

Использование спутниковой информации о характеристиках снежного покрова в физико-математической модели формирования весеннего половодья

Л.С. Кучмент¹, А.Н. Гельфан¹, В.Н. Демидов¹, П.Ю. Романов²

¹*Институт водных проблем РАН
119333 Москва, ул. Губкина, д.3
E-mail: hydrowpi@aqua.laser.ru*

²*Институт климатических исследований, Мэрилендский Университет, США*

Предложена методика расчета гидрографа талого стока на основе физико-математических моделей формирования речного стока, имеющих стандартных данных наземных гидрометеорологических измерений и спутниковых измерений состояния земной поверхности. Расчеты проводились для двух регионов, включающих бассейны рек Вятка и Дон. Показано, что спутниковые измерения снежного покрова, несмотря на возможные погрешности и пропуски в зависимости от метеорологических условий, могут быть важным дополнением к наземным измерениям для воспроизведения пространственной картины формирования стока. Использование физико-математических моделей формирования стока позволяет уменьшить ошибки спутниковых данных о снежном покрове и обеспечить пространственно-временную непрерывность его мониторинга.

Ключевые слова: речной сток, моделирование, спутниковые данные, снежный покров

Введение

Предсказуемость характеристик весенне-летних половодий на реках в значительной мере зависит от качества информации о пространственном распределении и динамике снежного покрова в период снеготаяния. Наземные измерения характеристик снежного покрова требуют больших материальных затрат, и за последние 15-20 лет эти измерения были в России существенно сокращены. В то же время за эти годы в мире достигнуты заметные успехи в разработке методов измерения характеристик снежного покрова из космоса. В первую очередь здесь следует выделить определение запасов воды в снеге (ЗВС) и покрытости территории снегом (ПТС). Однако ошибки спутниковых измерений характеристик снежного покрова значительно зависят от метеорологических условий, поэтому в этих данных часто бывают пропуски, и пока все же точность спутниковой информации оказывается для расчетов речного стока недостаточной, в особенности для залесенных водосборов.

Одной из возможностей получения более надежных данных о характеристиках снежного покрова и обеспечения их непрерывности во времени и пространстве является совместное усвоение наземных и спутниковых измерений характеристик снега в физико-математических моделях снежного покрова и снеготаяния. Наземные измерения, несмотря на их ограниченный объем, позволяют произвести калибровку этих моделей, а затем по спутниковым и наземным измерениям с помощью откалиброванных моделей можно рассчитывать пространственные поля характеристик снежного покрова через заданные интервалы времени. При этом спутниковые измерения характеристик снежного покрова могут быть уточнены путем учета в этих моделях факторов, снижающих точность измерений со спутника.

Целью данной работы была оценка возможностей применения спутниковых данных о ЗВС и ПТС для расчетов талого стока. Исследование проводилось на примере бассейнов р. Вятки до г. Вятские Поляны (площадь водосбора 124 тыс. км²) и р. Дон до ст. Казанская (площадь водосбора 102 тыс. км²).

Рельеф бассейна р. Вятки представляет собой плоскую равнину с лесистостью от 20-30% на юге до 80-90% на севере. Устойчивый снежный покров образуется, в среднем, в первой декаде ноября и сохраняется около пяти месяцев. Снеготаяние обычно начинается в третьей декаде марта и продолжается до мая. Рельеф рассматриваемой части бассейна р. Дон – холмистая равнина с большим числом речных долин, оврагов и балок. Лес занимает не более 10% площади водосбора и сосредоточен, в основном, в северной части водосбора. Устойчивый снежный покров сохраняется около 3-4 месяцев на севере бассейна и около 2-3 месяцев на юге. В течение зимы нередки продолжительные оттепели, которые могут приводить к полному сходу снега на значительных территориях. Снеготаяние начинается в первой декаде марта и продолжается, в среднем, до конца марта.

Исходная информация и расчет изменений пространственного распределения ЗВС во времени

Исходная спутниковая информация включала карты ЗВС NASA AE DySno, а также ежедневные данные о ПТС с пространственным разрешением 0.01° по широте и долготе, и измерения температуры поверхности, полученные по измерениям радиометром MODIS со спутника Terra дважды в сутки. В дополнение к регулярно получаемым данным использовались также карты типов подстилающей поверхности, вида и густоты лесной растительности, построенные NOAA (США) по данным измерений радиометром AVHRR. Наземная информация включала 6-часовые данные измерений температуры и влажности воздуха, осадков, облачности и скорости ветра по наблюдениям на метеорологических станциях, а также ежедневные измерения высоты снежного покрова (плотность снега считалась слабо изменяющейся по площади, и ее временной ход задавался по наблюдениям на одной из станций).

