

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.578.46(470.6)

ОЦЕНКА СНЕГОЗАПАСОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Л.М. Китаев, Т.Б. Титкова

Институт географии РАН, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия, lkitaev@mail.ru

Проведен сравнительный анализ наблюдаемых и восстановленных по спутниковым данным снегозапасов Восточно-Европейской равнины и Скандинавии. Выявлен диапазон погрешностей восстановленных данных и определены их причины. Проведена типизация погрешностей относительно приземной температуры воздуха. Разработанный способ оценки достоверности восстановленных данных предлагается использовать при отборе пригодной для исследований снегозапасов спутниковой информации.

Снегозапасы, спутниковая информация, наблюдаемые и восстановленные данные, типизация погрешностей

ESTIMATION OF SNOW STORAGE USING SATELLITE INFORMATION

L.M. Kitaev, T.B. Titkova

Institute of Geography, RAS, 109017, Staromonetnyi per., 29, Moscow, Russia, lkitaev@mail.ru

The comparative analysis was carried out for the data of the observed snow storage over the East European plain and Scandinavia and the data restored from satellites. 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 method for the estimation of reliability of the restored data is suggested to be used for the selection of the representative satellite data for snow cover studies.

Snow storage, satellite information, observed and restored data, typification of errors

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 этим оперативный мониторинг снегонакопления требует разработки специальных методов и технологий. Довольно длительное время оценку состояния снегозапасов пытаются осуществить посредством спутниковых наблюдений, в частности на основе измерения пассивного микроволнового излучения с помощью платформ MODIS SSMR и MODIS SSM/I.

Модели восстановления снегозапасов по данным дистанционных измерений, как правило, основаны на расчете разницы тех или иных частотных диапазонов микроволнового излучения в сочетании с коэффициентами, характеризующими особенности поверхности и в первую очередь состояние растительности. Несомненным преимуществом получаемой в результате информации (в сравнении с традиционными наземными данными) является 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) [Носенко и др., 2005; Kelly et al., 2003]. В результате в настоящее время разработан ряд моделей по восстановлению снегозапасов по спутниковым данным, но одновременно в ряде публикаций содержатся критические замечания по поводу возможностей использования этих моделей [Кондратьев, 2004; Шарков, 2004; Носенко и др., 2005].

Основная задача наших исследований состоит в определении метеорологических условий, при которых погрешность результатов восстановления снегозапасов 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 снегозапасов, 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 1978–2006 гг. 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 четыре месяца.

Модель восстановления водного эквивалента снегозапасов (S) основана на уравнении [Chang et al., 1982]:

$$S = 4,8(T18H - T37H),$$

где $T18H, T37H$ – радиояркостные температуры яркости [K] в каналах 18 и 37 ГГц на горизонтальной поляризации. Коэффициент 4,8 используется для учета свойств снежного покрова и характеризует плотность снежного покрова $0,30 \text{ г/см}^3$ и размер зерна $0,3 \text{ мм}$. 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 некоторого коэффициента f :

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

Авторы модели и соответствующих карт предполагают среднюю ошибку восстановленных снегозапасов в пределах $\pm 25 \%$. Проверка этого утверждения и оценка зависимости реальной ошибки от метеорологических условий проводились с использованием данных наземных наблюдений 14 метеорологических станций, из которых 6 расположены на территории России, 7 в Финляндии и 1 в Норвегии (см. рис. 1). Для этих станций бра-

Таблица 1. Зависимость величины снегозапасов (S_n , мм) от толщины снежного покрова (H_n , см)

Период	Уравнение	R	R^2
Ноябрь	$S_n = 2,6851H_n^{0,8751}$	0,844	0,712
Декабрь	$S_n = 2,1318H_n^{0,9946}$	0,924	0,854
Январь	$S_n = 2,7051H_n^{0,9478}$	0,948	0,898
Февраль	$S_n = 3,6272H_n^{0,8953}$	0,978	0,957
Ноябрь–февраль	$S_n = 1,9471H_n^{1,0512}$	0,958	0,917

Примечание. R – коэффициент регрессии; R^2 – коэффициент детерминации.

