

Оценка точности спутниковой информации о снеготалых водах крупных водосборов европейской территории России

А.А. Телегина¹, Н.Л. Фролова¹, Л.М. Китаев², Т.Б. Титкова²

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
E-mail: annatelegina29@yandex.ru

²Институт географии РАН, Москва, Россия
E-mail: lkitaev@mail.ru

В работе оценивается точность восстановленных по данным SSM/I – DMSP значений снеготалых вод (модель Чанга) для обоснования возможности использования спутниковой информации в исследованиях водного баланса крупных водосборов Восточно-Европейской равнины. Погрешность восстановленных данных оценивалась путем их сравнения с данными наземных наблюдений метеорологических станций и рассматривалась для сезонных и межгодовых изменений снеготалых вод. Максимальные погрешности для сезонных изменений снеготалых вод приурочены к водосбору Северной Двины – в среднем 53%; для водосборов Оки и Дона погрешность составляет соответственно 35 и 33%. Во всех случаях неточности восстановленных данных существенно превышают 25% заявленные авторами алгоритма модельных расчетов. Основная ошибка в сезонном и многолетнем ходе связана с оттепелями, частота которых увеличивается к весеннему периоду – разница восстановленных и фактических суточных значений может достигать 100% как следствие появления в снежной толще жидкой воды и последующего ее преобразование в ледяную корку. Как показали расчеты, причиной несоответствия восстановленных и фактических данных являются также и погрешности осреднения данных наземных снеготалых вод: использование данных более частых пентадных снеготалых вод вместо ежедекадных и увеличение количества метеостанций на исследуемую территорию позволяет в некоторых случаях снизить величину ошибки. Рассмотрены связи восстановленных и фактических снеготалых вод для открытых и закрытых (залесенных) участков – связь спутниковых и наземных данных на открытых участках более заметна. Таким образом, в данном случае оценена зависимость погрешностей как от приземной температуры воздуха, так и от характера растительности.

Ключевые слова: восстановленные и фактические снеготалые воды, приземная температура воздуха, осадки, микроволновое дистанционное зондирование, речной бассейн.

Введение

Снежный покров – важное звено во взаимодействии климатических, гидрологических и гляциологических процессов на земном шаре, один из наиболее распространенных и динамичных природных объектов. Он представляет собой как мощный климатообразующий фактор, так и важный гидрологический ресурс. Для значительной части территории России половодье, вызванное таянием снежного покрова, – наиболее характерная особенность водного режима рек. Важнейшая характеристика снежного покрова, используемая в долгосрочных прогнозах стока талых вод – запас воды в снежном покрове. С развитием технологий дистанционного (спутникового) зондирования в последние десятилетия исследуется вопрос об использовании спутниковых данных для системы мониторинга состояния поверхности Земли. Актуальность использования спутниковых измерений пассивного СВЧ-излучения связана с тремя принципиально важными их преимуществами (Кучмент и др., 2009; Носенко О.А., Носенко Г.А, 2008; Boyarskii, Tikhonov, 2000; и др.):

1) универсальностью, в том смысле, что данные измерений уходящего микроволнового излучения могут быть использованы для дистанционной индикации параметров атмосферы, подстилающей поверхности, верхнего слоя грунта и снежной толщи (в зависимости от выбора частот зондирования);

2) всепогодностью, поскольку на длинах волн порядка нескольких сантиметров и более облака практически не влияют на перенос микроволнового излучения;

3) высоким пространственно-временным разрешением наблюдений.

Однако, существенным недостатком спутниковых наблюдений являются неточности восстановленных данных, связанные с влиянием растительности и расчлененности рельефа, с характером снежной толщи – слоистостью, наличием воды и ледяных прослоек, величиной зерна и пороговой мощностью снежного покрова. Основной целью данной работы является пространственно-временной анализ доступных микроволновых данных и моделей и оценка их применимости для европейской территории России. Для достижения основной цели решались следующие задачи: сравнение и объективная оценка основных методов определения запасов воды в снеге; оценка точности получаемой информации, сравнение с фактическими данными запасов воды в снежном покрове за многолетний период, оценка влияния хода основных метеорологических элементов на точность восстановленных данных.

Методы и используемые данные

Данные о яркостной температуре пассивного микроволнового зондирования в равноплощадной SSM/I системе координат (EASE-Grid) доступны с 1978 г. Микроволновая СВЧ-радиометрия, она же пассивная микроволновая съемка, заключается в измерении интенсивности излучения на частотах от 6 до 37 ГГц. Относительная прозрачность атмосферы в микроволновом диапазоне делает эти данные чрезвычайно перспективными для определения параметров снежного покрова, особенно для малонаселенных территорий, где другие источники данных отсутствуют.

