

Исследование статистической значимости алгоритмов восстановления влагозапаса снега.

К.А. Березин¹, А.В. Дмитриев², В.В. Дмитриев¹

Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия

¹*E-mail: vdmitriev@omgpu.ru*

²*E-mail: ftsoft@yandex.ru*

В работе рассмотрены вопросы дистанционного зондирования снежного покрова. Исследованы алгоритмы восстановления водного эквивалента снега (SWE) по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Для проверки работоспособности алгоритмов восстановления SWE в наземном эксперименте определены физико-механические параметры снежного покрова. Измерения выполнены в регионе Западной Сибири в течение зимних сезонов 2008-2013 гг. Измерения проводились на четырех тестовых площадках с интервалом в 7-10 суток. Затем, при камеральной обработке, были определены сезонные зависимости SWE, плотности и высоты снежного покрова. В качестве спутниковых данных использованы результаты измерений радиояркостной температуры земной поверхности в микроволновом диапазоне, полученные с радиометров AMSR-E (спутник Aqua) и AMSU (спутник NOAA-15). Исследование работоспособности алгоритмов восстановления SWE проводилось путем сравнения модельных результатов с данными наземных измерений. Всего были проверены четыре алгоритма. Определены два алгоритма восстановления влагозапаса, которые лучше всего соответствуют наземным данным. Первый алгоритм использует данные в диапазонах 31 и 89 ГГц. Второй алгоритм использует данные трех частот: 23, 31 и 89 ГГц. Затем была выполнена оценка статистической значимости алгоритмов восстановления SWE по данным спутниковой радиометрии СВЧ диапазона. Для этого была исследована зависимость относительной погрешности от величины статистической выборки. Было выяснено, что для наземных данных предельное минимальное значение относительной погрешности составляет 15-16 %. Для алгоритмов восстановления SWE минимальная относительная погрешность составляет 32 % (первый) и 18 % (второй).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, снежный покров, влагозапас, алгоритм восстановления, статистическая значимость.

Введение

Снег является естественным природным образованием и оказывает существенное воздействие на климат, условия жизни и хозяйственную деятельность человека. Современный уровень развития техники и технологий, а также высокая энерговооруженность позволяют развитым странам довольно успешно вести хозяйственную деятельность в заснеженных регионах. Однако коммерческая успешность не отменяет трудностей и проблем, связанных как с самим наличием снежного покрова, так и с геоботаническими особенностями заснеженных территорий (Снег, 1986). Этим определяется актуальность и практическая значимость задачи по поиску алгоритмов и построению системы мониторинга параметров снежного покрова с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). На сегодняшний день основным поставщиком данных ДЗЗ являются спутниковые системы. В нашей работе изложены результаты исследований с использованием данных пассивной спутниковой радиометрии СВЧ диапазона. Конкретно использованы данные, полученные радиометрами AMSR- E и AMSU, которые установлены на

спутниковых платформах AQUA и NOAA-15 соответственно. Выбор радиометра определен исходя из необходимого диапазона частот: от 15 до 100 ГГц.

Данная работа непосредственно посвящена исследованию статистической значимости алгоритмов оценки влагозапаса (SWE – snow water equivalent) снежного покрова. На сегодняшний день известны несколько алгоритмов оценки SWE снежного покрова. В данной работе анализ по зимнему сезону 2008-2009 года проводился с использованием данных AMSU-A и AMSR-E, аналогичное исследование по зимним сезонам 2011-2012 и 2012-2013 годов проводилось с использованием данных AMSU-A на частотах 23, 31 и 89 ГГц. В качестве источника наземных данных использовались результаты собственных измерений временной и пространственной динамики высоты, плотности, влажности и SWE снежного покрова в окрестностях г. Омска в период снеготаяния, а также агрометеосводки по Омской области за 2009-2013 гг (Агрометеорологический бюллетень, 2012).

Конечной целью работы являлась оценка статистической значимости используемых наземных и спутниковых данных и алгоритмов обработки данных спутниковой радиометрии. Экспериментально и путем статистического моделирования исследованы зависимости средней относительной погрешности от величины измерительной выборки. Основываясь на этих результатах, предложены критерии выбора величины репрезентативной выборки с точки зрения временного и пространственного усреднения.