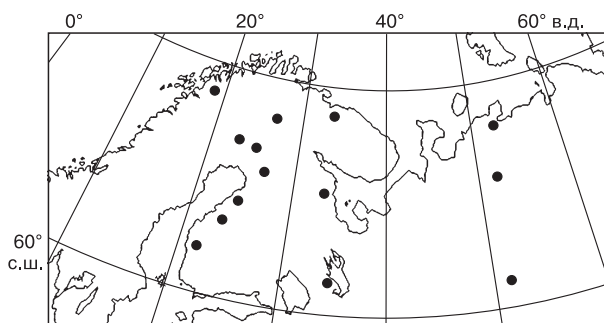


Рис. 1. Расположение метеорологических станций, данные которых использованы при исследовании.

лась толщина снежного покрова на последнюю дату ноября, декабря, января и февраля и рассчитывались 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 в качестве исходных данных ввиду отсутствия режимных наблюдений плотности снега и расчетов его водного эквивалента на территории Скандинавии. Но поскольку восстановленные по данным микроволнового излучения снегозапасы приводятся в значениях именно водного эквивалента, был выполнен соответствующий пересчет.

Удовлетворительный результат был получен при оценке зависимости водного эквивалента от толщины снега путем регрессионного анализа суточных значений. Для российских станций коэффициенты степенной регрессии увеличиваются с 0,844 в ноябре до 0,978 в феврале (табл. 1). Для максимального учета возможных вариаций нами использована зависимость изменчивости водного эквивалента от различных значений толщины снега, свойственных периоду с ноября по февраль включительно, с коэффициентом регрессии 0,958 (см. табл. 1, рис. 2). Проверка значимости регрес-

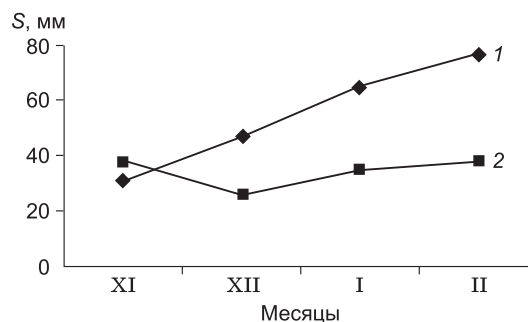


Рис. 2. Изменение наблюдаемых (1) и восстановленных (2) снегозапасов S по месяцам (по данным российских метеостанций).

сионного уравнения на независимых данных дополнительных станций (север Восточно-Европейской равнины) дала положительный результат.

Таким образом, для оценки точности восстановленных по результатам спутниковых наблюдений снеготазов использовались данные наблюдений метеорологических станций (см. рис. 1) и значения снеготазов по данным AE_DySno для ячеек 25×25 км с соответствующими метеорологическим станциям координатами.

ПОГРЕШНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СНЕГОТАЗОВ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для учета максимальной вариации погрешности восстановленных данных снеготазов использовалась вся совокупность значений – ежемесячно с ноября по февраль. Ошибка вычислялась по формуле

$$S_{\text{п}} = (S_{\text{н}} - S_{\text{в}}) / S_{\text{н}},$$

где $S_{\text{п}}$ – погрешность; $S_{\text{н}}$ – снеготазы по данным наземных наблюдений; $S_{\text{в}}$ – восстановленные данные.

Как уже упоминалось, авторы модели предположили среднюю ошибку восстановленных данных снеготазов в пределах $\pm 25\%$ [Chang et al., 1982]. Однако для исследуемого региона погрешность отдельных месяцев лежит в диапазоне 55–74%, а погрешность всего периода (ноябрь–февраль) составляет 67% (табл. 2). С увеличением снежности растет и стандартное отклонение: от ноября к февралю в 2 раза для наблюдаемых снеготазов и в 3,5 раза для восстановленных. Такое занижение реальных снеготазов по сравнению с восстановленными данными связано с ограниченной глубиной проникновения микроволнового излучения, с одной стороны, и наличием льдистых включений, образовавшихся вследствие оттепелей, – с другой. Сходство наблюдаемых и восстановленных значений отмечается лишь в направленности их изменчивости от месяца к месяцу (рис. 3, 4).