Интенсивность микроволновой радиации и соответственно микроволновая яркостная температура, испускаемая снежным покровом, характеризуется распространением излучения, которое в свою очередь зависит от термодинамической температуры, плотности снега, его слоистости, структуры и зернистости (размера кристаллов снега), условий подстилающей поверхности (Chang et al., 2000). В микроволновом диапазоне снегу свойственен отрицательный спектральный градиент, поэтому при увеличении высоты снежного покрова в канале 18-19 ГГц температура падает медленнее, чем в канале 36-37 ГГц. По-

этому, как правило, в качестве индикатора появления снега на поверхности принимается положительное значение разности яркостных температур между 19 ГГц и 37 ГГц, которое с увеличением высоты снежного покрова пропорционально увеличивается. Модели восстановления снеготолщин 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. Точность определения запасов воды в снеге оценивается авторами методики в 25% при существенно меньшей точности на залесенных пространствах (Chang et al., 2000).

Наиболее важной проблемой, стоящей на пути эффективного картирования снеготолщин, стоит малое разрешение, предоставляемое пассивной съемкой, и насыщение влагой снежного покрова талой водой во время оттепелей и в период снеготаяния, что приводит к повышению яркостных температур в точке, в которой подстилающая поверхность воспринимается как бесснежный участок. Однако, хотя количественный анализ величины снеготолщин на участках с талым снегом не рекомендован авторами модели, это может быть некритичным по следующим причинам. Если кратковременный период таяния наблюдается зимой, то снег "возрождается" при низких температурах, приводящих к замерзанию воды. Если мокрый снег встречается весной, последнее значение водного эквивалента сухого снега будет определено в период, обычно очень близкий к максимальному накоплению.

Серьезные проблемы возникают с лесной растительностью, затеняющей снежный покров, и ошибочными значениями данных, полученных с помощью стандартного алгоритма в местах, где значительную долю снежного покрова занимали крупные кристаллы льда. Это вызвало очевидную необходимость ввести поправочные коэффициенты и модификации к алгоритмам, учитывающим неоднородный состав зерен, зернистость снега в снежном покрове, что и было предложено Tait A. и его коллегами (Tait et al., 2000).

Еще одна проблема, приносящая большие погрешности при измерении, заключается в полном рассеивании микроволнового излучения до достижения поверхности снега, и, следовательно, занижению данных на территории с большой мощностью снежного покрова (saturation effect) (Chang et al., 2000).

В ходе решения основной цели и задач проводимых исследований использовались данные двух видов: значения снеготолщин, восстановленных по результатам измерений при спутниковом дистанционном зондировании и фактические значения снеготолщин, полученные при наземных наблюдениях метеорологическими станциями. Данные для расчета восстановленных снеготолщин получены спутниковым радиометром AMSR-E (The Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System). Они были предостав-

лены центром данных о снеге и льде (NSIDC – The National Snow and Ice Data Center), где находятся в свободном доступе ([http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite &spatial_type=rectangle](http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle)).

Спутниковые данные состоят из двух частей: текстового файла метаданных и файла в формате hdf для каждой из запрашиваемых дат. Данные в формате hdf представляют собой цифровые аналоги суточных карт запасов воды в снеге для всего Земного шара (в нашем случае для выбранной территории) в регулярной сетке вида EASE-Grid (TheEqualAreaScalableEarthGrid). Она (EASE-Grid) состоит из трех равновеликих проекций: северного и южного полушария (равноплощадная проекция Ламберта, азимутальная) и глобальной (цилиндрическая, равноплощадная), объединенных с сеткой с шагом 25 км. Визуализация данных в виде карт для дальнейшей их обработки далее осуществлялась в программе ArcGis9.3. Время, необходимое для достижения данных до потребителя с момента съемки спутником, составляет четыре дня. Таким образом, при нормальной работе радиометра данные, полученные при съемке 1 января, будут доступны на сервере уже 5-го числа. Другая особенность ежедневных съемок – наличие зон, не попавших в полосу охвата радиометра. Расположение данной зоны зависит от количества съемок радиометром SAMSR-E за день, что в свою очередь изменяется от нуля до восьми раз для различных широт и долгот. Проблема пустых зон отчасти решается использованием данных, осредненных за 5 дней, которым соответствуют значения ВЭС для каждого пикселя. Такие данные использовались на первом этапе ознакомления с методом микроволнового пассивного зондирования, когда восстановленные значения усреднялись для периода с 15 февраля по 15 мая 2010 г. по 9 водосборам рек европейской части России (Печора, Северная Двина, Мезень, Онега, Волга, Кама, Ока, Москва, Дон). Для сравнения и оценки ошибки восстановленных данных космических съемок Центр Российского регистра гидротехнических сооружений и государственного водного кадастра предоставил данные снегомерных съемок со значениями запаса воды в снеге за каждые 5 суток для вышеуказанного периода. Для каждого водосбора вычислялось среднее значение по данным на постах, расположенных в его границах. Для выявления основных причин разницы восстановленных и фактических снегозапасов были проанализированы данные по приземной температуре воздуха и выпавшим осадкам. Ежедневные данные восстановленных снегозапасов использовались на втором этапе исследования, который включал в себя аналогичный анализ за более продолжительный период времени с 2003 по 2010 г. для трех водосборов (Северная Двина, Ока, Дон), каждый из которых соответствует характерной географической зоне. Всего было получено и обработано около 1200 растровых карт.