1. Наземный эксперимент и его результаты

С целью прямых и систематических измерений параметров снежного покрова были выбраны снегомерные полигоны, координаты которых приведены в *табл. 1*. Выбор точек снегомерной съемки удовлетворял следующим условиям:

- снегомерные полигоны разнесены в пространстве на расстояния более 5 км;
- снегомерные полигоны находятся на открытых площадках, вдали от парковых насаждений и лесных массивов, а также транспортных магистралей;
- снегомерные полигоны имеют плоский рельеф, минимальный размер измерительной площадки более 150 м в поперечнике.

В каждой пространственной точке и в каждый временной момент отбирались 5 проб, результаты измерений по ним затем усреднялись. Для взятия проб снега использовался отборник в виде цилиндра постоянного сечения. Параметры снежного покрова, измеряемые в наземном эксперименте и его камеральной обработке:

- масса снежного образца;
- высота снежного покрова;

- плотность снежного покрова;
- SWE снежного покрова.

Таблица 1. Координаты точек снегомерной съемки

№	Полное название	Обозначение	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)
1	Аграрный университет	PNT1	55,023863	73,327574
2	ЦПКиО	PNT2	54,970967	73,421301
3	Парк Победы	PNT3	54,964844	73,364653
4	мкрн. Московка	PNT4	54,891295	73,404135

Влагозапас или водный эквивалент снега, представляет собой толщину слоя воды (м или см), образующейся при растапливании исходного количества снега. Благодаря близости плотностей льда и воды на практике влагозапас определяется:

$$W = m / (S \cdot \rho),$$

где W – влагозапас снега (м), m – масса пробы снега (кг), S – площадь отбора пробы снега (m^2), ρ – плотность льда или воды – $1000 \text{ кг}/m^3$. W связан с толщиной снежного покрова – h и его средней плотностью – $\rho_{\text{ср}}$:

$$W = h \cdot \rho_{\text{ср}} / \rho.$$

На *рис. 1* приведены временные (сезонные – за зиму 2012-2013 гг.) зависимости плотности и SWE снежного покрова во всех четырех точках.

