

А. И. Сухинин, М. В. Воробьева, Е. А. Охоткина

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СНЕГОВОГО ПОКРОВА СИБИРИ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА MODIS*

Представлен анализ динамики снегового покрова Сибирского федерального округа (СФО). Изложены теоретические основы расчета индекса снегового покрова, основанного на изучении спектрально-отражательных и поглощательных характеристик снега.

Ключевые слова: отражательная способность, определение метеорологических параметров, наземные станции, снеговой индекс, относительная влажность, определение площади заснеженности.

При изучении атмосферных процессов, а также состояния земной и водной поверхности Земли, в синоптической метеорологии важно не только получение или свободный доступ к первичной спутниковой информации, но и грамотное использование данных дистанционного зондирования для анализа состояния окружающей среды, изучения климата и прогноза погоды. Столь глобальное применение и постоянный интерес к развитию спутниковых методов мониторинга различных метеорологических элементов указывают на актуальность подобного рода исследований.

Важной задачей наблюдения за снеговым покровом является определение площади заснеженности, что необходимо для прогнозов стоков рек со снеговым питанием, типичным для Сибири [1]. Для того чтобы провести количественный и качественный анализ снегового покрова, на основе совокупного использования спутниковой информации и данных наземных станций изучается метеорологическая обстановка территории, путем исследования спутниковых снимков определяется площадь заснеженности бассейнов рек.

Состояние атмосферы в определенный момент времени характеризуется рядом физических величин, которые и называются метеорологическими элементами или параметрами.

Ряд таких параметров можно получить из спутниковой и наземной информации. Эти параметры определенным образом связаны друг с другом: например, зная высоту верхней границы облачности (ВГО), влажность и количество осадков, можно судить о типе облачности; или, например, зная облачность, можно определить характер осадков. Визуализация этих зависимостей, различные графики, карты погоды и прочее, сравнение всех полученных данных с данными прошлых лет – все это дает комплексный синоптический анализ метеорологической обстановки. Благодаря этому можно рассуждать об аномальной синоптической обстановке или об опасных погодных явлениях. Относительно зимне-весеннего периода года такими могут быть сход снежных лавин, весеннее снеготаяние и половодье.

Основным источником информации для выделения снежного покрова является альbedo поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Чистый, свежеснеженный снег в видимом диапазоне имеет альбе-

до, близкое к 1,0. Альbedo тающего, грязного (запыленного) снега может снизиться до 0,4.

Отражательная способность свежего снега очень велика в видимой части электромагнитного спектра, но она становится меньше ближе к инфракрасной части спектра, особенно если размер снежных зерен увеличивается. Вдобавок к этому промышленное загрязнение способствует появлению сажи на снегу, а наличие сажи уменьшает отражательную способность снега и ускоряет процесс его таяния.

Индекс NDSI – это единица измерения относительной величины, показывающая различие между отражательными способностями снега в видимом и инфракрасном излучениях. Для данных, полученных со спектрорадиометра MODIS, индекс NDSI вычисляется следующим образом:

$$NDSI = (f_4 - f_6) / (f_4 + f_6),$$

где f_4 – альbedo снега в четвертом канале ($\lambda = 0,545 \dots 0,565$ мкм), f_6 – альbedo снега в шестом канале ($\lambda = 1,628 \dots 1,652$ мкм).

Для решения поставленной задачи была разработана методика, которая состояла из представленных ниже этапов.

1. Обработка метеорологических данных с наземных станций. Из архива данных космических снимков были выбраны изображения с ноября 2010 г. по март 2011 г. Чтобы сделать выборку по метеостанциям, были установлены границы территории исследования, которая представляет собой прямоугольник с координатами $90^\circ \dots 100^\circ$ в. д., $50^\circ \dots 65^\circ$ с. ш. В результате была выбрана 21 метеостанция. Метеопараметры с каждой станции, за каждый день, были занесены в таблицы, рассчитаны средние значения исследуемых параметров и построены графики зависимости от даты, а также проведен синоптический анализ полученных результатов.

2. Определение метеорологических параметров с помощью спутниковых снимков. Используя зимние архивные космические снимки метеорологического характера со спутников Terra и Aqua за 2010 и 2011 г. и программу ART View, была проведена обработка данных дистанционного зондирования с выявлением таких метеорологических параметров, как высота верхней границы облачности, температура ВГО и количество осадков.

* Работа выполнена при поддержке гранта Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

3. Исследование спутниковых снимков для определения площади заснеженности территории. Для того чтобы провести классификацию спутниковых изображений, с помощью программного пакета ERDAS IMAGINE 9.1 были рассчитаны значения нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI) и снегового индекса (NDSI). После классификации были рассчитаны величины площадей заснеженности, занимаемых определенными классами снега на снимке, и определена общая заснеженность каждого бассейна.

Ниже представлены результаты экспериментов, полученные в ходе НИР.

Изучение метеорологических параметров с наземных станций. Основные метеорологические параметры для изучения снеговой обстановки на территории исследования, полученные с наземных метеостанций, для наглядности представим в виде графиков зависимости за ту или иную дату (рис. 1, 2, 3).

Изучение графика относительной влажности воздуха (рис. 1) показывает, что в исследуемый период ее значения колебались приблизительно от 51 до 84 %. Самая высокая влажность (83,71 %) была зафиксирована на исследуемой территории 15 января, а самая низкая – 26 марта 51,13 %.

