# Снежный покров Европейской части России в микроволновом диапазоне (AMSR-E и SSM/I)

О.А. Hoceнкo<sup>1</sup>, Г.А. Hoceнкo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-технологический центр космического мониторинга Земли, филиал РНИИ КП 117997 Москва, Профсоюзная, 84/32 E-mail: <u>nosenko@cpi.space.ru</u> <sup>2</sup> Институт географии РАН 109017 Москва, Старомонетный пер., 29 E-mail: <u>gnosenko@mail.ru</u>

Данная работа является продолжением исследования поведения радиояркостных температур при сезонном изменении снежного покрова Европейской части России. Для субполярных и полярных районов Урала проведена валидация ежедневных карт водного эквивалента AE\_DySno (AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids) за 2004-2006 г.г., а также осуществлен анализ изменения разности на 19Ггц и 37Ггц по данным SSM/I за период 2002-2006 г.г. для тех же участков. Выявлены особенности в поведении радиояркостных температур и их разности для различных типов ландшафтов. Для валидации использовались данные метеостанций и наземные маршрутные измерения. В безлесных полярных районах Урала наиболее существенные изменения яркостных температур и их разности на 19Ггц и 37Ггц происходят скачкообразно в первый месяц зимы и составляют не менее 70% от общего диапазона изменения. В холодный период зимы температуры мало меняются, несмотря на постоянное увеличение водного эквивалента. В таежной зоне во все рассмотренные зимы наблюдается более значимое увеличение температур и их разности, однако характер изменения также отличается от коэффициентов корреляции, заложенных в модели.

## Введение

Мировая история изучения возможности использования микроволновых данных для восстановления количественных характеристик снега основана на предположении, что с увеличением количества снега растет рассеяние и, следовательно, должны падать яркостные температуры. Изменение яркостных температур в течение зимы обусловлено многими факторами, из которых два являются основными: 1) появление и рост высоты снежного покрова на поверхности земли; 2) ход наземной температуры.

Следовательно, если минимизировать влияние хода наземной температуры за счет использования поляризационных и канальных разностей яркостных температур, то из поведения разностей можно извлечь информацию о снеге.

Факторами второго порядка является слабое излучение самого снега, его метаморфизм в течение зимы и кратковременные атмосферные флюктуации, например, зоны осадков.

Наиболее адекватно эти предположения должны работать для сухого холодного снега на безлесных территориях. Наличие леса мешает интерпретировать сигнал за счет дополнительного рассеяния в кронах деревьев и требует введения коэффициентов, компенсирующих плотность леса. Поэтому тундровые ландшафты Полярного Урала в условиях холодной зимы представляются наиболее подходящими для проверки работоспособности используемой в настоящее время модели.

#### Общие положения, используемые модели

Интерпретация данных AMSR- Е ведется в настоящий момент в рамках модели Альфреда Чанга. Используются разности в каналах 36(37) Ггц и 18(19) Ггц на горизонтальной поляризации. Утверждается, что снежный покров обладает отрицательным спектральным градиентом, отличающим снег почти от всех прочих объектов, что позволяет идентифицировать появление снега на поверхности земли и определять его количественные характеристики. Отрицательный спектральный градиент – это более быстрое изменение яркостных температур в высокочастотных каналах по сравнению с низкочастотными. Это означает, что с ростом высоты снежного покрова температура на 37Ггц меняется сильнее, чем на 19Ггц, в результате чего при появлении снега на земле значение разности 19Н-37Н делается положительным и должно увеличиваться в течение зимы.

Цель данной работы - анализ возможности использования космической съемки в микроволновом диапазоне для восстановления водного эквивалента сезонного снежного покрова. Для этого были использованы данные SSM/I и карты водного эквивалента, которые ежедневно строятся в NSIDC по данным AMSR-Е применительно к центральным и полярным районам Европейской части России. В рамках этой деятельности были разработаны собственные геоинформационные методы, позволяющие осуществлять анализ пространственно-временной изменчивости микроволновых данных для выбранных тестовых территорий.

#### Методика валидации и результаты анализа

В результате пространственно-временного анализа за несколько лет нами выявлены типичные варианты поведения вышеупомянутой разности (и, соответственно, связанного с ней линейно водного эквивалента) для центра Европейской части России. На этой территории в течение зимы обычно наблюдается несколько оттепелей, сопровождающихся жидкими осадками в виде дождя, мороси. В микроволновом диапазоне каждая такая оттепель приводит к падению разности до отрицательных значений в момент таяния снега и ее резкому увеличению при последующем замерзании вследствие образования плотной корки на поверхности снега, причем скачок разности не связан с резким увеличением водного эквивалента на земле. Вопреки предположениям, заложенным в модель, в безлесных районах после оттепели часто наблюдается полное прекращение изменения разности [1].