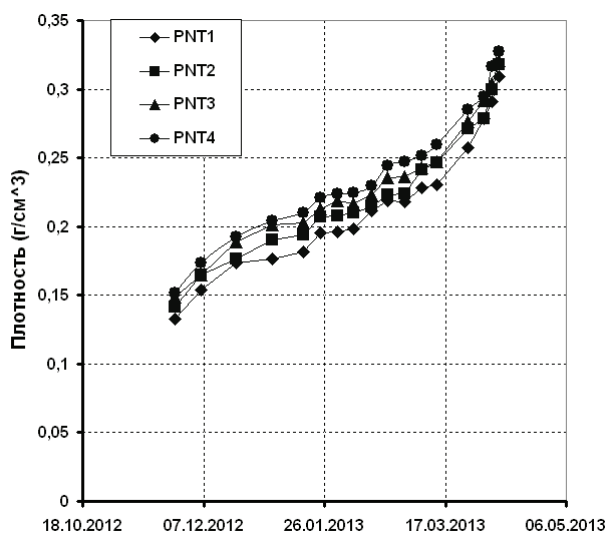


Рис. 1а. Сезонная динамика средней плотности снежного покрова

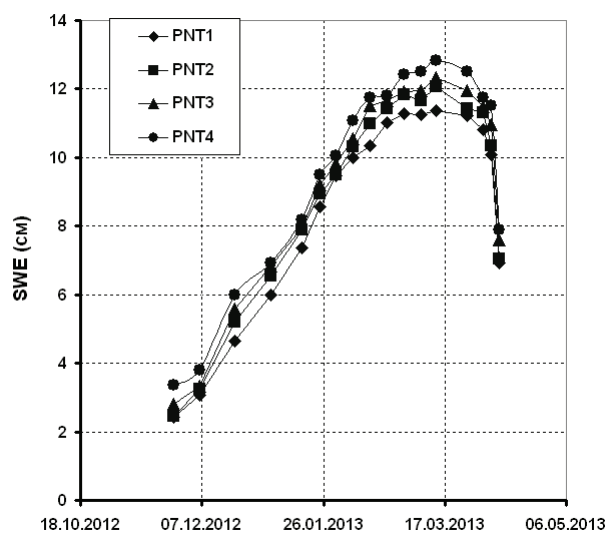


Рис. 1б. Сезонная динамика влагозапаса снежного покрова

Из анализа результатов, приведенных на *рис. 1*, следует идентичность сезонных зависимостей в разных наземных точках, что определяется равнинным характером Западной

Сибири. Это подтверждается и стандартными критериями математической статистики: «разброс» кривых составляет $3,2 \sigma$ при уровне значимости 95 %. На зависимостях отслеживается процесс накопления снежной массы в течение зимнего сезона и момент начала таяния – 07 апреля 2013 г. (рост плотности, уменьшение SWE). Полученные наземные данные были использованы при оценке статистической значимости алгоритмов восстановления SWE по данным спутниковой радиометрии.

2. Исследование алгоритмов восстановления SWE по спутниковым данным

В настоящее время в практике ДЗЗ для оценки SWE используются «двухчастотные» алгоритмы, физическая основа которых сводится к следующим положениям.

- Используется разность яркостной температуры на двух частотах СВЧ диапазона.
- Одна из частот (более низкая в паре) практически не «чувствительна» к наличию снега, а вторая (более высокая) – наоборот, испытывает влияние снежной среды.
- В результате с увеличением массы льда (SWE) происходит увеличение различия яркостных температур на двух частотах. Идеологически это соответствует коэффициенту NDVI или NDSI.

Далее изложены результаты за зимы 2011-12 и 2012-13 гг., поэтому использованы данные радиометра AMSU. Для данных AMSU используются три алгоритма восстановления SWE (Pulliainen, Grendell, Hallikainen, 1999):

- возраст снега более 2-х недель:
 $SWE_1 = 0,60 \cdot (TB_{23} - TB_{31}) + 1,71;$
- возраст несколько суток:
 $SWE_2 = 0,08 \cdot (TB_{31} - TB_{89}) + 1,15;$
- возраст несколько часов:
 $SWE_3 = 2,6 + 0,39 \cdot (TB_{23} - TB_{31}),$

где TB_{23} , TB_{31} и TB_{89} – радиояркостные температуры на соответствующих частотах (ГГц).

Сравнение результатов наземных измерений SWE с результатами расчетов по приведенным выше алгоритмам показало, что наилучшее совпадение получается при использовании выражения SWE_2 , т.е. для неметаморфизированного снежного покрова возрастом несколько суток. На *рис. 2а* приведены результаты сравнения истинных и восстановленных значений SWE для зимы 2011-12 гг. Не смотря на хорошую сходимость в среднем, корреляционная зависимость, тем не менее, характеризуется сильным «разбросом» отдельных точек.

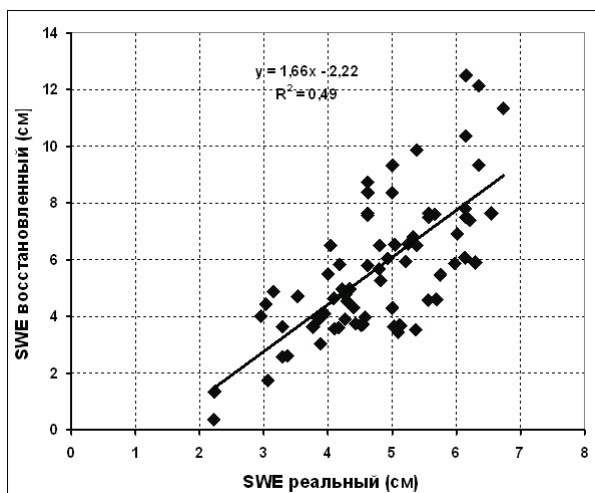


Рис. 2а. Сравнение истинных и восстановленных значений SWE2 за зимний сезон 2011-12 гг.

