

Анализ характера снеготпасов с использованием спутниковой информации

Л.М. Китаев

*Институт географии РАН,
109017, Москва, Старомонетный пер. 29,
E-mail: lkitaev@mail.ru*

Проведен сравнительный анализ наблюдаемых и восстановленных по спутниковым данным снеготпасов Восточно-Европейской равнины и Скандинавии. Выявлен диапазон погрешностей восстановленных данных и определены их причины. Проведена типизация погрешностей относительно приземной температуры воздуха. Разработанный подход оценки достоверности восстановленных данных предлагается для отбора пригодной к исследованиям снеготпасов спутниковой информации.

Ключевые слова: снеготпасы, спутниковая информация, наблюдаемые и восстановленные данные, типизация погрешностей.

Мотивация и задачи исследований

Исследования пространственных и временных изменений снежного покрова являются важным звеном в изучении изменчивости гидросферы и хорошим индикатором современных изменений климата. В связи с чем, оперативный мониторинг снеготнакопления требует разработки специальных методов и технологий. Уже долгое время оценку состояния снеготпасов пытаются осуществлять посредством спутниковых наблюдений, в частности на основе измерения пассивного микроволнового излучения с помощью платформ MODIS SSMR и MODIS SSM/I.

Модели восстановления снеготпасов по данным дистанционных измерений как правило основаны на расчете разницы тех или иных частотных диапазонов микроволнового излучения в сочетании с коэффициентами, так или иначе характеризующими особенности поверхности и, в первую очередь, состояние растительности. Неоспоримыми преимуществами получаемой в результате информации – в сравнении с традиционными наземными данными – являются широкий пространственный охват в совокупности с частыми замерами. Существенный недостаток спутниковых наблюдений: неточности восстановленных данных, связанные с влиянием растительности и расчлененного рельефа, с характером снежной толщи – слоистость, наличие воды и ледяных прослоек, величина зерна, толщина [1, 2]. В результате, в настоящее время разработан ряд моделей по восстановлению снеготпасов по спутниковым данным, и одновременно имеет место ряд публикаций, содержащих критические замечания по поводу возможностей использования этих моделей [1, 3, 4].

Основная задача наших исследований состоит в выявлении метеорологических условий, при которых погрешность результатов восстановления снеготпасов по космическим данным минимальна относительно данных наземных, для чего оцениваются как сами погрешности, так и метеорологические условия их определяющие. В результате выявляются метеорологические условия, при которых величина снеготпасов, рассчитанная на основе спутниковых измерений микроволнового излучения, наиболее приемлема для мезо- и макромасштабных оценок.

Исходные материалы

Исследование проведено для севера Восточно-Европейской равнины с охватом сопредельных территорий России, Финляндии и Норвегии (рис. 1). Восстановленные по космическим данным значения снегозапасов (водный эквивалент) заимствованы из свободной к использованию базы данных AE_DySno (AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids) для периода с 1978 года по 2006 г. Данные представляют собой цифровые аналоги суточных карт снегозапасов для всего Земного шара в регулярной сетке с шагом 25 км. Нами использованы значения снегозапасов на последние числа ноября, декабря, января и февраля. Соответственно, февральские значения характеризуют величину снегонакопления за все означенные четыре месяца.

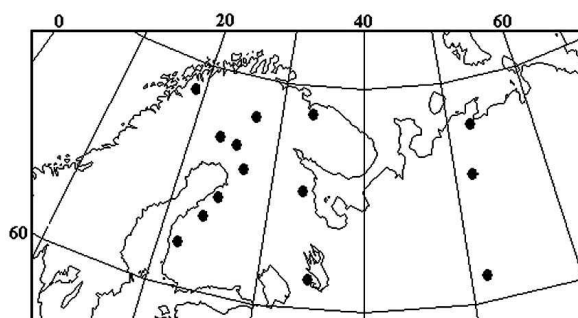


Рис. 1. Расположение метеорологических станций, данные которых были использованы в исследованиях

