

## Микроволновые данные дистанционного зондирования влагозапасов в снежном покрове: сравнение с наземными наблюдениями и обратная зависимость с зимне-весенней температурой воздуха на примере Невско-Ладожского бассейна

М. В. Георгиевский<sup>1</sup>, С. В. Романов<sup>2</sup>, Т. В. Паршина<sup>1</sup>, В. Л. Трушевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: mgeorgievsky@hotmail.com

<sup>2</sup> ООО «Ленводпроект», Санкт-Петербург, 196105, Россия  
E-mail: elrin.spb@gmail.com

Работа посвящена оценке возможности применения глобальных баз данных микроволнового дистанционного зондирования влагозапаса в снежном покрове в практических гидрометеорологических исследованиях. В качестве объекта исследований был выбран бассейн р. Невы (включая водосбор Ладожского озера), где снежный покров играет важную роль в формировании речного стока. В качестве исходной информации анализировались два глобальных архива данных: климатический архив месячных значений влагозапасов в снежном покрове (Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology) и архив месячных значений влагозапасов в снежном покрове радиометрических данных спутника Aqua (AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids). Первым этапом исследований являлось взаимосравнение спутниковых данных по влагозапасам, а также оценка их точности сравнением с данными наземных наблюдений. Было выявлено, что данные архивов хорошо согласуются между собой, но сильно отличаются от наземных наблюдений, демонстрируя существенно заниженные значения влагозапасов в снежном покрове по сравнению с данными снегомерных съёмки. На втором этапе исследований анализировалась связь между колебаниями максимальных влагозапасов в Невско-Ладожском бассейне, полученных на основе архивных данных, и изменениями температурного режима в зимне-весенние периоды. Было выявлено, что микроволновые данные дистанционного зондирования влагозапасов в снежном покрове (максимальные влагозапасы) находятся в обратной зависимости от изменений температурного режима в периоды накопления и таяния снежного покрова. Коэффициент корреляции между изменениями средней месячной температуры воздуха, осреднённой за четыре месяца (январь – апрель), т. е. тех месячных значений температуры, которые играют наиболее значимую роль при формировании максимальных снегозапасов, и колебаниями максимальных влагозапасов составил  $-0,80$  за 33-летний период. В статье также приводится обзор существующих глобальных архивов микроволновых данных дистанционного зондирования влагозапасов в снежном покрове.

**Ключевые слова:** спутниковая микроволновая радиометрия, влагозапасы в снежном покрове, максимальные влагозапасы, снегомерные съёмки, оценка точности, климатические изменения, Невско-Ладожский бассейн

Одобрена к печати: 17.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-252-264

### Введение

Снег имеет большое значение для территории Российской Федерации, где в течение зимы практически вся поверхность покрывается снежным покровом. Сезонный снежный покров имеет наибольшую пространственную протяжённость из всех компонентов криосферы в нашей стране. Талые воды — главный источник питания рек европейской территории России и Сибири, расположенных в средних и высоких широтах, Дальнего Востока, а также большинства горных рек (Доклад..., 2019; Львович, 1974; Singh, Singh, 2001).

Основной характеристикой снежного покрова являются влагозапасы (снегозапасы), которые отражают объём накопленных за зимний период твёрдых осадков, — это важный параметр, используемый в методиках прогноза весеннего половодья и талого стока.

Одной из возможных альтернатив наземным наблюдениям за эквивалентом воды в снежном покрове могут быть данные спутниковой микроволновой радиометрии, имеющие по сравнению с другими данными дистанционного зондирования (ДДЗ) земной поверхности ряд серьёзных достоинств, таких как глобальность, регулярность, независимость от времени суток и погодных условий, многоканальность, возможность построения длинных временных рядов и т. д., и на основе которых в настоящий момент создано несколько глобальных архивов данных по влагозапасам.

Основной целью статьи является оценка качества информации, предоставляемой глобальными архивами данных микроволнового дистанционного зондирования влагозапасов в снежном покрове. Эта информация имеет одно неоспоримое достоинство по сравнению с данными наземных наблюдений: она доступна для всей территории Российской Федерации и сопредельных территорий. Использование такого вида информации в гидрометеорологии позволило бы:

- расширить географическую область применения методов прогноза;
- разработать новые альтернативные подходы к оценке максимальных снегозапасов;
- разработать новые методики прогнозирования талого стока;
- усовершенствовать существующие методы прогноза, основанные, прежде всего, на использовании данных наземных наблюдений.

### Невско-Ладожский бассейн

Нева, входящая в систему водотоков и водоёмов Балтийского бассейнового округа, вытекает из Ладожского озера и впадает в Невскую губу Финского залива Балтийского моря. Водосборная площадь бассейна Невы составляет 281 тыс. км<sup>2</sup> при длине реки всего 74 км (Государственный..., 1986) (с учётом бассейна Ладожского озера, но за исключением водных объектов бассейна Онежского озера).

Водосборная площадь Невы расположена на территории нескольких субъектов Северо-Западного федерального округа Российской Федерации: Санкт-Петербурга, Ленинградской, Новгородской, Вологодской областей, Республики Карелия; также часть водосборной площади приходится на Республику Финляндия.

Реки бассейна Невы и Ладожского озера, согласно классификации Б. Д. Зайкова (Соколов, 1964), по своему водному режиму относятся к восточно-европейскому типу, для которого характерно чётко выраженное весеннее половодье (от 50 до 80 % годового стока во внутригодовом распределении) и повышенная водность осенью. Остальная часть года характеризуется низким расходом воды (летняя и зимняя межень) (Нежиховский, 1981).

Выбор в качестве объекта исследования Невско-Ладожского бассейна объясняется тем, что Северо-Западный регион Российской Федерации отличается интенсивной хозяйственной деятельностью и огромной антропогенной нагрузкой, в том числе и на водные объекты. В этих условиях существует объективная необходимость в обеспечении потенциальных потребителей оперативной информацией о состоянии водных объектов и возможности прогнозных оценок.

### Микроволновые данные дистанционного зондирования влагозапасов в снежном покрове

В табл. 1 представлены основные характеристики глобальных архивов микроволновых данных дистанционного зондирования влагозапасов в снежном покрове, доступные в настоящий момент для исследований (Национальный центр данных по снегу и льду США, *англ.* National Snow and Ice Data Center — NSIDC; [www.nsidc.org](http://www.nsidc.org)).