Ошибки восстановления снегозапасов

Максимальные ошибки восстановленных снегозапасов приурочены к водосбору Северной Двины и составляют в среднем 53%, для водосборов Оки и Дона средние значения ошибок примерно равны между собой и составляют 35, 33% соответственно, что на 7-10% отличается от заявленных авторами 25%. Различия в сезонных изменениях восстановленных и фактических снегозапасов хорошо видны на *рис. 1* – разница между восстановленными и фактическими значениями убывает с севера на юг.

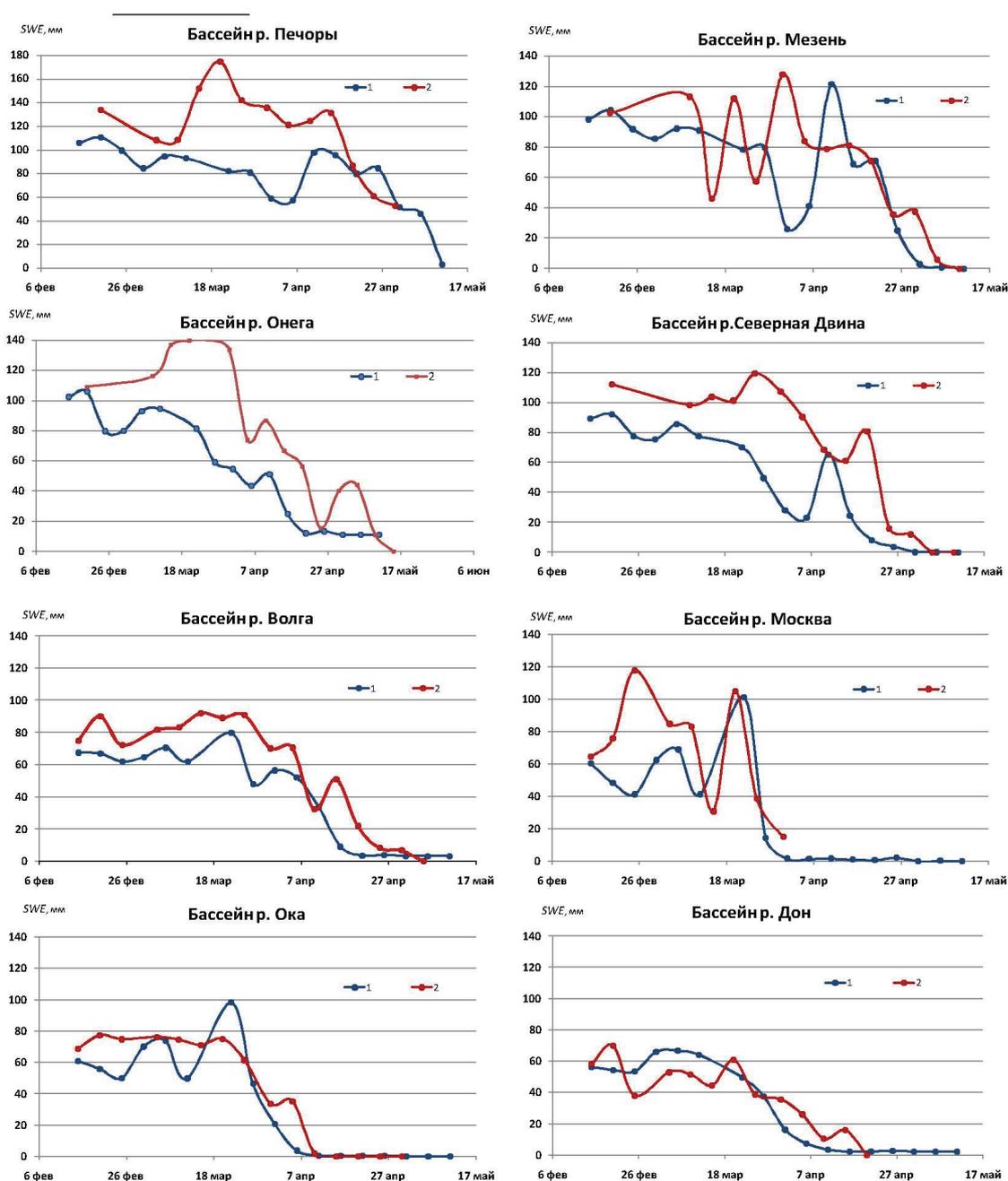


Рис. 1. Сравнение восстановленных (1) и фактических (2) значений снегозапасов в период снеготаяния весной 2010 г.

Для каждого региона можно выделить главные и второстепенные факторы, приводящие к погрешностям. Так основной проблемой при восстановлении снеготпасов на водосборах рек северной части Восточно-Европейской равнины являются значительная залесенность и мощный снежный покров. Для южных регионов и водосборов средней полосы приоритетной проблемой становится выявление причин встречающихся несоответствий колебаний осадков и восстановленных значений снеготпасов, наличия обратной связи между значениями снеготпасов и приземной температуры воздуха, а также учет потеплений и их влияния на восстановленные значения.