Модель восстановления водного эквивалента снегозапасов (S) основана на уравнении [5]:

$$S = 4.8 (T18H - T37H)$$

где $T18H$ и $T37H$ – радиояркостные температуры яркости ($^{\circ}K$) в каналах 18 ГГц и 37 ГГц на горизонтальной поляризации. Коэффициент 4.8 используется как попытка учета свойств снежного покрова, характеризуя плотность снежного покрова 0.30 г/см^3 и величину зерна 0.3 мм. Первоначально уравнение было разработано для данных SSRMR, а затем уточнялось для данных SSRM/I в связи с использованием здесь других частот:

$$S = 4.8 ((T19H - 5) - T37H)$$

Учет лесистости осуществлен при восстановлении снегозапасов путем введения специального коэффициента f :

$$S = 4.8 (T18H - T36H) / (1 - 0.2f)$$

Авторы модели и соответствующих карт предполагают среднюю ошибку восстановленных снегозапасов в пределах 25%. Проверка этого утверждения и оценка зависимости реальной ошибки от метеорологических условий проводились с использованием данных наземных наблюдений 18-ти метеорологических станций, из которых десять расположены на территории России, семь в Финляндии и одна в Норвегии (рис. 1). Для означенных станций использована толщина снежного покрова на последнюю дату ноября, декабря, января и февраля, и рассчитаны с начала ноября по конец каждого месяца средняя температура воздуха, суммарные осадки и количество дней со средней температурой воздуха выше нуля.

Толщина снежного покрова используется как исходные данные ввиду отсутствия режимных наблюдений плотности снега и, соответственно, расчетов его водного эквивалента на территории Скандинавии. Но, поскольку восстановленные по данным микроволнового излучения снеготпасы приводятся в значениях именно водного эквивалента, был выполнен соответствующий пересчет с использованием регрессионного анализа суточных значений толщины снега и его водного эквивалента – данным российских метеорологических станций. Для максимально учета возможных вариаций нами использована зависимость изменчивости водного эквивалента от изменений толщины снега, свойственных периоду с ноября по февраль включительно – с коэффициентом регрессии 0.958. Проверка значимости регрессионного уравнения на независимых данных дополнительных станций (север Восточно-Европейской равнины) дала положительный результат.

Таким образом, для оценки точности восстановленных по результатам спутниковых наблюдений снеготпасов использовались метеорологические данные наблюдений метеорологических станций (рис. 1) и значения снеготпасов по данным E_DyS для ячеек 25x25 км с соответствующими метеорологическим станциям координатами.

Погрешность восстановленных значений снеготпасов по данным микроволнового излучения

Для учета максимальной вариации погрешности восстановленных данных снеготпасов использовалась вся совокупность значений – ежемесячно (ноябрь-февраль). Ошибка вычислялась по формуле:

$$S_{\Pi} = (S_{\text{H}} - S_{\text{B}}) / S_{\text{H}}$$

где S_{Π} – погрешность; S_{H} – снеготпасы по данным наземных наблюдений; S_{B} – восстановленные данные.

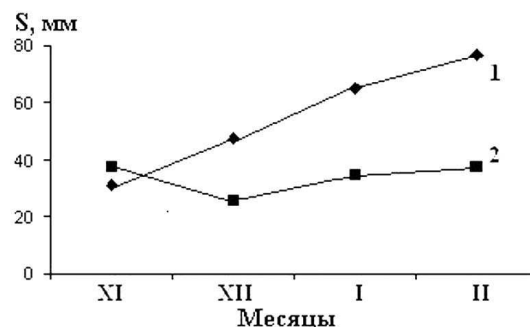


Рис. 2. Изменение наблюдаемых (1) и восстановленных (2) снеготпасов (S , мм) по месяцам