Несмотря на то что в таблице указано четыре базы данных, в действительности их восемь, так как две базы представлены в различном временном разрешении (суточное, пятидневное и месячное). Большое количество доступных для исследований данных, а также

трудоемкость обработки исходной информации и выполнения расчётов привели к решению ограничиться анализом только месячных значений влагозапасов. В результате были выбраны два архива: Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology (далее — SWEC) и AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids (далее — AMSR-E).

Глобальная база SWEC содержит месячные значения влагозапасов, представленные в 25-километровых равновеликих масштабируемых ячейках сетки земной поверхности Equal-Area Scalable Earth Grids (EASE-Grids) за период с ноября 1978 г. по май 2007 г. Расчёт влагозапасов осуществлялся на основе спутниковых данных радиояркостной температуры, полученных со следующих приборов:

- сканирующего многоканального микроволнового радиометра SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer);
- специального сенсора для получения изображений в микроволновом диапазоне SSM/I (Special Sensor Microwave/Imagers).

Таблица 1. Базы данных микроволнового зондирования влагозапасов в снежном покрове, доступные на сайте Национального центра данных по снегу и льду США

Название базы данных	Разрешение		Период наблюдений
	временное	пространственное	
1. Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology, Version 1	1 мес	25×25 км	Январь 1978 г. — декабрь 2007 г.
2. AMSR-E/Aqua L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2	1 сут	25×25 км	20 июня 2002 г. — 3 октября 2011 г.
	5 дней		
	1 мес		
3. AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent, Version 1	1 сут	25×25 км	2 июля 2012 г. — наст. вр.
	5 дней		
	1 мес		
4. Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover, Version 1	8 дней	25×25 км	5 марта 2000 г. — 1 февраля 2008 г.

Для расчёта использовалась двухчастотная модель восстановления водного эквивалента в снеге, основанная на данных радиояркостной температуры двух каналов радиометра. Причём модель использует отдельные уравнения для данных SMMR и SSM/I в связи с тем, что приборы проводят измерения на различных частотах. Детальное описание алгоритма и уравнений представлено в работах (Chang et al., 1987, 1997), а описание базы данных SWEC — в публикации (Armstrong et al., 2005). База данных SWEC предназначена для исследования сезонных изменений распределения снежного покрова и снегозапасов в континентальном масштабе.

Усовершенствованный пассивный микроволновый радиометр AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer), запущенный на спутнике Aqua в рамках программы системы наблюдений за земной поверхностью EOS (Earth Observing System) в мае 2002 г., является 12-канальным прибором, измеряющим яркостные температуры уходящего (микроволнового) излучения Земли на шести частотах. На момент запуска AMSR-E казалось, что научное сообщество получило в своё распоряжение новейший микроволновый радиометр, который обеспечит учёных данными высокого качества на долгие годы. Однако в октябре 2011 г. было обнаружено, что AMSR-E вызывает вибрацию космического аппарата, которая превышает допустимые пределы (Platnick, 2014). Это послужило причиной полной остановки работы радиометра. Поэтому данные, полученные на основе информации AMSR-E, включая сведения по влагозапасам в снежном покрове, ограничены периодом с июня 2002 г. по октябрь 2011 г.

Основой алгоритма определения водного эквивалента в снеге является двухчастотная модель восстановления влагозапаса, основанная на радиояркостной температуре двух каналов

радиометра, которая использовалась для создания данных SWEC. В исходную модель с целью усовершенствования метода расчёта влагозапаса были внесены модификации, описанные в докладах (Kelly et al., 2005a, b). В качестве исходных данных по радиояркостной температуре использовались оригинальные данные AMSR-E/Aqua L2A Global Swath Spatially-Resampled Brightness Temperatures. Детальное описание базы данных месячных значений влагозапасов AMSR-E, используемой для дальнейшего анализа в настоящей статье, можно найти на ресурсе (Tedesco et al., 2004). Стоит отметить, что, как видно из приведённых выше описаний баз данных, архив AMSR-E является в своём роде продолжением архива SWEC.

Изначально в исследованиях предполагалось использовать базу объединённых данных усовершенствованных микроволновых сканирующих радиометров AMSR-E/AMSR2 Unified L3 Global 25 km EASE-Grid Snow Water Equivalent (далее — AMSR-E/AMSR2), так как она, как видно из её названия и характеристик, представленных в *табл. 1*, является логическим продолжением данных AMSR-E (более современный радиометр AMSR2 является улучшенной версией радиометра AMSR-E). Однако предварительный анализ качества данных AMSR-E/AMSR2 выявил, что они демонстрируют полное отсутствие каких-либо снегозапасов в исследуемом бассейне (аналогично для европейской территории России), что с точки зрения климатических и географических особенностей исследуемого региона невозможно. Авторы надеются, что данная ошибка будет исправлена создателями базы в ближайшем будущем, но из исследований база была исключена.

Архив Global EASE-Grid 8-day Blended SSM/I and MODIS Snow Cover не использовался в дальнейшей работе по двум причинам: из-за временного разрешения — 8 дней, а также самого короткого периода наблюдений из всех анализируемых архивов.

### Взаимное сравнение данных дистанционного зондирования и оценка их точности путём сравнения с наземными наблюдениями

На *рис. 1а* (см. с. 256) показана динамика колебаний месячных значений влагозапасов в снежном покрове в Невско-Ладожском бассейне (представлены осреднённые для площади бассейна значения), полученных на основе данных SWEC и AMSR-E за пятилетний период совместных наблюдений 2002–2007 гг. Общее время наблюдений составляет 60 мес, а рассчитанный коэффициент корреляции за данный период — 0,96. Как видно из *рис. 1*, значения, рассчитанные по двум базам данных, весьма близки и одинаково отражают динамику колебаний снегозапасов в исследуемом бассейне (см. *рис. 1в*) с той лишь разницей, что данные AMSR-E демонстрируют более заниженные объёмы влагозапаса в период формирования максимальных значений, а также таяния снежного покрова (см. *рис. 1б*).

Так как с точки зрения гидрологии наиболее важной характеристикой снега является максимальное значение влагозапаса в снежном покрове перед началом таяния, которое показывает количественный потенциал водного эквивалента в снежном покрове, готового принять участие в формировании весеннего речного стока (для большинства рек Российской Федерации — стока весеннего половодья), то было очень важным проанализировать возможность формирования многолетнего ряда максимальных снегозапасов на основе исследуемых архивов данных, а также проанализировать, как значения максимальных снегозапасов SWEC и AMSR-E согласуются между собой.