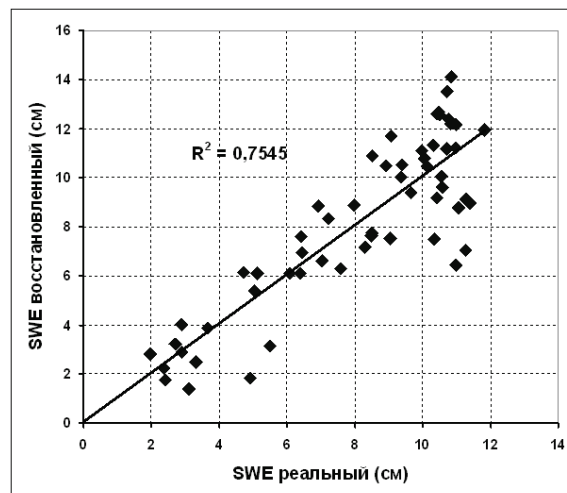


Рис. 2б. Сравнение истинных и восстановленных значений SWE4 за зимний сезон 2011-12 гг.

При совместной обработке результатов наземных и спутниковых измерений был отмечен рост статистической значимости (коэффициента корреляции) результатов с ростом числа измерений. Причина этого очевидна – асимптотическое приближение выборочного среднего к истинному среднему при увеличении размера выборки, что является статистическим обоснованием принципиальной возможности создания алгоритма восстановления SWE по спутниковым данным. Более подробно этот результат проанализирован в третьей части нашей работы.

Улучшения ситуации удалось добиться для «трехчастотного» алгоритма (с использованием радиояркостных температур на трех частотах: 21, 31 и 89 ГГц). Было использовано следующее выражение

$$SWE4 = 1,17 + 0,23 * (T31+T89) - 0,46 * T23.$$

На рис. 2б приведены результаты сравнения истинных и восстановленных значений SWE4 для зимы 2012-13 гг. Несмотря на лучшие показатели (значение коэффициента корреляции, совпадение с биссектрисой) рис. 2б также характеризуется значительным «разбросом» отдельных точек.

Результаты сравнения измеренных и восстановленных значений SWE позволяют, в принципе, определить лучший количественный алгоритм, но только в среднем, для всей совокупности точек. Имея в виду практическое применение ДЗЗ, важно научиться оценивать SWE в конкретной наземной точке и для конкретной даты. Для решения этой задачи необходимо сначала более строго оценить статистическую значимость исходных данных и полученных результатов. В этом направлении было предпринято специальное исследование, результаты которого изложены далее.

3. Исследование статистической значимости исходных данных и результатов использования различных алгоритмов восстановления SWE

В результате сравнения истинных значений SWE с восстановленными был установлен факт зависимости характеристик выборки от ее величины. Для количественной оценки этой зависимости была выдвинута следующая гипотеза: *при соблюдении условия постоянства места измерения, а также методики измерений и расчетов относительная (не абсолютная!) погрешность результатов наземных измерений и результатов восстановления SWE образуют однородную выборку, которая характеризуется нормальным распределением.*

Опираясь на это предположение, оказалось возможным оценить среднее значение относительной погрешности в зависимости от длины выборки. В тех случаях, когда размер пробной выборки - n был меньше размера полной совокупности – N , использовался многократный случайный выбор n случаев из N возможных с последующим усреднением.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что существующий «разброс» между экспериментальными и теоретическими точками определяется двумя факторами. Первый – естественная вариабельность характеристик природной среды, второй – ошибки, вносимые используемым алгоритмом восстановления SWE. Для оценки первого фактора была исследована зависимость относительной погрешности наземных измерений SWE от величины выборки. Результаты приведены на *рис. 3.*