Построение ежедневных полей ЗВС производились путем ассимиляции спутниковой и наземной информации в физико-математической модели снежного покрова и снеготаяния, описанной в [1]. Модель позволяет воспроизводить изменения высоты и плотности снежного покрова от начала зимы до окончания снеготаяния в результате поступления твердых и жидких осадков, воздействия растительного покрова, фазовых переходов в толще снега, задержания талой воды, уплотнения снега под действием собственного веса.

Для бассейна р. Вятки модель снежного покрова и снеготаяния калибровалась по данным наблюдений за высотой снега на 19 метеорологических станциях за период с 1 ноября 2001 г. по 30 мая 2002 г. Для проверки модели использовались данные измерений высоты снега за такие же периоды в 2002-2005 гг. Среднеквадратическая ошибка расчета высоты снежного покрова по всем 19 метеорологическим станциям получилась для периода калибровки, равной 7см, а для периода, используемого для проверки модели, - 9см. Калибровка модели снежного покрова и снеготаяния для бассейна р. Дон проводилась по данным наблюдений на 42 метеостанциях за период с 1 ноября 2001 г. по 31 мая 2002 г., а ее проверка - по данным наблюдений за аналогичные периоды в 2002-2004 гг. Среднеквадратическая ошибка расчета высоты снежного покрова по всем 42 метеорологическим станциям для периода калибровки получилась равной 6см, а для периода проверки - 8см.

С помощью откалиброванной модели и с использованием спутниковых данных была рассчитана динамика полей ЗВС в период снеготаяния. Расчет производился для каждой ячейки пространственной сетки размером $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ и начинался с наиболее ранних дат начала снеготаяния по имеющимся наблюдениям на рассматриваемых водосборах:

1 марта для бассейна Вятки и 20 января для бассейна Дона. Начальные значения ЗВС в ячейках с открытой местностью задавались по картам NASA AE DySno. Чтобы получить начальные значения ЗВС для залесенных ячеек, по этим же картам сначала определялись ЗВС для ближайших ячеек с открытой местностью, а затем они умножались на коэффициент снегонакопления k_c (отношение запасов воды в снеге в лесу к запасам воды в снеге на окружающей лес открытой местности), зависящий от вида и густоты леса. Соответствующие таблицы изменения коэффициента k_c были получены на основании натуральных наблюдений и численных экспериментов с помощью физико-математической модели снежного покрова для характеристик лесной растительности рассматриваемой территории.

Для задания входных данных в модели при расчете полей ЗВС для каждой ячейки $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ пространственной сетки производилась интерполяция данных измерений на метеорологических станциях, и задавались спутниковые измерения температуры поверхности снежного покрова.

По рассчитанным полям ЗВС определялись величины ПТС и сравнивались с данными о покрытости снегом, полученными по картам NASA MOD10_L2 для дат, когда большая часть территории была свободна от облачности. Для слабозалесенных участков бассейна р. Вятка, рассчитанные величины покрытости получились близкими к определенным по спутниковым данным, в то время как для залесенных участков эти величины значительно отличаются (рис. 1). Для бассейна р. Дон, где лес занимает небольшую долю площади, рассчитанные и измеренные величины покрытости территории снегом, оказались весьма близкими для разных частей бассейна (рис. 2).