На *рис. 2* (см. с. 257) представлена методика формирования многолетнего ряда максимальных снегозапасов в исследуемом бассейне на основе данных SWEC и AMSR-E, предложенная авторами. На первом этапе осуществляется выбор максимального значения влагозапаса в снежном покрове за каждый период накопления и таяния снега. Существует два подхода определения максимального значения из месячных величин влагозапаса: первый — расчётом среднего значения за месяцы, когда наблюдаются максимальные снегозапасы (каждый год они могут формироваться в разные месяцы, например в феврале или марте); второй — простым выбором максимального значения из всех месячных величин в течение зимне-весеннего периода. В данных исследованиях использовался второй подход (см. *рис. 2а*).

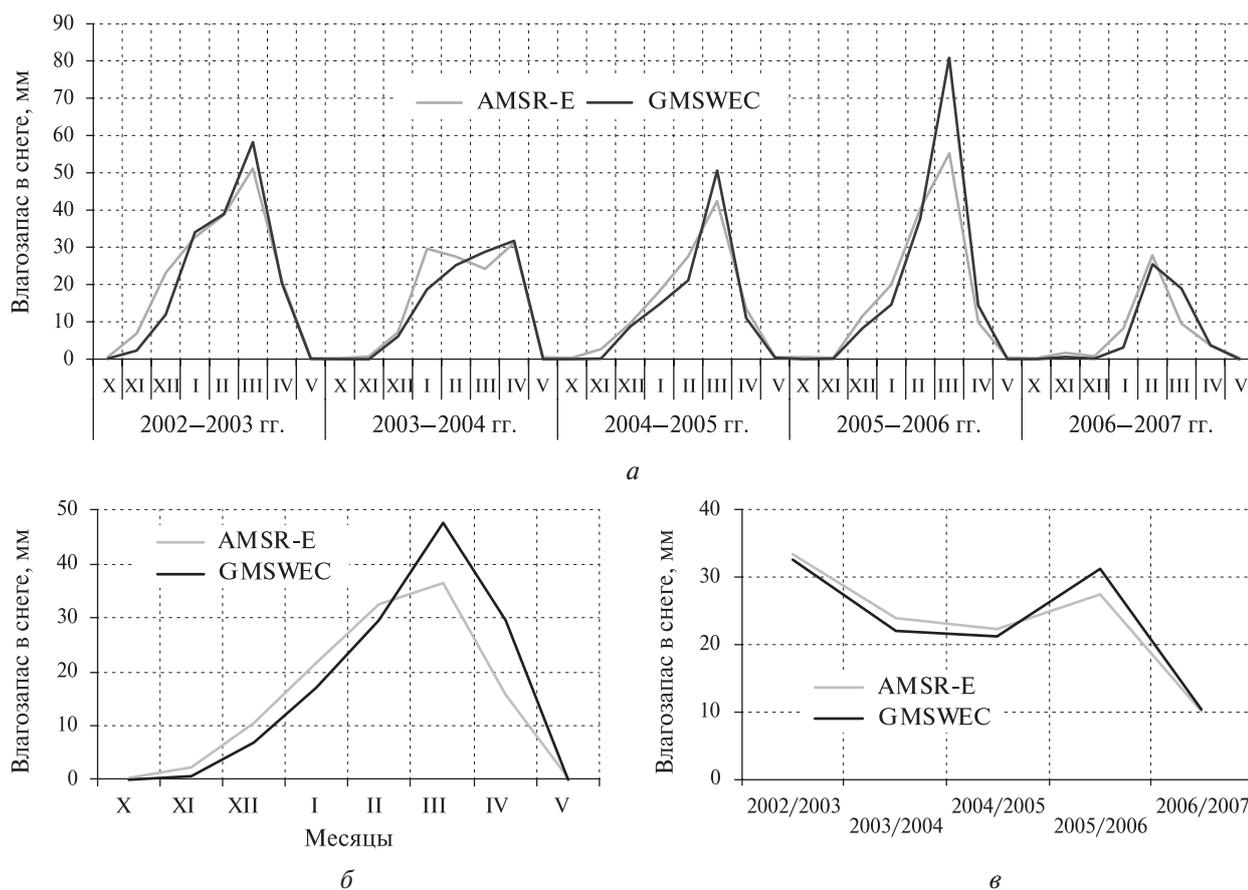


Рис. 1. Сравнительный анализ значений влаготазпасов в снежном покрове, рассчитанных для Невско-Ладожского бассейна на основе данных SWEC и AMSR-E, за пятилетний период совместных наблюдений 2002–2007 гг.: а — колебания месячных значений влаготазпаса в снежном покрове за зимние периоды; б — распределение влаготазпаса в течение зимы (средние за 2002 г.); в — колебания средних годовых значений влаготазпаса (средние за XII–IV месяцы)

После того как максимальные значения по каждой из баз данных определены, строится график взаимосвязи максимальных влаготазпасов SWEC и AMSR-E с целью определения уравнения связи (см. рис. 2б). Последним этапом является дополнение ряда максимальных значений снеготазпасов SWEC (период 1978–2007 гг.) значениями влаготазпаса, рассчитанными с помощью уравнения связи на основе данных по максимальным влаготазпасам архива AMSR-E, — таким образом период наблюдений продлевается до 2011 г. (см. рис. 2в), что очень важно при исследованиях современных климатических и гидрологических изменений, происходящих в исследуемом бассейне.

После сравнительного анализа была выполнена оценка точности значений снеготазпасов, полученных на основе данных SWEC и AMSR-E, путём сравнения ДДЗ с наземными наблюдениями. В качестве наземных наблюдений использовалась информация по снегомерным съёмкам массива данных «Маршрутные снегомерные съёмки», доступного на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (далее — ВНИИГМИ-МЦД) (Булыгина и др., 2019), а также архива Former Soviet Union Hydrological Snow Surveys NSIDC (Krenke, 1998).

Оценка точности осуществлялась двумя способами: сравнением ДДЗ с информацией по снегомерным съёмкам нескольких избранных метеорологических станций, располагающихся в бассейне, а также анализом обработанной информации по влаготазпасам для всего бассейна в целом. В первом случае в качестве ДДЗ использовались значения водного эквивалента в снеге ячейки сетки (размер ячейки — 25×25 км), где располагается конкретная метеостанция. Во втором случае на основе данных по 22 метеорологическим станциям, равномерно

расположенным в бассейне, простым среднеарифметическим осреднением рассчитывались значения влагозапаса для всего бассейна, которые сравнивались с аналогичными данными SWEC и AMSR-E. В обоих случаях наземные данные по снегомерным съёмкам, представленные в виде декадных и пентадных наблюдений, с помощью специально разработанного программного обеспечения приводились к средним (путём осреднения) и максимальным (выбором максимального значения) месячным значениям влагозапаса наземных наблюдений. Дополнительно осуществлялось сравнение многолетних рядов влагозапаса за февраль и март, т.е. за месяцы, в которых наблюдаются максимальные значения влагозапаса в исследуемом бассейне.