Как уже упоминалось, авторы модели предположили среднюю ошибку восстановленных данных снеготпасов в пределах 25% [5]. Однако, для исследуемого региона погрешность отдельных месяцев лежит в диапазоне 55-74%, а погрешность всего периода ноябрь-февраль составляет 67% (табл. 1). С увеличением снежности растет и стандартное отклонение: от ноября к февралю удваиваясь для наблюдаемых снеготпасов и увеличиваясь в 3.5 раза для восстановленных. Такое занижение реальных снеготпасов восстановленными данными связано с ограниченной глубиной проникновения микроволнового излучения с одной стороны и наличием льдистых включений, образовавшихся вследствие оттепелей. Сходство наблюдаемых и восстановленных значений имеет место лишь в направленности их изменчивости от месяца к месяцу (рис. 2).

Таблица 1. Средние значения наблюдаемых и восстановленных снегозапасов (мм)

Период	Снегозапасы				Погрешность
	Наблюдаемые		Восстановленные		
	среднее	Стандартное отклонение	среднее	Стандартное отклонение	
Ноябрь	38	15.428	10	14.641	0.74
Декабрь	71	21.823	32	28.505	0.55
Январь	182	26.515	61	43.690	0.66
Февраль	163	31.321	74	51.843	0.55
Ноябрь - февраль включительно	133	24.453	44	44.494	0.67

Многолетние изменения наблюдаемых и восстановленных снегозапасов также существенно различаются – в многоснежные месяцы вплоть до разного знака коэффициентов линейных трендов. Увеличение в процессе потепления осадков обуславливает стабильные наблюдаемые снегозапасы региона [6]. Но, многолетнее увеличение количества дней с положительными температурами и, соответственно, оттепелей, не могут не вызывать изменения структуры снежной толщи – увеличения от года к году количества льдистых включений. В результате, из-за погрешности измерений величина восстановленных снегозапасов снижается (табл. 2).

В разбросе значений восстановленных снегозапасов для всей совокупности данных интерес, тем не менее, могут представлять те значения, погрешность которых по отношению к наблюдаемым величинам не превышает 30 %, то есть если эти значения находятся примерно в границах стандартного отклонения [7]. Корреляция для значений восстановленных и наблюдаемых снегозапасов оказалась достаточно высокой (табл. 3).

Таблица 2. Многолетние изменения наблюдаемых и восстановленных снегозапасов

Период	Наблюдаемые		Восстановленные	
	Линейный тренд	* R ²	Линейный тренд	* R ²
Ноябрь	$y = -0.1336x + 311.31$	0.012	$y = -0.337x + 681.56$	0.218
Декабрь	$y = 0.1246x - 181.16$	0.005	$y = -0.785x + 157.48$	0.227
Январь	$y = 0.0658x - 20.521$	0.001	$y = -1.482x + 297.38$	0.331
Февраль	$y = 0.0529x + 28.233$	0.001	$y = -1.598x + 3266.2$	0.226
Ноябрь-февраль включительно	$y = 0.385x - 686.18$	0.049	$y = -1.319x + 2674.9$	0.384

* R² - коэффициент детерминации.

Таблица 3. Соотношение наблюдаемых и восстановленных значений снегозапасов

Диапазон погрешности восстановленных снегозапасов	Коэффициент корреляции	R ²	Стандартная ошибка корреляции
Меньше -0.30	0.895	0.799	25.59
-0.30 – -0.20	0.999	0.998	2.65
-0.20 – -0.10	0.999	0.998	2.12
-0.10 – -0.00	0.998	0.996	2.68
0.00 – 0.10	0.999	0.997	2.23
0.10 – 0.20	0.996	0.994	3.05
0.20 – 0.30	0.997	0.993	3.16
Больше 0.30	0.549	0.304	25.18

R² – коэффициент детерминации

Но, как выяснилось, пары значений с различными диапазонами погрешностей могут формироваться в сходных метеорологических условиях (табл. 4). В этом случае, тем

не менее, важно выявить метеорологические условия, при которых имеет место та или иная погрешность восстановленных данных. В частности, от температуры воздуха зависят изменения высоты и структуры снежной толщи [8], влияющие в свою очередь на взаимодействие снежного покрова с микроволновым излучением. Таким образом, изменчивость восстановленных по наблюдениям микроволнового излучения снегозапасов может быть увязана с изменением температуры.