Многолетние изменения наблюдаемых и восстановленных снеготазов также существенно

Таблица 2. Средние значения наблюдаемых и восстановленных снеготазов (мм)

Период	Снеготазы				Погрешность
	наблюдаемые		восстановленные		
	Среднее	Станд. отклонение	Среднее	Станд. 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	133	24,453	44	44,494	0,67

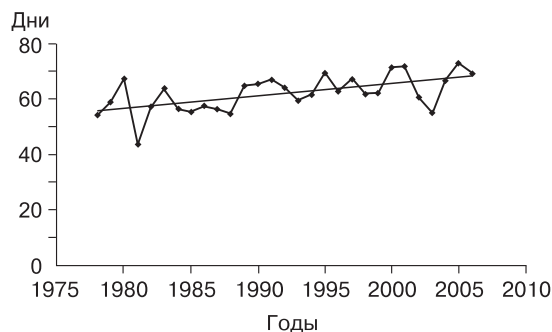


Рис. 3. Многолетнее изменение количества дней с положительными температурами воздуха с ноября по февраль.

Коэффициент линейного тренда равен 0,438, коэффициент детерминации $R^2 = 0,32$.

различаются – в многоснежные месяцы вплоть до разного знака коэффициентов линейных трендов (табл. 3). Рост количества осадков в процессе потепления обуславливает стабильные наблюдаемые снеготазы региона [Kitaev et al., 2005]. Но многолетнее увеличение количества дней с положительными температурами и соответственно оттепелей не могут не вызывать изменений структуры снежной толщи – увеличения от года к году количества льдистых включений. В результате величина восстановленных снеготазов снижается (см. табл. 3).

В разбросе значений восстановленных снеготазов для всей совокупности данных интерес, тем не менее, могут представлять значения, погрешность которых по отношению к наблюдаемым величинам не превышает 30%, т.е. эти значения находятся примерно в пределах стандартного отклонения [Kitaev и др., 2003]. Корреляция для соответствующих значений восстановленных и наблюдаемых данных оказалась высокой (табл. 4). Но, как выяснилось, пары значений с различными диапазонами погрешностей могут формироваться в сходных метеорологических условиях (табл. 5). В этом случае важно выявить метеорологические условия, при которых имеет место та или иная по-

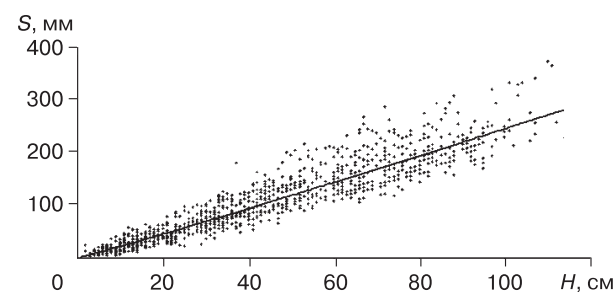


Рис. 4. Зависимость запасов воды в снежном покрове S от его толщины H .

Таблица 3. Многолетние изменения наблюдаемых и восстановленных снегозапасов

Период	Наблюдаемые снегозапасы		Восстановленные снегозапасы	
	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	$y = 0,385x - 686,18$	0,049	$y = -1,319x + 2674,9$	0,384

Таблица 4. Соотношение наблюдаемых и восстановленных значений снегозапасов

Погрешность восстановленных снегозапасов	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Стандартная ошибка корреляции
< -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
>0,30	0,549	0,304	25,18

Таблица 5. Погрешность восстановленных снегозапасов и характерные метеорологические условия

Погрешность	Температура воздуха, °С		Осадки, мм		Высота снежного покрова, см	
	Среднее	Станд. отклонение	Среднее	Станд. отклонение	Среднее	Станд. отклонение
< -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...-0,00	-6,6	3,51	106	93,72	33	16,38
0,00...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
>0,30	-4,3	4,48	80	83,28	42	27,77

Таблица 6. Зависимость восстановленных значений снегозапасов (s , мм) от изменений приземной температуры воздуха (t , °С)

Погрешность дистанционных измерений снегозапасов	Уравнение регрессии	R^2	Дисперсия	
			факторная	остаточная
< -0,30	$t = -9,269s + 28,103$	0,449	421 384,69	1812,93
-0,30...-0,20	$t = -8,459s + 39,823$	0,352	37 172,22	2226,43
-0,20...-0,10	$t = -9,888s + 23,478$	0,419	53 345,64	1512,99
-0,10...-0,00	$t = -7,821s - 38,817$	0,439	39 579,51	1043,56
0,00...0,10	$t = -6,216s + 36,825$	0,418	38 456,78	1011,01
0,10...0,20	$t = -5,126s + 41,171$	0,275	33 365,11	925,55
0,20...0,30	$t = -5,839s + 35,483$	0,410	48 261,32	816,71
>0,30	$t = -4,148s + 11,151$	0,381	454 318,22	583,24
-0,30...0,30	$t = -6,594s + 37,254$	0,346	237 115,54	1195,87

грешность восстановленных данных. В частности, от температуры воздуха зависят изменения высоты и структуры снежной толщи [Кислов, 1994], в свою очередь влияющие на взаимодействие снежного покрова с микроволновым излучением. Таким образом, изменчивость восстановленных по наблюдениям микроволнового излучения снеготолщевых запасов может быть увязана с изменением температуры.