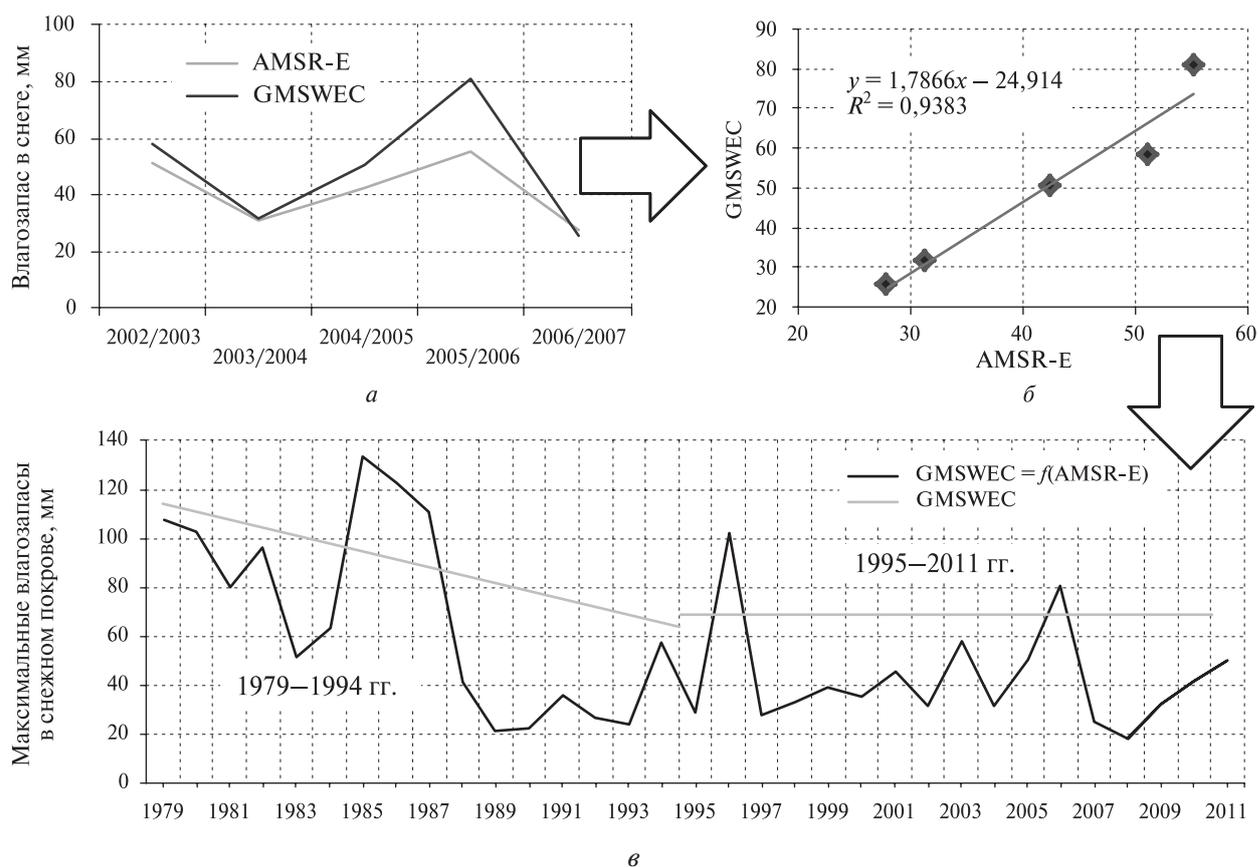


Рис. 2. Методика формирования многолетнего ряда максимальных снегозапасов в Невско-Ладожском бассейне на основе данных SWEC и AMSR-E за период 1979–2011 гг.: *а* — колебания максимальных за зимний период месячных значений влагозапаса; *б* — связь максимальных значений влагозапаса, мм; *в* — Колебания максимальных значений влагозапаса в бассейне за 1979– 2011 гг.

Анализ сопоставления данных дистанционного зондирования влагозапаса в снежном покрове с рядами влагозапаса, полученными на основе снегомерных съёмок, выявил следующие особенности. Во-первых, данные по отдельным метеорологическим станциям сильно различаются между собой. Это касается как самих значений, так и тенденций их изменения. В среднем снегозапасы, полученные по данным спутниковой информации SWEC и AMSR-E, на 25–35 % меньше, чем рассчитанные на основе снегомерных съёмок. Это в принципе не удивительно, так как факт, что микроволновые ДДЗ занижают значения влагозапаса в снеге, хорошо известен (Березин и др., 2013; Турков и др., 2017). Тем не менее анализ рядов данных, рассчитанных для всего Невско-Ладожского бассейна, выполненный за различные месяцы для максимальных значений влагозапаса, выявил, что ДДЗ демонстрируют аналогичные тенденции, что и данные наземных наблюдений, а именно уменьшение максимальных влагозапасов в исследуемом бассейне (около 15–18 мм/10 лет).

В табл. 2 в качестве примера приводится сравнительный анализ точности данных SWEC путём сравнения с наземными наблюдениями для всего Невско-Ладожского бассейна за 12-летний период.

Таблица 2. Сравнение значений максимальных запасов воды в снежном покрове, полученных на основе снегомерных съёмок и данных SWEC за период 1979–1990 гг.