Так, для бассейна Дона ход изменения фактических и восстановленных снеготпасов сопоставлялся с ходом метеорологических величин: сумм осадков и приземной температуры воздуха. На рис. 2 и 3 отчетливо прослеживается влияние потеплений на величину ошибки определения снеготпасов с помощью дистанционных методов. В этот период разница рассматриваемых величин может достигать 100%. Это объясняется, как уже указывалось выше, поступлением жидкой воды в снежную толщу, что приводит к повышению яркостных температур в точке, в которой подстилающая поверхность воспринимается как бесснежный участок.

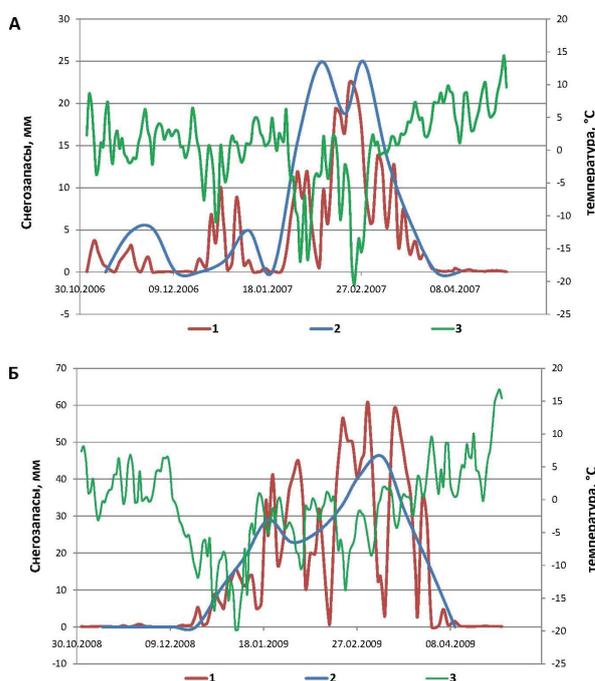


Рис. 2. Сравнение сезонного хода характеристик для водосбора р. Дон весной 2010 г.: А - осадки, мм (1), восстановленные (3) и фактические (4) снеготпасы; Б - приземная температура воздуха (2), восстановленные (3) и фактические (4) снеготпасы

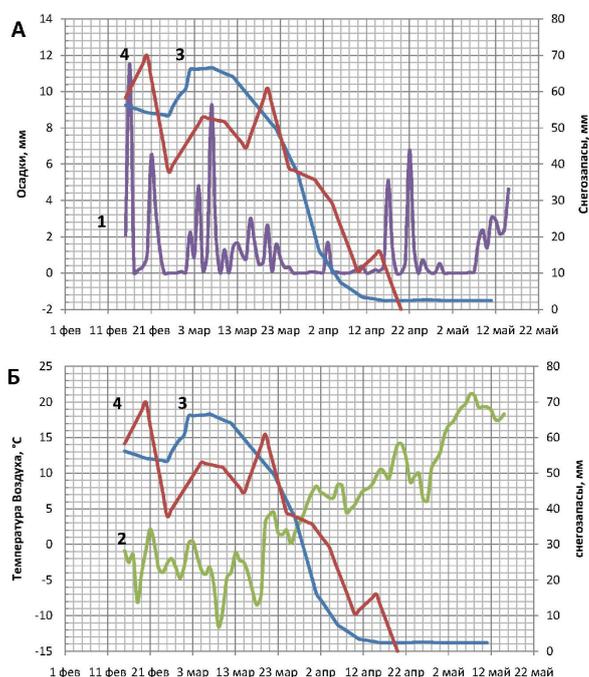


Рис. 3. Сезонный ход восстановленных (1) и фактических снеготпасов (2) и температуры воздуха (3) водосбора р. Дон для 2006-2007 гг. (А) и 2008-2009 гг. (Б)

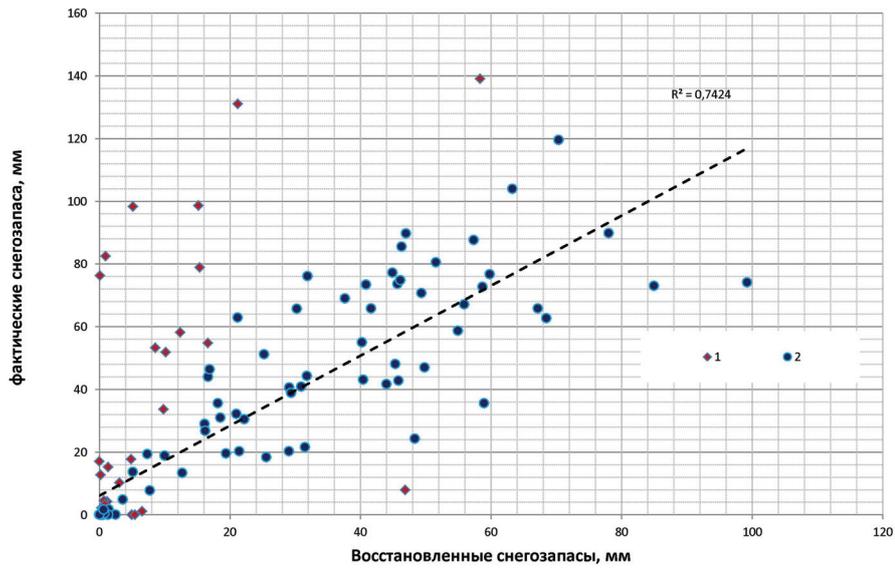


Рис. 4. График связи восстановленных и фактических снегозапасов для водосбора Оки (1- до учета потеплений; 2 – после учета) (2003-2010 гг.)