Наиболее надежны регрессионные уравнения связи восстановленных и наблюдаемых значений снеготолщевых запасов для диапазонов с погрешностями $-10...+20\%$, наименее надежны – с погрешностями более $+30\%$ и менее -30% (табл. 6). Сравнивая восстановленные значения снеготолщевых запасов с температурой воздуха и получая регрессионные уравнения связи, близкие по соотношению характеристик регрессии к характеристикам, приведенным в табл. 6 (коэффициенты уравнений, коэффициенты детерминации и значения дисперсии), можно определить оптимальный диапазон возможной погрешности восстановленных данных снеготолщевых запасов, в данном случае для Восточно-Европейской равнины. С применением предлагаемого подхода к оценке репрезентативности спутниковой информации последняя теряет одно из существенных преимуществ – оперативность использования. Тем не менее реализация этого подхода возможна для получения наиболее показательных для тех или иных задач спутниковых данных.

ВЫВОДЫ

Проведено сравнение наблюдаемых (данные 14 метеорологических станций) и восстановленных по космическим данным снеготолщевых запасов (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 и наблюдаемых снеготолщевых запасов составляет 59% , для отдельных месяцев – от 51 до 73% , существенно превышая заявленную авторами модели восстановления данных среднюю ошибку 25% . Восстановленные данные занижают величину реальных снеготолщевых запасов ввиду недостаточной глубины проникновения микроволнового излучения в снежную толщу и в связи с наличием льдистых включений.

Снеготолщевые запасы региона практически не меняются в многолетнем аспекте, поскольку на фоне потепления растет количество осадков зимнего периода и соответственно увеличиваются запасы

воды в снеге. Многолетние изменения снеготолщевых запасов, оцененные по восстановленным данным, имеют отрицательный коэффициент линейного тренда вследствие многолетнего увеличения в течение зимнего периода количества дней с положительными температурами. С увеличением количества оттепелей связано возрастание от года к году включений льда в снежную толщу и снижение восстановленных значений снеготолщевых запасов.

Рассчитаны погрешности восстановленных данных и определен их диапазон, оптимальный для использования данных (от -30 до $+30\%$), практически равный стандартному отклонению. Корреляция восстановленных и наблюдаемых данных в соответствующем диапазоне значений высокая – коэффициент $0,99$. Проведена типизация восстановленных данных с погрешностью $-30...+30\%$ относительно температуры воздуха, получена система уравнений зависимости этих данных от изменения температуры. Таким образом, предлагаемый подход делает возможным выделение наиболее информативных значений снеготолщевых запасов, восстановленных по спутниковым данным.

Литература

- Кислов А.В.** Связь границы снежного покрова на континентах с температурой и влажностью воздуха // *Метеорология и гидрология*, 1994, № 8, с. 52–56.
- 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, т. VII, № 4, с. 82–89.
- Кондратьев Х.Я.** Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // *Исследования Земли из космоса*, 2004, вып. 2, № 7, с. 61–96.
- 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 // *Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов*: Сб. / Под ред. Е.А. Лупяна. М., Изд-во "GRANP polygraph", 2005, т. II, с. 150–156.
- Шарков Е.А.** Пассивное микроволновое зондирование Земли: прошлое, настоящее и планы на будущее // *Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса*: Сб. М., Полиграф сервис, 2004, с. 70–80.
- Chang A.T.C., Foster J.L., Hall D. et al.** Snow water equivalence determination by microwave radiometry // *Cold Regions Sci. and Technol.*, 1982, No. 5, p. 259–267.
- Kelly R.E., Chang A.T., Leung Tsang, Foster J.L.** A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 2003, vol. 41, No. 2, p. 52–61.
- Kitaev L.M., Krenke A.N., Titkova T.B.** Climatic limits of snow storage increase over Northern Eurasia // *Ice and Climate News*, 2005, No. 6, p. 14–15.

Поступила в редакцию
22 апреля 2009 г.