Год	Февраль			Март		
	Снегомерные съёмки, мм	SWEC, мм	$\Delta$ (SWEC – снегомерные съёмки), мм	Снегомерные съёмки, мм	SWEC, мм	$\Delta$ (SWEC – снегомерные съёмки), мм
1979	101	103	2	94	110	15
1980	100	71	-29	114	100	-14
1981	120	42	-78	151	62	-89
1982	142	70	-72	143	99	-44
1983	71	50	-22	75	47	-28
1984	129	43	-87	144	65	-78
1985	83	137	55	92	116	24
1986	86	128	42	87	100	13
1987	85	104	19	96	113	17
1988	67	43	-25	84	32	-52
1989	96	14	-82	102	22	-79
1990	45	17	-27	41	15	-26
<b>Среднее</b>	<b>94</b>	<b>68</b>	<b>-25</b>	<b>102</b>	<b>73</b>	<b>-28</b>

### Обратная зависимость между максимальными влагозапасами в снежном покрове и температурой воздуха в зимне-весенней период

На рис. 3 (см. с. 259) представлен анализ климатических изменений, происходящих в исследуемом бассейне, выполненный на основе данных по температуре воздуха, атмосферным осадкам и количеству холодных дней в месяце климатического архива Climate Research Unit (далее — CRU) (Harris et al., 2014), и их влияния на изменения максимальных влагозапасов снежного покрова в бассейне, представленных рядом совмещённых данных SWEC и AMSR-E.

Данный анализ показывает, что последние десятилетия в Невско-Ладожском бассейне, как и на большей части Российской Федерации, происходит существенное потепление климата (см. рис. 3а), которое прямым образом влияет на сезонные температуры воздуха в регионе. В результате этих изменений зимы в исследуемом бассейне становятся теплее (см. рис. 3б, (1)) и короче (см. рис. 3б, (2)) из-за существенного уменьшения количества дней с отрицательной температурой в месяце осенью и весной, а также более заснеженными (см. рис. 3б, (3)) из-за увеличения зимних осадков. В то же время максимальные влагозапасы в снежном покрове демонстрируют тенденцию к уменьшению (см. рис. 3в). Полученные по данным CRU результаты подтверждаются анализом данных метеорологических станций архива ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.meteo.ru>).

Причиной тому, что при одновременном увеличении зимних осадков происходит уменьшение максимальных снегозапасов, может быть существенное потепление в период формирования и деградации снежного покрова с осени по весну, результатом чего является увеличение количества оттепелей, которые не позволяют всем выпавшим твёрдым осадкам принимать непосредственное участие в формировании максимального влагозапаса в бассейне. Хотя, по мнению авторов, уменьшению снегозапасов при одновременном увеличении зимних осадков и потеплении в зимне-весенний период, возможно, имеется и другое объяснение.

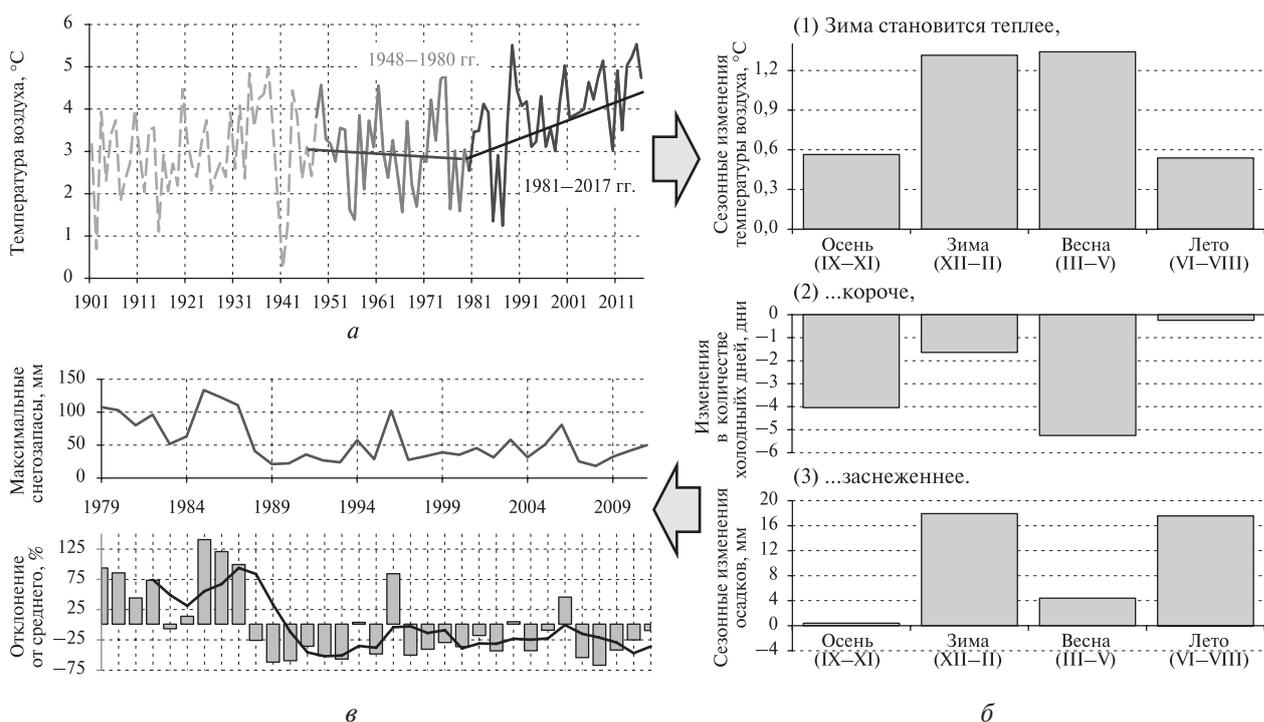


Рис. 3. Анализ климатических изменений, происходящих в Невско-Ладожском бассейне в последние десятилетия, на основе данных климатического архива CRU и данных по влагозапасам SWEC и AMSR-E: *а* — колебания средней годовой температуры воздуха в Невско-Ладожском бассейне за период 1901–2017 гг.; *б* — аномалии климатических характеристик за период 1981–2017 гг. по сравнению с периодом 1948–1980 гг., рассчитанные на основе данных сеточного климатического архива CRU TS v 4.02; *в* — отклонения максимальных снегозапасов в Невско-Ладожском бассейне за конкретные годы от среднего значения максимальных снегозапасов за период 1979–2011 гг. (по данным GMSWEC и AMSR-E)

Анализ данных SWEC и AMSR-E, выполненный авторами для нескольких основных речных бассейнов европейской территории России (рек Нева, Волга, Северная Двина и Печора), позволил выявить интересные особенности. Во-первых, это тенденция к уменьшению значений максимальных влагозапасов в снежном покрове практически во всех исследуемых бассейнах за период 1979–2011 гг., и во-вторых, обратная зависимость влагозапасов, рассчитанных для данных бассейнов, и температуры воздуха в зимне-весенний период (период формирования максимальных влагозапасов).