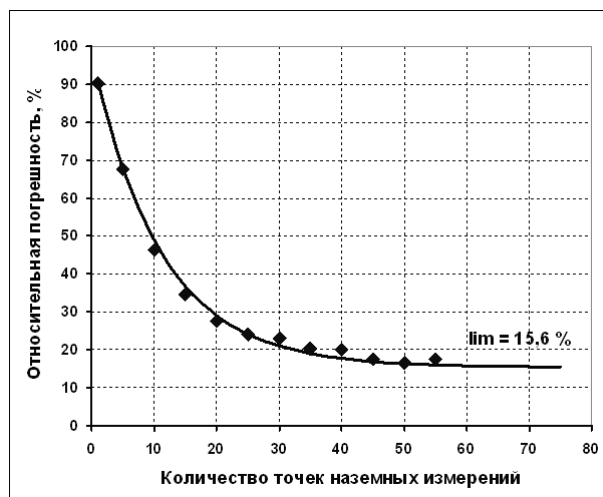


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности от величины выборки для наземных измерений SWE

Полученная зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, что подтверждает нормальность распределения. Существенным оказывается наличие асимптотики на уровне 16 %. Причиной существования данной асимптотики является

уже упомянутая естественная вариабельность характеристик снежного покрова на почве и собственно почвы. Очевидно, что само наличие этой асимптотики определяет верхнюю границу точности для всех мыслимых алгоритмов восстановления свойств снежного покрова. Не исключено, что конкретное значение асимптотического предела зависит от местности, типа снега и других факторов, но само наличие такого предела представляется совершенно естественным. Исследование устойчивости асимптотического предела планируется на следующие зимние сезоны.

Вторым шагом было аналогичное исследование для относительных погрешностей восстановления SWE в случае двух и трех частотных алгоритмов (SWE2 и SWE4). На рис. 4 приведены зависимости средней относительной погрешности от величины выборки для этих двух выражений.

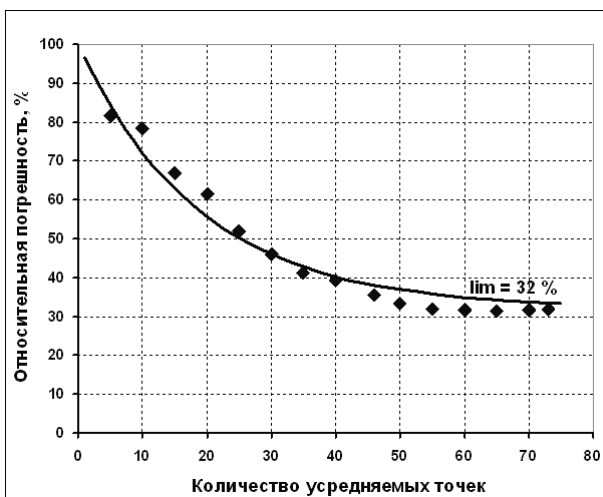


Рис. 4а. Зависимость относительной погрешности от величины выборки для алгоритма SWE2

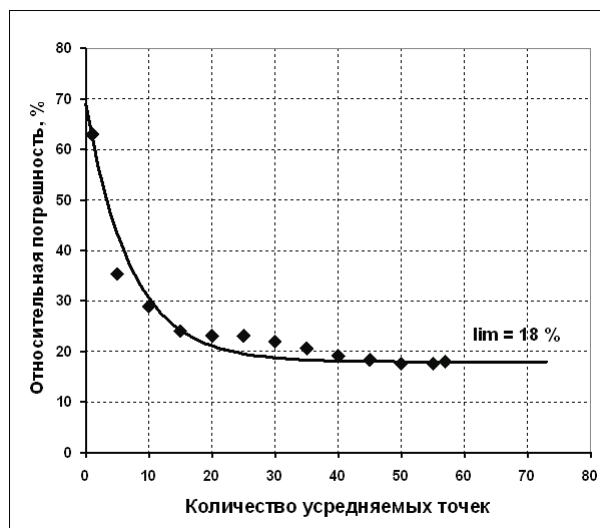


Рис. 4б. Зависимость относительной погрешности от величины выборки для алгоритма SWE4

Сравнение этих зависимостей показывает, что «двухчастотный» алгоритм SWE2 асимптотически увеличивает погрешность в два раза по сравнению с «естественным» уровнем. «Трехчастотный» алгоритм SWE4 имеет практически аналогичный «естественному» уровень относительной погрешности. К тому же скорость «сходимости» результатов во втором случае выше, следовательно, потребуется меньше пространственных или временных точек, следовательно, будет обеспечено лучшее пространственное или временное разрешение. Таким образом, алгоритм, использующий для восстановления SWE данные на трех частотах радиометра AMSU, является более предпочтительным.