Рис. 1. Типовая схема поведения модели для степных районов в центре Европейской части России

На рис.1 показана условная типовая схема изменения восстановленного по разности SSM/I SWE в течение зимы для лесостепных районов (площадь леса около 5%-10%) при наличии оттепелей (10 и 25 день), сопровождающихся дождем [2]. Абсолютное значение разности для лесных территорий меньше из-за дополнительного рассеяния в кронах. В то же время, корки имеют меньшую толщину и оказывают не такое сильное влияние на излучение, поэтому изменение восстановленных значений водного эквивалента для лесных территорий в течение зимы более значимо по сравнению с безлесной территорией. То есть к числу факторов первого порядка, оказывающих решающее влияние на величину яркостных температур, следует отнести еще один, третий по счету пункт:

3) резкий метаморфизм снега с образованием корки на поверхности в результате оттепели.

Результаты, полученные нами при валидации карт и модели для степных районов с "теплой" зимой, потребовали проверки карт водного эквивалента и, соответственно, заложенной в них модели, для безлесных территорий в других ландшафтных и климатических зонах. Мы выбрали территорию с холодной зимой (без оттепелей в течение холодного периода), включающую тундру в районе г. Воркута и (для сравнения) таежный участок в районе г. Печора. Было проведено инструментальное наземное обследование выбранных участков как в зимний (с проведением наземных измерений SWE), так и в теплый период года и проанализировано поведение соответствующей разности SSM/I и восстановленных значений водного эквивалента AMSR-E.



a)



б)



в)

Рис. 2. Изменение радиояркостных температур в пикселе с метеостанцией Воркута в каналах 19h, 19v и 37h для нисходящих витков SSM/I (F13): a) - зима 2003-2004 г.г.; б) – зима 2004-2005 г.г.; в) – зима 2005-2006 гг.

Ниже приведены графики изменения радиояркостных температур в течение зимы для пиксела SSM/I, где находятся метеостанции Воркута и Елецкая, для трех последних лет (рис.2 а-в). Видно, что наиболее значительные изменения температур (около 20-30 °K) происходят в начальный период зимы – период выпадения первого снега, чаще всего по времени между 280 и 310 днями года, то есть с 15 октября по 5 ноября. Резкие скачкообразные изменения яркостных температур связаны с оттепелями и дождем в этот период. В дальнейшем, после установления отрицательных наземных температур и при непрерывном накоплении снега, радиояркостные температуры меняются мало и в разные годы по-разному: в 2003-2004 году мы видим незначительное уменьшение температур, в 2004-2005 году температуры практически постоянны, в 2005-2006 году они начинают расти. Если общий интервал изменения радиояркостных температур, связанный с ростом снежного покрова, в течение зимы составляет около 30-40 °K, то на холодный период зимы, когда растет толщина снежного покрова, приходится не более 10 °K. То есть, неправомерно говорить про значимые уменьшения яркостных температур в этих каналах по мере накопления снега на протяжении холодного периода зимы.



Рис. 3. Изменение средней радиояркостной температуры на 37 Ггц и наземной температуры для окрестности метеостанции Воркута (тундра, зима 2005/2006 г.г.)

На рис. 3 в одних координатных осях показано изменение яркостной температуры на  $37\Gamma$ гц и наземной температуры. Для удобства восприятия введены линейные коэффициенты и смещение для графиков. Видно, что при положительных наземных температурах (примерно до 289 дня) графики ведут себя совершенно идентично. Снижение наземной температуры и появление первого снега проходит с несколькими оттепелями(289-322 дни). На метеостанции Воркута зафиксированы жидкие осадки в этот промежуток времени (например, ливень и дождь при температуры, что свидетельствует о появлении практически непроницаемой для излучения на данных частотах корки на поверхности снега. После 10 дня яркостные температуры практически повторяют ход наземной температуры, хотя снега на земле становится все больше и водный эквивалент растет. Корка опускается ниже, на ней накапливается слой снега, но яркостные температуры меняются мало. И только оттепели в конце зимы опять резко меняют структуру снега, происходит укрупнение кристаллов и новые резкие изменения яркостных температур. Аналогичную картину мы видим зимой 2004/2005г.г.

Вызывает сомнения правомерность гипотезы об отрицательном спектральном градиенте для снежного покрова тундры: температуры во всех каналах меняются примерно одинаково. На рис. 4 приведен график изменения разности 19h-37h в течение зимы 2005-2006 г.г. для пиксела, где расположена метеостанция Воркута. В одних координатных осях с ним – среднесуточная температу-

ра на метеостанции. На графике мы видим резкие скачки разности, соответствующие оттепелям с жидкими осадками в начале зимы: 289 день – начало отрицательных температур на земле, 296-297 день – морось, 304 день – дождь, 310 день – дождь, 315 день – дождь, 320 день – ливень. После всех этих явлений разность устанавливается на уровне 20°К и далее в течение зимы остается в коридоре 20-30 °К вплоть до весеннего повышения температуры на земле.



Рис. 4. Изменение разности 19h-37h и наземной температуры в течение зимы 2005-2006 гг.