Рисунок 4 (см. с. 260) демонстрирует взаимосвязь между изменениями средней месячной температуры воздуха, осреднённой за четыре месяца (январь – апрель) зимне-весеннего периода на основе данных CRU, т.е. тех месячных значений температуры, которые играют наибольшую роль при формировании максимальных снегозапасов, и непосредственно колебаниями максимальных влагозапасов в Невско-Ладожском бассейне. Полученный коэффициент корреляции за 33-летний период составил  $-0,80$ , что является статистически значимым. Результаты подтверждаются анализом, выполненным с использованием других данных, а именно наземных наблюдений за температурой воздуха архива ВНИИГМИ-МЦД, так как данные климатических сеточных архивов зачастую подвергаются критике как продукт интерполяции ограниченного количества метеорологических станций, учитывая, что любая интерполяция оригинальных данных несёт в себе определённую погрешность.

На рис. 5 (см. с. 260) представлен аналогичный анализ, что и на рис. 4, с той лишь разницей, что в качестве индикатора колебаний температурного режима в исследуемом бассейне используется суммарное количество дней со средней суточной температурой воздуха выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. оттепелей, за период с декабря по март, рассчитанное как сумма по данным семи метеорологических станций (Сортавала, Лодейное поле, Тихвин, Санкт-Петербург, Холм, Новгород, Новая Ладога). Коэффициент корреляции за период 1981–2000 гг. составил  $-0,68$ .



Рис. 4. Связь между изменениями максимальных влагозапасов в снежном покрове (данные SWEC и AMSR-E) и колебаниями зимне-весенней температуры воздуха, осреднённой с января по апрель (данные CRU), в Невско-Ладожском бассейне за период 1979–2011 гг.

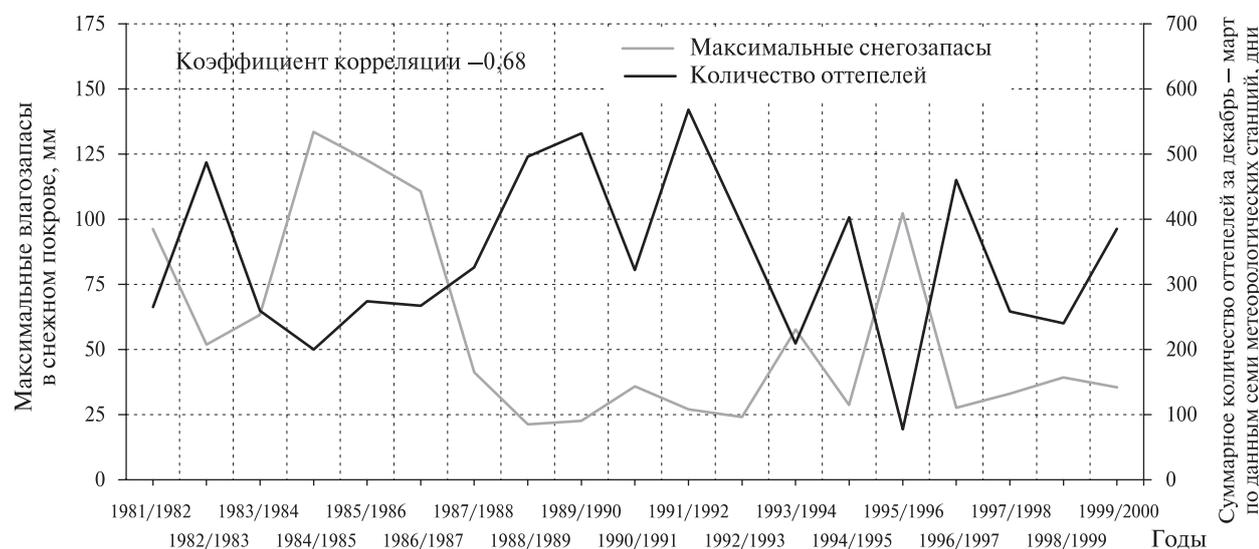


Рис. 5. Связь между изменениями максимальных влагозапасов в снежном покрове (данные SWEC и AMSR-E) и количеством оттепелей с декабря по март, рассчитанных на основе данных семи метеорологических станций (архив ВНИИГМИ-МЦД), в Невско-Ладожском бассейне за период 1981–2000 гг.

Авторы полагают, что алгоритм расчёта влагозапасов SWEC и AMSR-E (используется один и тот же исходный алгоритм), во-первых, недооценивает их величину по сравнению с наземными наблюдениями для ЕТР, а во-вторых, воспроизводит значения снегозапасов, которые коррелируют с приземной температурой, повторяя тенденцию и динамику изменений температурного режима в регионе за период формирования максимальных влагозапасов, что отражается в обратной зависимости между влагозапасами в снеге и температурой воздуха за данный период. Причиной этого феномена, по мнению авторов, могут быть особенности алгоритма расчёта, приведённые ниже.

Одним из основных недостатков алгоритма расчёта SWEC, который приводится в описании архива (Armstrong et al., 2005), является то, что при большом количестве влаги в снежном покрове, характерном для тающего снега во время оттепелей, алгоритм выдаёт заниженные значения запаса воды в снеге либо его отсутствие, так как из-за увеличения внутреннего

поглощения резко изменяются характеристики микроволнового излучения. Серьёзное влияние на микроволновое излучение оказывают жидкие осадки, а также сферическая форма зёрен снега. В модернизированном алгоритме расчёта AMSR-E (Chang, Rango, 2000) используются данные по приземной температуре воздуха, рассчитанные по микроволновым данным MODIS, на основе которых для каждой ячейки определяется состояние снежного покрова (сухой или влажный) и наличие жидких осадков. В случае если обнаруживается одно из этих условий (влажный снег или жидкие осадки), а также если температура воздуха превышает пороговое значение 273 К, значение запаса воды в снеге не рассчитывается и принимается равным нулю для данных конкретных суток. А так как месячные значения AMSR-E рассчитываются на основе суточных данных (также как и месячные значения SWEC), то при наличии оттепелей в течение месяца могут получаться заниженные значения запаса воды в снеге.

Стоит отметить, что в настоящее время архивы SWEC и AMSR-E практически не используются для оценки снегозапасов, а в большей степени приводятся в качестве неудачной попытки создания глобальных данных по влагозапасам, значения которых существенно отличаются от наземных наблюдений. В последнее время в научном сообществе наибольшую популярность получили данные по снегозапасам Европейского космического агентства ESA GlobSnow Snow Water Equivalent (Takala et al., 2011), которые являются результатом ассимиляции данных спутникового микроволнового радиометра с наземными данными синоптических метеостанций и, соответственно, при сравнении с данными наземных наблюдений показывают близкие к ним значения.