Полученные результаты можно свести к следующим пунктам.

1. Существующие алгоритмы оценки SWE, использующие измерения СВЧ радиометров, требуют проверки на данных конкретного региона. В случае степных районов Западной Сибири наибольшую точность дает алгоритм, разработанный для не метаморфизированного снега, возрастом несколько суток, использующий три частоты радиометра AMSU.

2. Алгоритмы оценки SWE имеют корреляционный характер и нуждаются в усреднении используемых данных. Для стабильных статистически обоснованных оценок необходимо усреднение до 40 радиометрических пикселей (выражение SWE2) или 6-8 радиометрических пикселей (выражение SWE4). Это соответствует пространственному усреднению до элемента порядка 304x304 кв.км и 136x136 кв.км., соответственно, или временному усреднению до 20 и 4 суток, соответственно.

3. Статистическое исследование относительных погрешностей показало, что естественная вариабельность для наземных измерений составляет минимум 15-20 %, для алгоритмов восстановления ВЗ снега 15-35%. Видимо, эти числа следует считать нижней границей относительных погрешностей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-05-98082.

Литература

1. Агрометеорологический бюллетень. №№ 1-3 и 11-12 [текст]: за январь – март и ноябрь – декабрь 2012г. (по оперативным данным) // Омск. ЦГМС-Р. Омск: [б.и.], 2012. 15 с.
2. Снег. Справочник. Под ред. Д.М.Грея и Д.Х.Мейла. Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 752 с.
3. Pulliainen T., Grendell J., Hallikainen M.T. HUT Snow Emission Model and its Applicability to SWE Retrieval // IEEE Transactions On Geosciences And Remote Sensing. 1999. V. 37. № 3.

Investigation of the statistical importance of restoration algorithms of a snow water equivalent

К.А. Beresin¹, А.В. Dmitriev², V.V. Dmitriev¹

Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia

¹*E-mail: vdmitriev@omgpu.ru*

²*E-mail: ftsoft@yandex.ru*

The paper presents some issues of remote sensing of snow cover. Some algorithms of snow-water equivalent (SWE) recovering based on microwave radiometry were investigated. Physical-mechanical parameters of snow cover were measured to test the SWE recover algorithms efficiency. Measurements were taken in West Siberian region during winter seasons of 2008-2013. Measurements were conducted at four test sites at time intervals of 7-10 days. At later office processing, seasonal variations of SWE, snow density and depth were measured. Satellite data used were surface brightness temperature measured in microwave range by AMSR-E (AQUA satellite) and AMSU (satellite NOAA-15) radiometers. The study of SWE recover algorithms efficiency was conducted by comparing model values with ground-based measurements. Four algorithms were investigated. Two algorithms were identified as better matches for ground data. The first algorithm uses data of 31 and 89 GHz. The second one uses data of 3 frequencies:

23, 31 and 89 GHz. At the next step, the statistical significance of satellite data of SWE recover algorithms was estimated. For this purpose we investigated the dependence of relative error on sample size. It was found out, that minimal relative error was 15-16% for ground data. the SWE recover algorithms showed minimal relative error of 32% (first algorithm) and 18% (second one).

Keywords: remote sensing, snow cover, snow water equivalent, algorithm of restoration, statistical importance.

References

1. *Agrometeorologicheskij bjulleten'. Operativnye dannye* (Agro meteorological bulletin. Operational data). No. 1-3, 11, 12. Omsk. CGMS-R. Omsk. 2012. 16 p.
2. *Sneg. Spravochnik* (Handbook of Snow), Edited by Gray D.M. and Male D.H., Leningrad, 1986, Gidrometeoizdat, 752 p.
3. Pulliainen T., Grendell J., Hallikainen M.T. HUT Snow Emission Model and its Applicability to SWE Retrieval, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, May 1999, Vol. 37, No. 3.