In the first stage, the global SWE values were compared with the observational data for several selected weather stations, i. e., the dataset values of SWE belonging to a particular grid cell were compared with the snow survey values of a weather station located in this cell. In the second stage, the SWE values averaged over one of the main subbasins of the Northern Dvina, the Small Northern Dvina River basin, were analyzed. The final stage was the SWE comparison for the entire Northern Dvina River basin. The methodology for ranking data depending on their accuracy based on comparison with ground-based observations of several basic parameters of quantitative changes in SWE during periods of formation and before the start of melting (maximum SWE) was specially developed to implement the accuracy evaluation and SWE comparison. A comprehensive comparative analysis performed based on the developed methodology revealed that the accuracy of global SWE data increases with the investigation area (i.e., the volume of information used) for which the comparison is being carried out. The closest to the observed SWE values for all datasets were obtained for the whole Northern Dvina River basin. The ranking methodology and the implemented analysis helped to determine the most promising global SWE data for future use.

Keywords: Northern Dvina, snow water equivalent global data, snow surveys, maximum snow water equivalent, multilevel comparative accuracy evaluation.

References

- About the Roshydromet actions in 2018 and goals to 2019*. (2019). [online] Available at: <http://www.meteor.ru/press/releases/18665/> [Accessed 15 Oct. 2019]. (In Russian)
- Armstrong, R., Brodzik, M. J., Knowles, K. and Savoie, M. (2005). *Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/KJVERY3MIBPS> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Brodzik, M. J., Armstrong, R. and Savoie, M. (2007). *Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/KIGGFNVROX9V> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Brown, R. D. and Brasnett, B. (2010). *Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Bulygina, O. N., Razuvaev, V. N. and Aleksandrova, T. M. (2013). *Opisanie massiva dannykh "Marshrutnye snegomernye s'emki"*. Available at: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys> [Accessed 15 Oct. 2019]. (In Russian)
- Chang, A. T. C. and Rango, A. (2000). *Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm. November 30, 2000. Version 3.1*. [online] National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/technical-references/amsr_atbd_snow.pdf [Accessed 15 Oct. 2019].
- Chang, A. T. C., Foster, J. L. and Dorothy, H. K. (1987). Nimbus-7 Derived Global Snow Cover Parameters. *Annals of Glaciology*, 9, 39–44.
- Chang, A. T. C., Foster, J. L., Dorothy, H. K., Goodison, B. E., Walker, A. E. and Metcalfe, J. R. (1997). Snow Parameters Derived from Microwave Measurements During the BOREAS Winter Field Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 102, 29663–29671.
- Georgievsky, M. V., Goroshkova, N. I., Polyakova, V. S., Golovanov, O. F. and Georgievsky, D. V. (2018). Extremal ice-blocking flood in spring 2016 on the river Sukhona nearby Velikiy Ustyug (forming, forecast, aftermath). *Meteorologiya i Gidrologiya*, (2), 108–114. (In Russian)
- Georgievsky, M. V., Goroshkova, N. I., Polyakova, V. S., Golovanov, O. F., Georgievsky, D. V. and Skripnik, E. N. (2017). Field research of the ice block caused extremal flood on the river Sukhona nearby Velikiy Ustyug in spring 2016. *Georisk*, (4), 40–48. (In Russian)
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. and Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Il'ina, L. L. and Grakhov, A. K. (1987). *Rivers of the North*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (In Russian)
- Kelly, R. E. J., Foster, J. L. and Dorothy, K. H. (2005). The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Status and Future Development. Poster presented at the *American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA., 5–9 December 2005*.
- Kelly, R. E. J., Foster, J. L. and Dorothy, K. H. (2005). The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Algorithm Development and Progress in Product Validation. Poster presented at the *Proceedings of the 28th General Assembly of the Union of International Radio Science, New Delhi, India, 23–29 October 2005*.
- Review of the condition of the system of hydrological observations, data processing and informative production handling in 2018*. (2019). St. Petersburg: Rosgidromet. [online] Available at: http://hydrology.ru/sites/default/files/Books/obzor_seti_2018_240519.pdf [Accessed 15 Oct. 2019]. (In Russian)
- Strategy for actions in the hydrometeorology and related fields up to 2030 (taking into account climate change aspects)*. (2010). [online] Available at: http://www.pfo.meteor.ru/assets/files/96/stateg_2030.PDF [Accessed 15 Oct. 2019]. (In Russian)
- Takala, M., Luojus, K., Pulliainen, J., Derksen, C., Lemmetyinen, J., Kärnä, J., Koskinen, J. and Bojkov, B. (2011). Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3517–3529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>

- Tedesco, M. and Jeyaratnam, J. (2019a). *AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global Daily 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/8AE2ILXB5SM6> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M. and Jeyaratnam, J. (2019b). *AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 5-Day 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/0PX911G6417E> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M. and Jeyaratnam, J. (2019c). *AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global Monthly 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: <https://doi.org/10.5067/43NH9LHM9YRK> [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M., Kelly, R., Foster, J.L. and Chang, A. T. (2004a). *AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_DYSNO.002 [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M., Kelly, R., Foster, J.L. and Chang, A. T. (2004b). *AMSR-E/Aqua 5-Day L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_5DSNO.002 [Accessed 15 Oct. 2019].
- Tedesco, M., Kelly, R., Foster, J.L. and Chang, A. T. (2004c). *AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2*. [online] Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Available at: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_MOSNO.002 [Accessed 15 Oct. 2019].
- Turkov, D. V., Sokratov, V. S. and Titkova, T. B. (2017). Determination of snow storage of Western Siberia by the model of local heat and moisture exchange SPONSOR calculations using reanalysis data. *Ice and Snow*, 57 (3), 343–354. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-343-354> (In Russian)

Received: November 1, 2019

Accepted: June 15, 2020

Contact information:

Mikhail V. Georgievsky — mgeorgievsky@hotmail.com

Victoria A. Khomyakova — curcuma162@gmail.com

Tatyana V. Parshina — tat_shurik@mail.ru