На двух следующих рисунках показано поведение разности 19h-37h за несколько последних лет (2002-2006) (рис.5) и среднемноголетнее изменение разности и наземного значения водного эквивалента за тот же период (использовались средние радиояркостные температуры по 7 пикселам в окрестности г Воркута (рис.6). Видно полное несоответствие между наземными значениями и поведением разности.



Рис. 5. Поведение разности 19h-37h в окрестности г. Воркута за 5 последних лет (осреднено по 7 пикселам SSM/I)



Рис. 6. Поведение восстановленного по разности19h-37h водного эквивалента в окрестности г. Воркута (осреднено по 7 пикселам SSM/I за 5 лет) и изменение наземных значений водного эквивалента на метеостанции Воркута за тот же период

Реальный снежный покров даже в районах с холодной зимой имеет сложную слоистую структуру, и рассеяние в нем не может быть сведено к линейной формуле.

Следует заметить, что нам пришлось отказаться от использования данных AMSR-Е для такого многолетнего анализа из-за очередного изменения алгоритма обработки данных в NSIDC в середине января 2006 года. В новой версии алгоритма, наконец, осуществлена попытка учета леса в каждом пикселе. В результате новой модификации алгоритма точность восстановления водного эквивалента не повысилась ни для центра Европейской части, ни для полярных районов. При этом стало невозможным сравнение зимы 2005/2006 года с прошлыми годами и анализ SWE AMSR-E совместно с SSM/I. Более высокое разрешение AMSR-E по сравнению с SSM/I делает обработку более длительной и трудоемкой (карты SWE становятся доступными с задержкой в 6-7 дней). Однако в принципе ничего нового для восстановления SWE это не дает: если в безлесных районах (тундра, степь) в течение холодного периода зимы практически не меняются радиояркостные температуры и разность, то модель не работает и бесполезно вводить поправки на лес, пытаясь искусственно увеличить восстановленные значения и создавая иллюзию повышения точности.

В принципе оба радиометра ведут себя одинаково и дают примерно одинаковые значения восстановленного водного эквивалента с точностью до непринципиальной разницы частотных каналов и более высокого разброса значений AMSR-Е из-за большего разрешения (мы уже показывали это ранее на примере метеостанции Воркута, а также для центра Европейской части России).

Характер изменений восстановленных значений SWE в тундре показан в общем виде на рис.7.

В лесной зоне мы также имеем несколько оттепелей в начале зимы, в результате чего наблюдаются скачки разности. Однако, эти скачки в начале зимы, вероятно, не приводят к образованию таких плотных корок. Поэтому в лесной таежной зоне, как было зафиксировано и в более южных и теплых центральных районах, наблюдается непрерывное значимое изменение разности и, соответственно, сохраняется надежда на получения количественной информации о снеге с использование данных в каналах 19Ггц и 37Ггц. Ниже приведены осредненные по четырем пикселам с метеостанциями (Печора, Усть-Уса, Кожим-Рудник, Усть-Щугор) графики для 5 лет (рис.8).



Рис. 7. Поведение восстановленных значений водного эквивалента в тундре



Рис. 8. Поведение разности 19h-37h в разные годы (район г. Печора)

На рис.9 - осредненный водный эквивалент за весь период 2002-2006 годы: наземный по четырем метеостанциям и вычисленный по данным SSM/I. Видно, что в течение холодного периода зимы наблюдается неуклонный рост восстановленных значений. Остается надежда на подбор коэффициентов, как регрессии, с учетом поправок в начале зимы, так и компенсации рассеяния леса.



Рис. 9. Среднемноголетние значения восстановленного и наземного водного эквивалента для таежной зоны (район г. Печора)

## Выводы:

- использование каналов 19Ггц и 37Ггц в виде их разности для восстановления водного эквивалента снега в безлесных центральных и полярных районах Европейской части России не дает желаемых результатов;
- оттепели, особенно сопровождающиеся жидкими осадками (что характерно для безлесных районов центра Европейской части России в течение всей зимы, а для тундры - только в начале зимы), приводят к образованию корки на поверхности снега, практически непроницаемой для микроволнового излучения в каналах 19 Ггц и 37 Ггц;
- в районах, где площадь леса составляет не менее 40% территории, снежный покров имеет другую структуру, в результате чего наблюдаются значимые изменения вышеупомянутой разности, оставляющие надежду на возможность использования подобных моделей в лесной зоне;
- для восстановления характеристик снега по микроволновым данным целесообразно исследование возможности использования других каналов (возможно, более длинноволновых), изучение особенностей структуры снежного покрова и их проявлений в микроволновом диапазоне в разных ландшафтных зонах.

# Литература

- 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 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей. Том II. – М.: "GRANP polygraph", 2005. С. 150-156.
- Носенко О.А., Долгих Н. А, Носенко Г.А. Снежный покров центра Европейской части России по данным AMSR-Е и SSM/I. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей. Выпуск З. Том I. – М.: ООО "Азбука-2000". 2006. С. 296-301.