Таблица 4. Погрешность восстановленных снегозапасов и характерные метеорологические условия

Погрешность	Метеорологические параметры					
	Температура воздуха, °C		Осадки, мм		Высота снежного покрова, см	
	Среднее	Станд. отклонение	Среднее	Станд. отклонение	Среднее	Станд. отклонение
Менее -0.30	-6.5	3.60	106	92.34	33	16.78
-0.30 – -0.20	-6.3	4.04	103	90.49	31	18.27
-0.20 – -0.10	-7.2	3.30	114	95.71	34	17.05
-0.10 – 0	-6.6	3.51	106	93.72	33	16.38
0 – 0.10	-6.5	4.30	129	82.47	33	17.37
0.10 – 0.20	-6.3	3.64	104	90.78	36	17.58
0.20 – 0.30	-6.5	4.02	94	81.26	41	19.69
Более 0.30	-4.3	4.48	80	83.28	42	27.77

Наиболее надежны регрессионные уравнения связи восстановленных и наблюдаемых значений снегозапасов для диапазонов с погрешностями -10% – +20%. Наименее надежны уравнения для значений с погрешностями более +30% и менее -30% (табл. 5).

Сравнивая восстановленные значения снегозапасов с температурой воздуха и получая регрессионные уравнения связи, близкие по соотношению характеристик регрессии к характеристикам, приведенным в таблице 5 (коэффициенты уравнений, коэффициенты детерминации и значения дисперсии), можно определить оптимальный диапазон возможной погрешности восстановленных данных снегозапасов – в данном случае для Восточно-Европейской равнины. С применением предлагаемого подхода к оценке репрезентативности спутниковой информации последняя теряет одно из своих существенных преимуществ – оперативность использования. Но, тем не менее, реализация этого подхода возможна для получения наиболее показательных для тех или иных задач спутниковых данных.

Таблица 5. Зависимость восстановленных значений снегозапасов (s, мм) от изменений приземной температуры воздуха (t, °C)

Погрешность дистанционных измерений снегозапасов	Уравнение регрессии	R ²	Дисперсия	
			факторная	остаточная
Менее -0.30	t = -9.269s + 28.103	0.449	421384.69	1812.93
-0.30 – -0.20	t = -8.459s + 39.823	0.352	37172.22	2226.43
-0.20 – -0.10	t = -9.888s + 23.478	0.419	53345.64	1512.99
-0.10 – 0.00	t = -7.821s - 38.817	0.439	39579.51	1043.56
0.00 – 0.10	t = -6.216s + 36.825	0.418	38456.78	1011.01
0.10 – 0.20	t = -5.126s + 41.171	0.275	33365.11	925.55
0.20 – 0.30	t = -5.839s + 35.483	0.410	48261.32	816.71
Более 0.30	t = -4.148s + 11.151	0.381	454318.22	583.24
-0.30 – 0.30	t = -6.594s + 37.254	0.346	237115.54	1195.87

R² – коэффициент детерминации

Выводы

Проведено сравнение наблюдаемых (данные 18-ти метеорологических станций) и восстановленных по космическим данным снегозапасов (база данных AE_DySno, AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids) для Восточно-Европейской равнины и Скандинавии (Россия, Финляндия, Норвегия). В связи с отсутствием режимных наблюдений запасов воды в снежном покрове в Финляндии и Норвегии разработан алгоритм пересчета высоты снежного покрова в водный эквивалент.