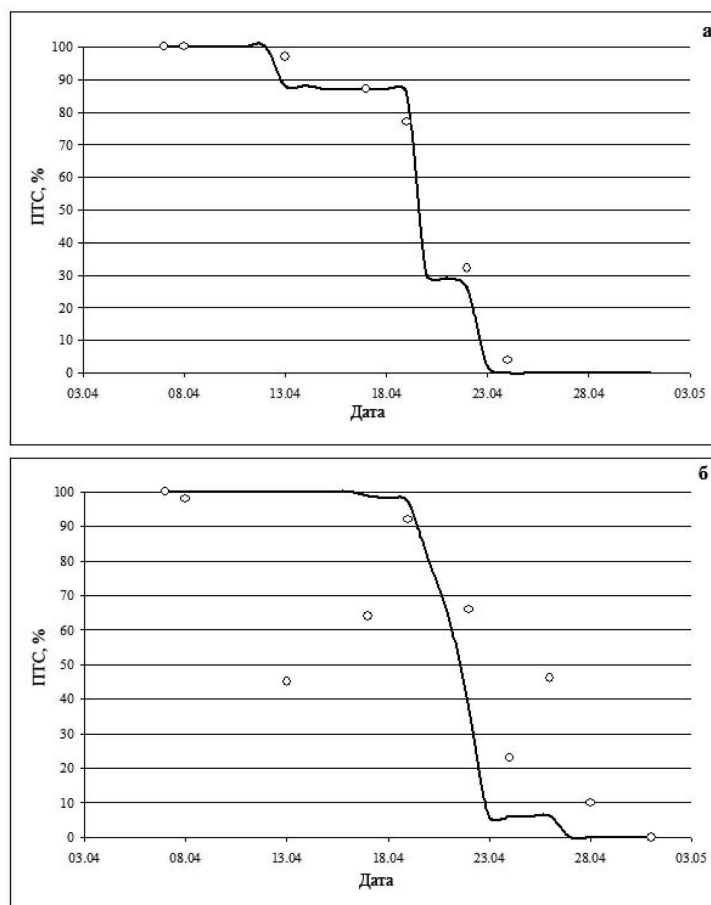


Рис.1. Сравнение величин покрытости снегом, рассчитанных (сплошная линия) и определенных по картам NASA MOD10_L2 (точки) для двух участков водосбора Вятки: а - лесистость участка 9%; б - 76%

Ежедневные поля запасов воды в снеге, рассчитанные по рассмотренной выше методике, а также определенные непосредственно по картам NASA AE DuSno, были использованы для расчетов гидрографов весеннего стока р. Вятка и р. Дон с помощью одной из модификаций физико-математической модели формирования речного стока, разработанной в Институте водных проблем РАН [2].

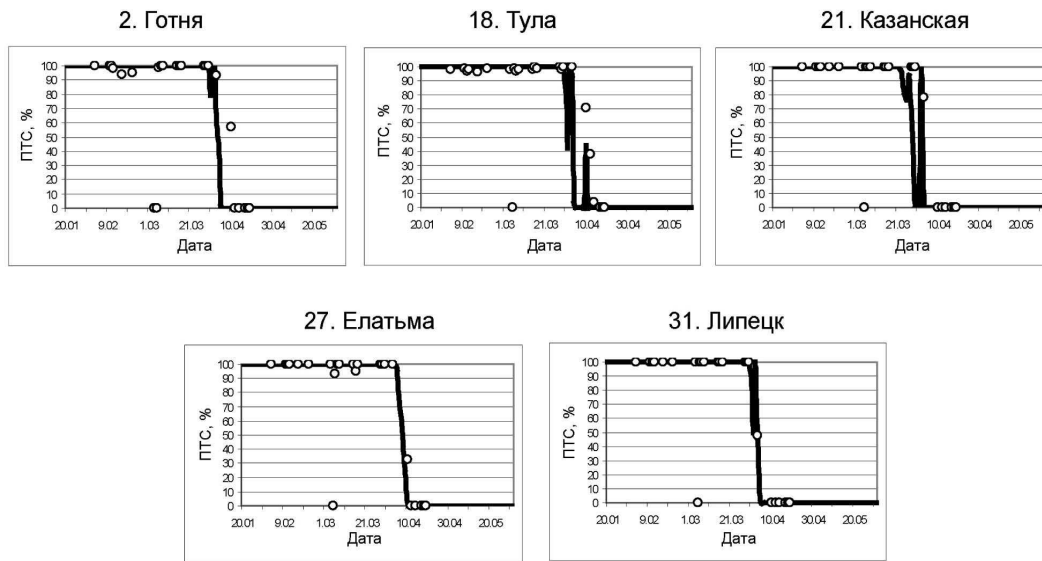


Рис. 2. Сравнение величин покрытости снегом, рассчитанных (сплошная линия) и определенных по картам NASA MOD10_L2 (точки) для участков водосбора р. Дон, тяготеющих к указанным метеорологическим станциям