Другая актуальная проблема, на которую авторы хотели бы обратить внимание, — точность определения запаса воды в снеге в масштабе крупного речного бассейна (или какого-нибудь региона) на основе наземных наблюдений, которые принято считать эталонными. В большинстве случаев влагозапасы в снежном покрове определяются на основе измерений снегомерных съёмок, выполняемых раз в десять или в пять дней (во время периода интенсивного таяния снежного покрова) на метеорологических станциях. Как полагают авторы, несмотря на то что наземные наблюдения являются наиболее точными из всех существующих видов информации по запасу воды в снежном покрове, существует ряд факторов, вносящих погрешность в конечный результат определения осреднённых для крупного речного бассейна значений, таких как: редкая и неравномерная сеть наблюдений, особенно для северных, малонаселённых и горных регионов; выбор подходящих методов пространственной и временной интерполяции, а также осреднения данных на основе имеющейся информации для различных типов бассейнов; объективная интерпретация данных снегомерных съёмок, которые представляют собой сложные маршрутные измерения, каждый раз заново выполняемые для различных ландшафтов формирования снежного покрова (поле/лес), и т. п. В результате достаточно часто не удаётся найти вроде бы очевидную связь между максимальными значениями запаса воды в снеге перед началом таяния снежного покрова, рассчитанными на основе различных данных, включая наземные наблюдения, и речным стоком весеннего половодья для преобладающего большинства крупных рек Российской Федерации.

## **Основные выводы и заключение**

Обобщая полученные в ходе выполненных исследований результаты, можно сделать следующие выводы:

- микроволновые данные дистанционного зондирования влагозапаса в снежном покрове SWEC и AMSR-E хорошо согласуются между собой и при применении предложенной авторами методики могут использоваться для формирования общего ряда максимальных значений влагозапаса в снежном покрове за период с 1978 по 2011 г.;
- нельзя полагаться на количественную оценку снегозапасов, полученных на основе данных SWEC и AMSR-E, по крайней мере для Северо-Западного региона Российской Федерации, так как сравнительный анализ данных дистанционного зондирования и наземных снегомерных съёмок выявил существенные различия между значениями

влагозапаса в снежном покрове: в среднем значения данных SWEC и AMSR-E на 25–35 % ниже по сравнению с наземными наблюдениями;

- данные SWEC и AMSR-E находятся в тесной обратной зависимости от зимне-весенней температуры воздуха, что, по всей видимости, связано с алгоритмом расчёта запаса воды в снежном покрове.

В заключение стоит отметить, что микроволновая спутниковая радиометрия имеет более чем 50-летнюю историю, начиная с запуска в сентябре 1968 г. спутника «Космос-243» с четырьмя микроволновыми радиометрами, и продолжает развиваться с появлением в последние десятилетия новых современных радиометров MODIS, AMSR-E, AMSR2 и др. Авторы полагают, что информация по влагозапасам снежного покрова, созданная на основе микроволновых данных дистанционного зондирования, будет пополняться новыми архивами данных, поэтому продолжение научных исследований в этом направлении, несмотря на неоднозначное качество таких данных, является необходимой задачей.

## Литература

1. 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. аэрокосм. ин-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2013. Вып. 5(51). С. 9–12.
2. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива данных «Маршрутные снегомерные съемки». URL: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys#описание-массива-данных> (дата обращения 15.11.2019).
3. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 5. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М: Росгидромет, 2019. 79 с.
5. Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
6. Нежиховский Р. А. Река Нева и Невская губа. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 112 с.
7. Соколов А. А. Гидрография СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 536 с.
8. Турков Д. В., Сократов В. С., Туткова Т. Б. Определение снегозапасов Западной Сибири по расчётам на модели локального тепловлагообмена SPONSOR с использованием данных реанализа // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 343–354. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-343-354.
9. Armstrong R., Brodzik M. J., Knowles K., Savoie M. Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology. Version 1. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Boulder, Colorado, USA, 2005. URL: <https://doi.org/10.5067/KJVERY3MIBPS> (accessed 15.11.2019).
10. Chang A. T. C., Rango A. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm. Version 3.1. NASA Goddard Space Flight Center. 2000. 49 p. URL: [https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/amsr\\_atbd\\_snow.pdf](https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/amsr_atbd_snow.pdf).
11. Chang A. T. C., Foster J. L., Hall D. K. Nimbus-7 Derived Global Snow Cover Parameters // Annals of Glaciology. 1987. V. 9. P. 39–44.
12. Chang A. T. C., Foster J. L., Hall D. K., Goodison B. E., Walker A. E., Metcalfe J. R. Snow Parameters Derived from Microwave Measurements During the BOREAS Winter Field Experiment // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. Iss. D24. P. 29 663–29 671.
13. Harris I. D., Jones P. D., Osborn T. J., Lister D. H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset // Intern. J. Climatology. 2014. V. 34. P. 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.
14. Kelly R. E. J., Foster J. L., Hall D. K. (2005a) The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Status and Future Development // American Geophysical Union Fall Meeting. San Francisco, California. 5–9 Dec. Abstract C21C-1134. 2005.
15. Kelly R. E. J., Foster J. L., Hall D. K. (2005b) The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Algorithm Development and Progress in Product Validation // Proc. 28<sup>th</sup> General Assembly of the Union of Intern. Radio Science. New Delhi, India. 23–29 Oct. 2005.
16. Krenke A. Former Soviet Union Hydrological Snow Surveys, 1966–1996. Version 1. National Snow and Ice Data Center. 1998 (updated 2004). URL: <https://doi.org/10.7265/N58C9T60> (accessed 15.11.2019).
17. Platnick S. Editor's Corner // The Earth Observer. May–June 2014. V. 26. Iss. 3. P. 2–3. URL: [https://eo-spso.nasa.gov/sites/default/files/eo\\_pdfs/May-Jun%202014\\_final\\_color508.pdf](https://eo-spso.nasa.gov/sites/default/files/eo_pdfs/May-Jun%202014_final_color508.pdf) (accessed 15.11.2019).
18. Singh P., Singh V. P. Snow and Glacier Hydrology. Springer, 2001. 756 p.

19. Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J., Koskinen J., Bojkov B. Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. P. 3517–3529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>.
20. Tedesco M., Kelly R., Foster J. L., Chang A. T. AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids. Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Boulder, Colorado, USA, 2004. URL: [https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE\\_MOSNO.002](https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_MOSNO.002) (accessed 15.11.2019).

## Global microwave snow water equivalent data: comparison with ground observations and inverse correlation with winter-spring air temperature (case study: Neva-Ladoga basin)

M. V. Georgievsky<sup>1</sup>, S. V. Romanov<sup>2</sup>, T. V. Parshina<sup>1</sup>, V. L. Trushevsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia  
E-mail: [mgeorgievsky@hotmail.com](mailto:mgeorgievsky@hotmail.com)

<sup>2</sup> LLC Lenvodproekt, Saint Petersburg 196105, Russia  
E-mail: [erlin.spb@gmail.com](mailto:erlin.spb@gmail.com)

The paper describes the quality assessment of information provided by global microwave snow water equivalent data. The investigation area is the Neva-Ladoga basin where snow plays an important role in the formation of spring runoff. Two global data archives: Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology and AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids were analyzed as initial information. At the first stage of the study, the intercomparison of satellite data on snow water equivalent (SWE) was carried out as well as an assessment of their accuracy by comparing with ground-based observations. It was found that the archival data are in good agreement with each other, but significantly underestimate the SWE in comparison with the snow surveys data. At the second stage of the research, the relationship between the long-term fluctuations in the maximum SWE values obtained from the microwave data and winter-spring air temperature over the investigation basin was analyzed. The obtained results demonstrate that the microwave data (maximum SWE) have an inverse relationship with the air temperature changes during snow cover accumulation and melting periods (January – April). The correlation coefficient is  $-0.80$  for the 33-year period. The article also provides an overview of existing global microwave snow water equivalent databases.

**Keywords:** satellite microwave radiometry, snow water equivalent, maximum snow water equivalent, snow survey, comparative analysis, climate change, Neva-Ladoga basin

Accepted: 17.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-252-264

## References

1. Berezin K. Yu., Dmitriev A. V., Dmitriev V. V., Otsenka vlagozapasa snezhnogo pokrova po dannym sputnikovoi radiometrii dlya stepnoi zony Zapadnoi Sibiri (Assessment of snow water equivalent based on satellite radiometry data for the steppe zone of Western Siberia), *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo instituta imeni akademika M. F. Reshetneva*, 2013, Vol. 5(51), pp. 9–12.
2. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Aleksandrova T. M., *Opisanie massiva dannykh "Marshrutnye snegomernye s'emki"* (Description of the dataset "Route snow surveys"), available at: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys> (accessed 15.11.2019).
3. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. T. 1. RSFSR* (State Water Cadastre. Long-term data on the regime and resources of land surface water. Vol. 1. RSFSR), Issue 5, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986.

4. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2018 god* (2018 climate report on the territory of the Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2019, 79 p.
5. Lvovich M. I., *Mirovye vodnye resursy i ikh budushchee* (World water resources and their future), Moscow: Mysl', 1974, 448 p.
6. Nezhikhovskii R. A., *Reka Neva i Nevskaya guba* (Neva River and Neva Bay), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 112 p.
7. Sokolov A. A., *Gidrografiya SSSR* (Hydrography of the USSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1964, 536 p.
8. Turkov D. V., Sokratov V. S., Titkova T. B., *Opredelenie snegozapasov Zapadnoi Sibiri po raschetam na modeli lokal'nogo teplovлагообмена SPONSOR s ispol'zovaniem dannykh reanaliza* (Determination of snow water equivalent in Western Siberia by application of the model of local heat and moisture exchange SPONSOR using reanalysis data), *Led i Sneg*, 2017, Vol. 57, No. 3, pp. 343–354, DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-343-354.
9. Armstrong R., Brodzik M. J., Knowles K., Savoie M., *Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology, Version 1*, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado, USA, 2005, available at: <https://doi.org/10.5067/KJVERY3MIBPS> (accessed 15.11.2019).
10. Chang A. T. C., Rango A., *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm, Version 3.1*, NASA Goddard Space Flight Center, 2000, 49 p., available at: [http://nsidc.org/data/amsre/pdfs/amsr\\_atbd\\_snow.pdf](http://nsidc.org/data/amsre/pdfs/amsr_atbd_snow.pdf).
11. Chang A. T. C., Foster J. L., Hall D. K., *Nimbus-7 Derived Global Snow Cover Parameters*, *Annals of Glaciology*, 1987, Vol. 9, pp. 39–44.
12. Chang A. T. C., Foster J. L., Hall D. K., Goodison B. E., Walker A. E., Metcalfe J. R., *Snow Parameters Derived from Microwave Measurements During the BOREAS Winter Field Experiment*, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, Issue D24, pp. 29663–29671.
13. Harris I. D., Jones P. D., Osborn T. J., Lister D. H., *Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset*, *Intern. J. Climatology*, 2014, Vol. 34, pp. 623–642, DOI: 10.1002/joc.3711.
14. Kelly R. E. J., Foster J. L., Hall D. K. (2005a), *The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Status and Future Development*, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, California, 5–9 Dec., Abstract C21C-1134, 2005.
15. Kelly R. E. J., Foster J. L., Hall D. K. (2005b), *The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Algorithm Development and Progress in Product Validation*, *Proc. 28<sup>th</sup> General Assembly of the Union of Intern. Radio Science*, New Delhi, India, 23–29 Oct. 2005.
16. Krenke A., *Former Soviet Union Hydrological Snow Surveys, 1966–1996, Version 1*, National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA, 1998 (updated 2004), available at: <https://doi.org/10.7265/N58C9T60> (accessed 15.11.2019).
17. Platnick S., *Editor's Corner*, *The Earth Observer*, May–June 2014, Vol. 26, Issue 3, pp. 2–3, available at: [https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/eo\\_pdfs/May-Jun%202014\\_final\\_color508.pdf](https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/eo_pdfs/May-Jun%202014_final_color508.pdf) (accessed 15.11.2019).
18. Singh P., Singh V. P., *Snow and Glacier Hydrology*, Springer, 2001, 756 p.
19. Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J., Koskinen J., Bojkov B., *Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements*, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 3517–3529, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>.
20. Tedesco M., Kelly R., Foster J. L., Chang A. T., *AMSR-E/Aqua Monthly L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids, Version 2*, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado, USA, 2004, available at: [https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE\\_MOSNO.002](https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_MOSNO.002) (accessed 15.11.2019).