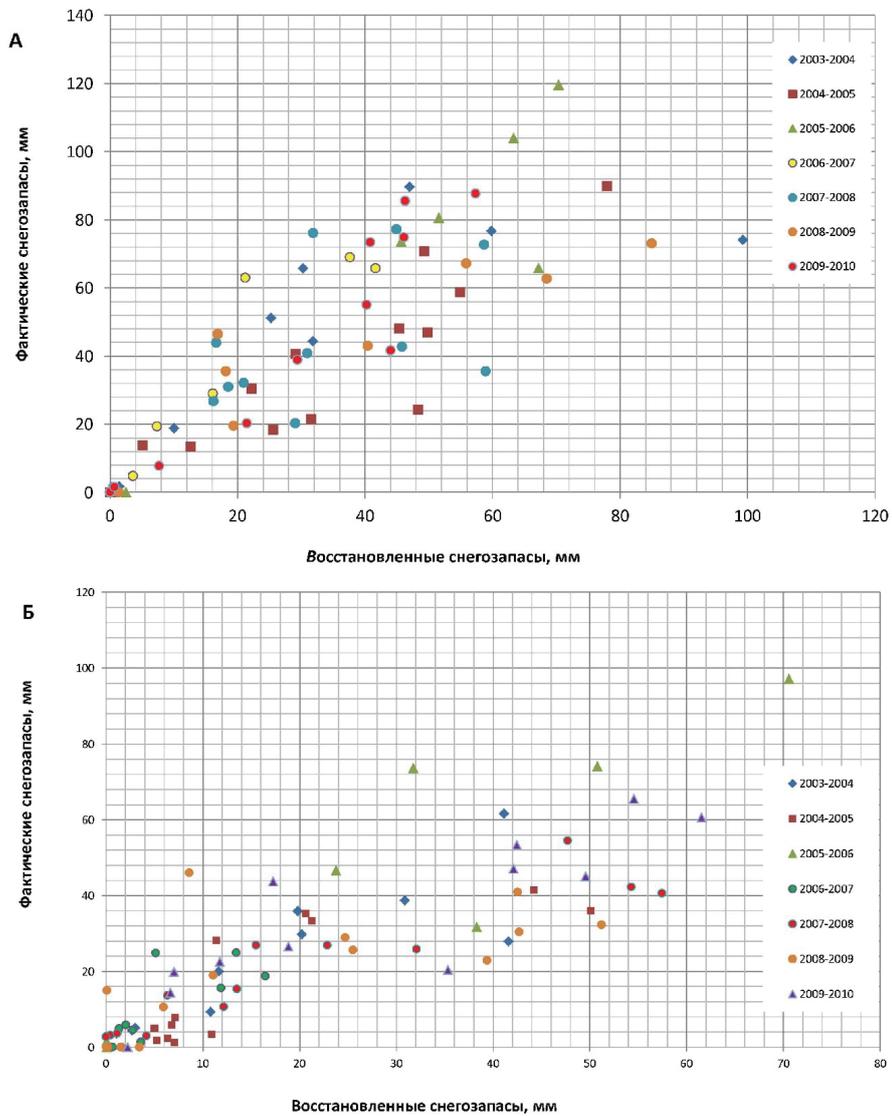


Рис. 5. График связи восстановленных и фактических снегозапасов отдельных лет для водосборов р. Оки (А) и р. Дон (Б)

При учете резко отклоняющихся значений для периодов потеплений и привнесения в снег жидкой фазы, путем их исключения из ряда данных, между восстановленными и фактическими значениями снеготопливности наблюдается явная линейная зависимость (рис. 4). При более ее детальном анализе (рис. 5) не наблюдается расслоения для каждой отдельной зимы, все значения образуют однонаправленное поле точек, таким образом, выявляется линейная зависимость, повторяющаяся от года к году. Еще меньший разброс точек соответствует связи снеготопливности для водосбора р. Дон (рис. 5Б). Это допускает возможность ввода в расчетный алгоритм переходных коэффициентов для улучшения точности восстановления значений водного эквивалента, индивидуальных для каждого водосбора.

Для бассейна Северной Двины ситуация обстоит сложнее. Общую направленность выделить можно, но от года к году происходят сильные изменения, разброс точек очень большой. Потепления здесь вызывают наибольшие расхождения, в весенние месяцы, когда постоянный рост приземных температур воздуха часто сопровождается большими значениями снеготопливности из-за позднего схода снежного покрова на данной территории. Восстановленные значения снеготопливности без возврата устойчивых низких температур воздуха долгое время близки или равны нулю, что и приводит к большим ошибкам в течение длительного периода.