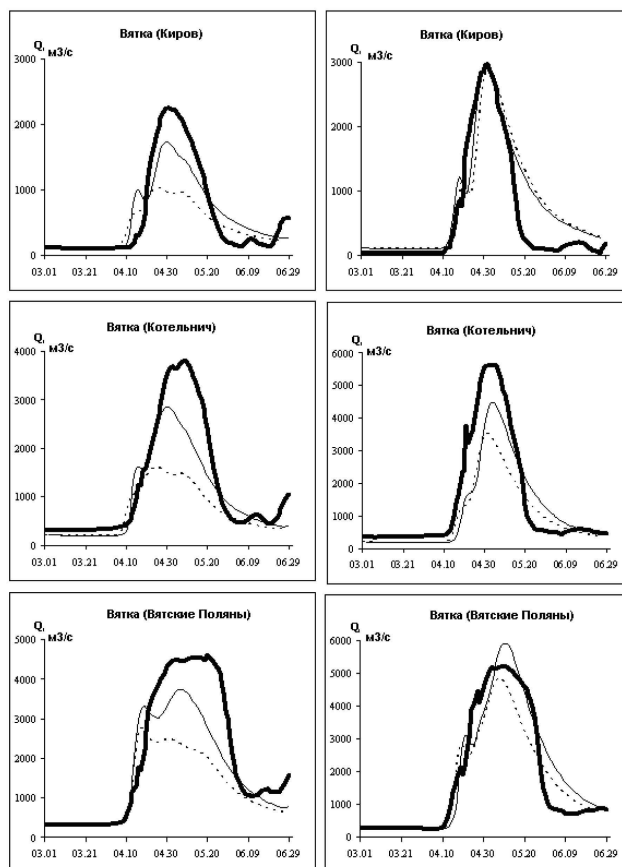


Рис. 3. Гидрографы за 2003 год (левая колонка) и 2005 год (правая колонка) на трёх станциях реки Вятка. Жирной, тонкой и пунктирной линиями нарисованы соответственно наблюдаемые гидрографы, рассчитанные с помощью модели снежного покрова и непосредственно по картам AE_DuSno

Моделирование формирования талого стока

При моделировании формирования стока рек Вятка и Дон использовалась конечно-элементная схематизация водосборов. Модель включает описание процессов вертикального тепло- и влагопереноса в промерзающей и оттаивающей почве, впитывания воды в мерзлую почву, задержания в бессточных углублениях рельефа, вертикального влагопереноса в незамерзшей почве и испарения, поверхностного и подповерхностного стекания воды по склонам водосбора, движения воды по русловой сети.

Большая часть параметров моделей задавалась по имеющимся измерениям, а также с помощью эмпирических связей с измеряемыми характеристиками водосборов. Шесть параметров модели формирования стока р. Вятка калибровались по гидрографам стока весенних половодий (с 1940 по 1959 гг.); проверка этой модели осуществлялась по данным наблюдений для 20 половодий, не использовавшихся для калибровки (1960-1980). Для калибровки модели формирования стока р. Дон (калибровались 4 параметра) использовались наблюдения за стоком в 4 створах за 3 года (1981-1983). Проверка модели проводилась по гидрографам в этих же створах за 5 лет (1971-1975). Для обоих водосборов получено удовлетворительное совпадение рассчитанных и наблюдаемых гидрографов.