Средняя для региона погрешность восстановленных снегозапасов составляет 59 %, для отдельных месяцев – от 51 до 73 %, существенно превышая заявленную авторами модели восстановления данных среднюю ошибку в 25 %. Восстановленные данные занижают величину реальных снегозапасов ввиду недостаточной глубины проникновения микроволнового излучения в снежную толщу и в связи с наличием льдистых включений.

Снегозапасы региона практически не меняются в многолетнем аспекте, поскольку на фоне потепления увеличиваются осадки зимнего периода и, соответственно, снегозапасы. Многолетние изменения снегозапасов, оцененные по восстановленным данным, имеют отрицательный коэффициент линейного тренда ввиду многолетнего увеличения в течение зимнего периода количества дней с положительными температурами, – с увеличением количества оттепелей связано увеличение от года к году включений льда в снежную толщу и снижение восстановленных значений снегозапасов.

Рассчитаны погрешности восстановленных данных и определен их диапазон, оптимальный для использования данных – от -30% до +30%, равный практически стандартному отклонению. Корреляция восстановленных и наблюдаемых данных в соответствующем диапазоне значений высока – коэффициент 0.99. Проведена типизация восстановленных данных с погрешностью от -30% до +30% относительно температуры воздуха, получена систем уравнений зависимости этих данных от изменения температуры. Таким образом, предлагаемый подход делает возможным выделить наиболее информативные значения снегозапасов, восстановленных по спутниковым данным.

Литература

1. Носенко Г.А., Долгих Н. А, Носенко О.А. О возможности практической реализации существующих алгоритмов восстановления характеристик снежного покрова по данным микроволновых съемок из космоса для мониторинга водных ресурсов // Сборник научных статей “Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов”, под ред. Е.А. Лупяна. М.: Издательство “GRANP polygraph”. 2005. Том II. С.150-156.
2. Kelly R.E., Chang A.T., Leung Tsang, Foster, J.L. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm // IEEE Transactions on Geopscience and Remote sensing. 2003. Vol. 41. N 2. P. 52-61.
3. Кондратьев Х.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования. // Исследования Земли из космоса. 2004. № 7. С. 61–96.
4. Шарков Е.А. Пассивное микроволновое зондирование Земли: прошлое, настоящее и планы на будущее. // Сборник статей “Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса”. М.: Издательство “Полиграф сервис”. 2004. С. 70–80.
5. Chang A.T.C., J.L. Foster, D. Hall, A. Rango and B. Hartline. Snow water equivalence determination by microwave radiometry // Cold Regions Science and Technology. 1982 N 5.. P. 259-267.

6. *Kitaev L.M., Krenke A.N., Titkova T.B.* Climatic limits of snow storage increase over Northern Eurasia // *Ice and Climate News. Lundblad Media. Tromse, Norway.* 2005. N 6. P. 14-15.
7. *Китаев Л.М., Володичева Н.А., Олейников А.Д.* Особенности сроков залегания снежного покрова в условиях гор и предгорий (на примере Большого Кавказа) // *Криосфера Земли.* 2003. № 4. С. 82-89.
8. *Кислов А.В.* Связь границы снежного покрова на континентах с температурой и влажностью воздуха // *Метеорология и гидрология.* 1994. № 8. С. 52-56.

The analysis of snow storage character with the satellite information using

L.M. Kitaev

*Institute of Geography RAS, 109017, Staromonetny per., 29, Moscow, Russia,
E-mail: lkitaev@mail.ru*

The comparative analysis of the observed snow storage data and of the restored on the satellite ones over the East European plain and the Scandinavia is carried out. The range of errors for the restored data is estimated and their reasons are determined. Typification of errors for air temperature is fulfilled. The developed approach of an estimation of reliability of the restored data is suggested for selection of the representative satellite data for snow cover studies.

Keywords: snow storage, satellite information, observed and restored data, typification of errors.