Однако, для отдельных лет наблюдается тесная связь рассматриваемых значений при относительно небольших средних снеготопливностях (2007-2008, 2009-2010), более детальное рассмотрение основных особенностей зим различных лет может помочь выявить общие зависимости по крайней мере для периода устойчивых низких температур, которые часто совпадают с накоплением максимальных его значений.

Оценка влияния растительности и высоты снежного покрова на погрешность восстановленных снеготопливностей

Характер неточностей восстановленных по спутниковым данным снеготопливностей в связи с залесенностью рассмотрен на примере севера Восточно-Европейской равнины – бассейна Баренцева и Белого морей (выше 60-й параллели). Данные снегомерных наблюдений, проводимых метеорологическими станциями на открытых и лесных маршрутах, показывают, что средние по территории максимальные фактические снеготопливности залесенных территорий стабильно в многолетнем ходе превышают максимальные снеготопливности открытых пространств (рис. 6А) со средним соотношением 1,3. Для сравнения рассмотрено соотношение восстановленных снеготопливностей – для ячеек подспутниковой сетки, совпадающих с расположением метеорологических станций. В этом случае многолетний ход

снегозапасов открытых и залесенных территорий практически идентичен (рис. 6Б) и более чем в два раза занижен относительно фактических значений (рис. 6А). Следовательно, коэффициенты модели восстановления снегозапасов по данным микроволнового излучения требуют существенной доработки для областей с лесной растительностью.

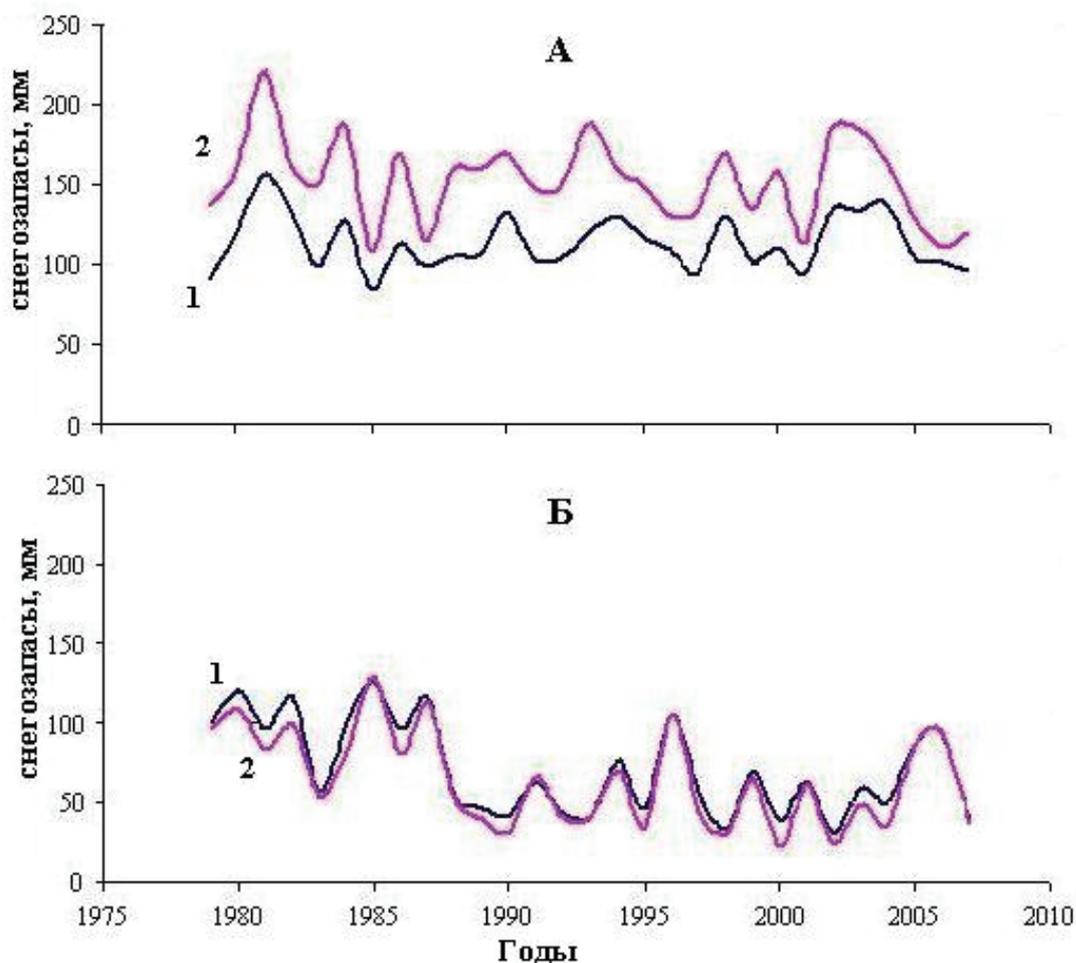


Рис. 6. Многолетний ход фактических (А) и восстановленных (Б) снегозапасов севера Восточно-Европейской равнины; 1 – открытые пространства, 2 – лесные массивы