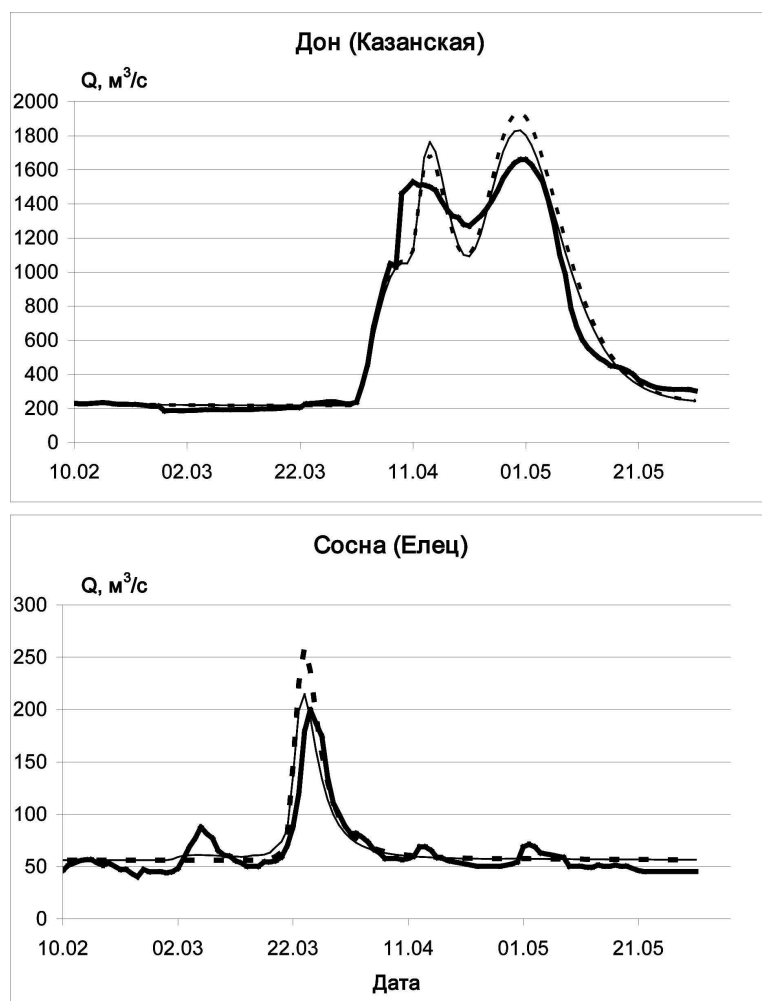


Рис. 4. Гидрографы половодья 2003 года на р. Дон и на ее притоке - р. Сосна. Жирной, тонкой и пунктирной линиями показаны соответственно наблюдаемые гидрографы, рассчитанные с помощью модели снежного покрова и непосредственно по картам AE_DySno

Расчеты стока с использованием спутниковой информации проводились для гидрографов половодий р. Вятка за 2003-2005 гг. На рис. 3 сравниваются гидрографы р. Вятка, рассчитанные с помощью модели снежного покрова с заданием начальных условий по картам АЕ_DySno (с уточнением для лесных участков) и непосредственно по картам АЕ_DySno. Как видно из этого рисунка, использование непосредственно карт АЕ_DySno без уточнения снеготаяния для лесных участков приводит к занижению рассчитанного объема стока весеннего половодья как в целом по бассейну р. Вятка, так и для частных водосборов. Обнаружено, что использование предложенной методики с учетом коррекции карт АЕ_DySno на лесных участках дает возможность уточнить гидрографы стока: максимальная погрешность объема стока не превышает 18%, а максимальных расходов – 15 % .

Аналогичное сравнение было проведено и для бассейна р. Дон. Так, гидрографы, рассчитанные с помощью модели снежного покрова с заданием начальных условий по картам АЕ_DySno, и рассчитанные непосредственно по картам АЕ_DySno, отличаются незначительно, что можно объяснить небольшой лесистостью бассейна р. Дон и меньшим количеством пропусков в спутниковых измерениях. В качестве иллюстрации на рис. 4 сравниваются фактические и рассчитанные гидрографы стока р. Дон у ст. Казанская и одного из ее притоков – р. Сосна у г. Елец.

Заключение

Проведенные исследования показали, что спутниковые измерения снежного покрова, несмотря на возможные пропуски и значительные ошибки при определенных метеорологических условиях, могут быть важным дополнением к наземным измерениям для воспроизведения пространственной картины формирования стока. Ассимиляция спутниковой информации в физико-математических моделях формирования снежного покрова позволяет уменьшить ошибки и обеспечить пространственно-временную непрерывность его мониторинга. Эффективность такого использования спутниковой информации при прогнозировании гидрографа талого стока зависит от плотности и репрезентативности сети наземных измерений снежного покрова. Использование измерений ЗВС с помощью радиометра AMSR-E представляются наиболее эффективным, если необходимы измерения до активного снеготаяния, когда ошибки этих измерений наименьшие. В то же время измерения ПТС могут быть полезны после появления площадей, свободных от снега для корректировки прогнозов. Более определенные выводы об эффективности использования измерений ЗВС для прогнозирования гидрографа стока, очевидно, могут быть сделаны после накопления достаточной длины рядов этих измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №10-05-00807).

Литература

1. 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. 47–56.
2. Кучмент Л. С., Демидов В. Н., Мотовилов Ю. Г., Смахтин В. Ю. Система физико-математических моделей гидрологических процессов и опыт ее применения к задачам формирования речного стока. // Водные ресурсы, 1986, № 5. С. 24-36.

Use of satellite-derived data of snow cover in a physically based model of snowmelt runoff generation

L.S. Kuchment¹, P. Romanov², A.N. Gelfan¹, V.N. Demidov¹

[1] *Water Problem Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[2] *University of Maryland, College Park, MD, USA*

A technique has been suggested for simulation of snowmelt runoff on the basis of physically based model of runoff generation, available ground-based observations and satellite-derived data on land surface. Simulations have been carried out for two regions including the basins of Vyatka and Don Rivers. It has been shown that the satellite data, in spite of their errors, can be important adjunct to the ground-based observations for simulation of spatial patterns of runoff generation. Using of the physically based models of runoff generation allows one to reduce errors of satellite data on snow cover and provides time-and-spatial continuity of snow monitoring.

Keywords: river runoff, simulation, satellite-derived data, snow cover.