Роль залесенности в совокупности с высотой снежного покрова в искажении величины восстановленных снегозапасов может быть также проиллюстрирована рис. 7. Расхождение величины восстановленных и фактических снегозапасов максимально на севере Восточно-Европейской равнины (бассейны Белого и Баренцева морей), где низкие фоновые температуры воздуха максимально снижают потенциально возможные искажения микроволнового излучения влажным снегом и ледяными прослойками (рис. 7А). Для существенно менее залесенных водосборов Волги и Дона характерны значительно меньшие расхождения данных, несмотря на достаточно высокие фоновые температуры воздуха,

связанные с этим оттепели и, следовательно, наличие влаги и ледяных прослоек в снежной тоще. Тем не менее, рассмотрев *рис. 7*, можно сделать вывод о том, что лесная растительность в совокупности с мощным снежным покровом на севере Восточно-Европейской равнины обеспечивает максимальные для Восточно-Европейской равнины погрешности восстановленных снегозапасов в сравнении с более теплыми зимой регионами центра и юга, где погрешности связаны с последствиями оттепелей – влажным снегом с прослойками льда..

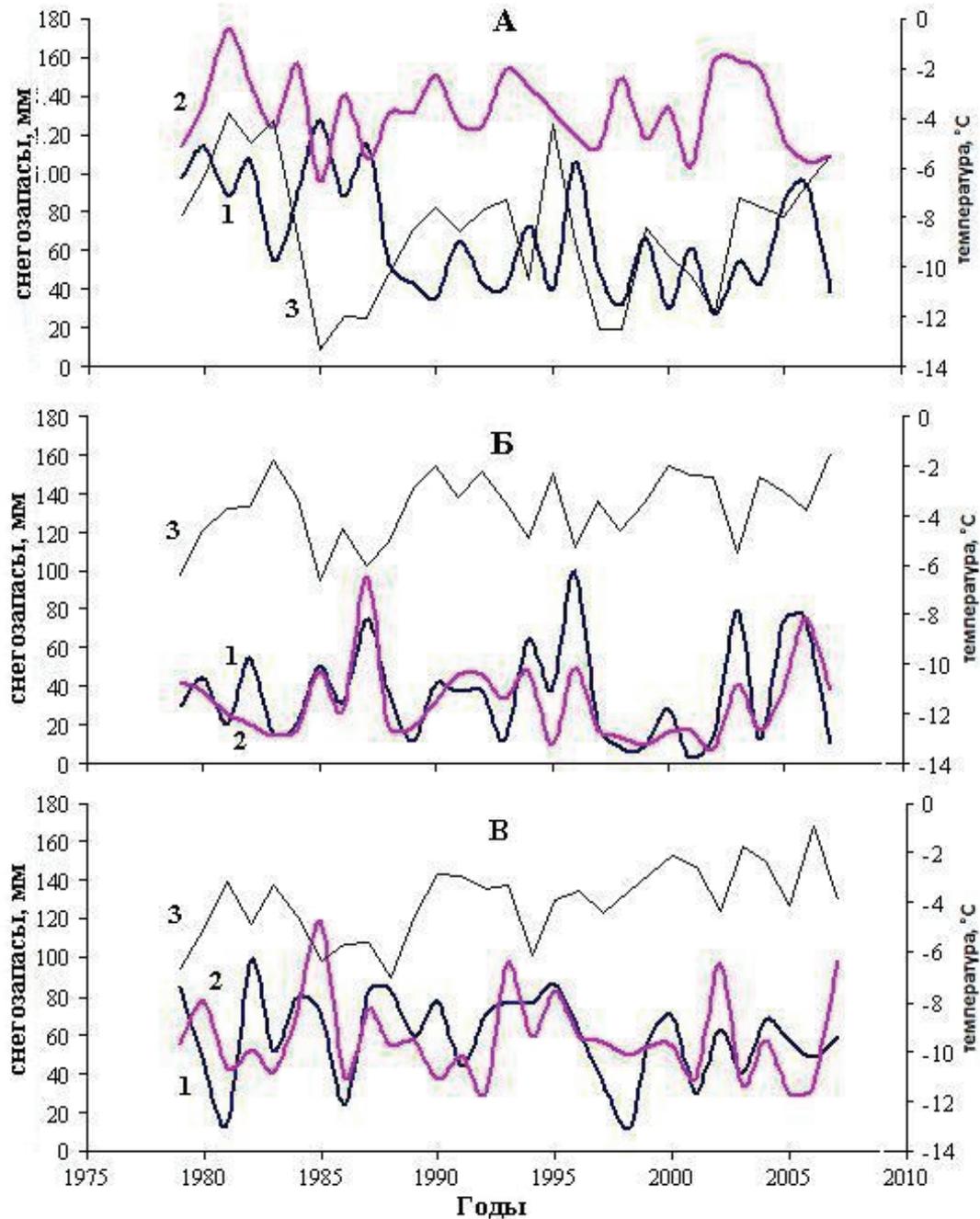


Рис. 7. Многолетний ход характеристик севера Восточно-Европейской равнины (А), водосборов р.Волга (Б) и р. Дон (В). 1– восстановленные снегозапасы; 2 – фактические снегозапасы; 3 – приземная температура воздуха

Выводы

В работе произведена оценка точности определения снеготолщин методом пассивного микроволнового зондирования для сезонного и многолетнего уровня. Расхождение восстановленными и фактическими данными составляет 33-35% в центре и на юге Восточно-Европейской и 53% в бассейнах Белого и Балтийского морей, что заметно превышает ошибку в 25%, заявленную авторами алгоритма модельных расчетов.

Параметризация данных наблюдений зимы 2010 г. показала, что ошибки могут быть связаны как с неточностями модельных расчетов восстановленных снеготолщин, так и с неточностями измерений характеристик снежного покрова на снегомерных маршрутах. Уточнение фактических данных дополнением результатами пентадных снеготолщин снижает разницу восстановленных и фактических снеготолщин.

Уточнена роль факторов, обуславливающих существенные различия восстановленных и фактических снеготолщин:

- особенности термического режима: наличие оттепелей, приток в связи с этим жидкой воды в снег и, как следствие, обнуление показаний спутника;
- залесенность территории водосбора, которая делает нерепрезентативной оценку количества снеготолщин в бассейнах Белого и Баренцева морей;
- накопление мощной толщи снежного покрова, что также снижает точность расчета восстановленных снеготолщин в многоснежных районах севера Восточно-Европейской равнины.

Наличие рассмотренных факторов учтено в исходном алгоритме восстановления запасов воды в снеге, но требует своей переоценки из-за особенностей исследуемой территории.

Литература

1. *Носенко О.А., Носенко Г.А.* Особенности поведения радиоярких температур SSM/I в субполярных регионах России в течение зимы 2006/2007 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 160-164.
2. *Кучмент Л.С., Романов П.Ю., Гельфан А.Н., Демидов В.Н.* Оценка характеристик снежного покрова путем совместного использования моделей и спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 1-10.
3. *Boyarshii D.A., Tikhonov V.V.* The Influence of Stratigraphy on Microwave Radiation from Natural Snow Cover // J. of Electromagnetic Waves and Applications. 2000. Vol.14. No. 9. P. 1265-1285.
4. *Chang A., Rango A.* Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm. Version 3.1. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center. 2000.
5. *Tait A.B., Hall D.K., Foster J.L., Armstrong R.L.* Utilizing multiple datasets for snow-cover mapping // Rem. Sens. Env. 2000. No. 72. P. 111-126.

Estimation of precision of snow storage satellite data for large watersheds of European Russia

A.A. Telegina¹, N.L. Frolova¹, L.M. Kitaev², T.B. Titkova²

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
E-mail: annatelegina29@yandex.ru

²*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
E-mail: lkitaev@mail.ru

Precision of retrieved values of snow storage from SSM/I - DMSP datasets (Chang model) is estimated for the use in studies of water balance of large watersheds in the East European Plain. Errors of the retrieved data were estimated by comparing them with factual data of ground-based observations for seasonal and multiyear changes. Maximal errors were demonstrated for watershed of the Northern Dvina - an average of 53%, for watersheds of Oka and Don the errors were respectively 35 and 33%. In all cases, the retrieved data errors significantly exceeded 25% claimed by the authors of the model algorithm. Principal errors in seasonal and multiyear variability estimates are connected with thaws, the frequency of which increases by the spring period - the difference between the retrieved and factual daily values may reach 100% as a result of liquid water occurrence in snow and subsequent ice crust formation. Connection of the retrieved and factual snow storage data was considered for open and closed (forested) areas. In open areas the connection between the retrieved and factual data is more noticeable. Thus, the dependence of retrieved data errors both on air temperature and vegetation condition was assessed.

Keywords: recovered and factual snow storage, surface air temperature, precipitation, microwave remote sensing, river basin.

References

1. Nosenko O.A., Nosenko G.A., Osobennosti povedeniya radioyarkostnykh temperature SSM/I v subpolyarnih regionakh Rossii v techenie zimy 2006/2007 gg. (Features of SSM/I brightness temperature behavior in the subpolar regions of Russia during the winter of 2006/2007), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 2, No. 5, pp. 160–164.
2. Kuchment L.S., Romanov P.Yu, Gel'fan A.N., Dmitriev V.N., Ocenka kharakteristik snegnogo pokrova putiom sovmestnogo ispol'zovaniya modeley sputnikovoi informacii. (Evaluation of snow characteristics by joint use of models and satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 4, pp. 1–10.
3. Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., The influence of stratigraphy on microwave radiation from natural snow cover, *J. of Electromagnetic Waves and Applications*, 2000, Vol. 14, No. 9, pp. 1265–1285.
4. Chang A., Rango A., *Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm. Version 3.1.*, Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2000, 48 p.
5. Tait A.B., Hall D.K., Foster J.L., Armstrong R.L., Utilizing multiple datasets for snow-cover mapping, *Remote Sensing Environment*, 2000, No. 72, pp. 111–126.