Сравнив графики температуры (рис. 2) и точки росы (рис. 3), можно заметить, что по значениям кривые точки росы несколько смещены вниз относительно кривых температуры. И, взяв во внимание высокие значения влажности воздуха, следует отметить, что в насыщенном воздухе точка росы всегда ниже температуры воздуха.

Для комплексного синоптического анализа полученных данных рассчитаны также средние значения скорости ветра. Скорость ветра, как видно из графика (рис. 4), не достигала больших значений и колебалась в диапазоне от 0 до 4,4 м/с, что приводит к медленному движению воздушных масс, и, следовательно, к ежедневным выпадениям осадков.

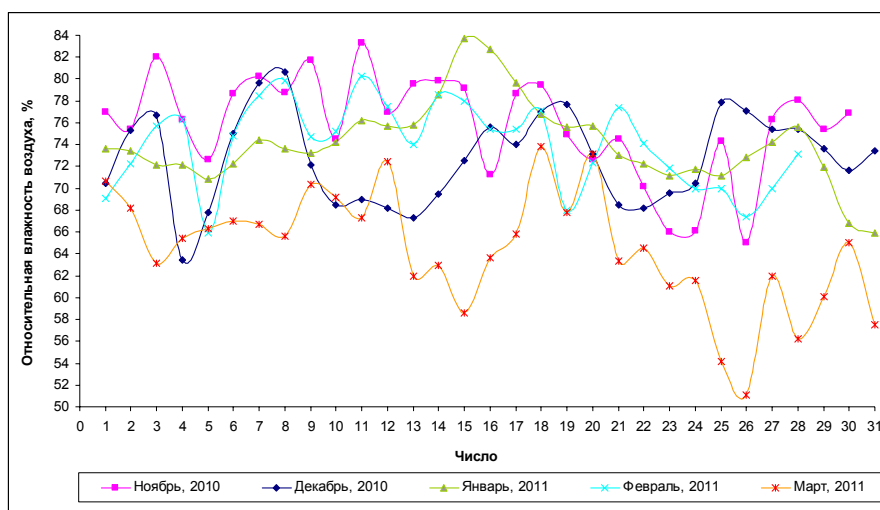


Рис. 1. Средние значения относительной влажности воздуха

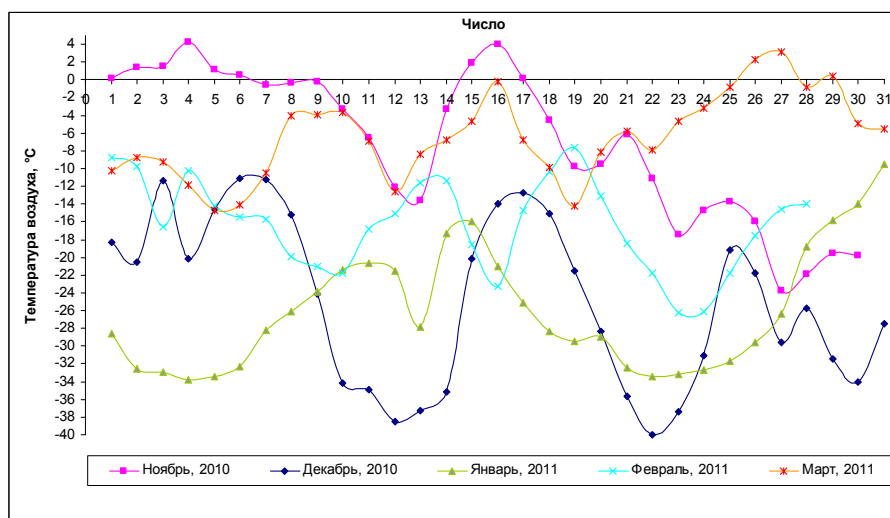


Рис. 2. Средние значения температуры воздуха

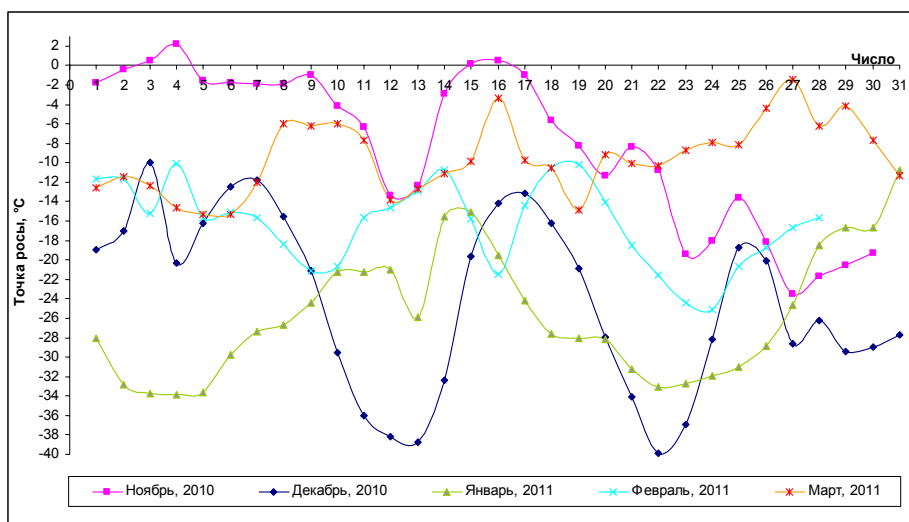


Рис. 3. Средние значения температуры точки росы

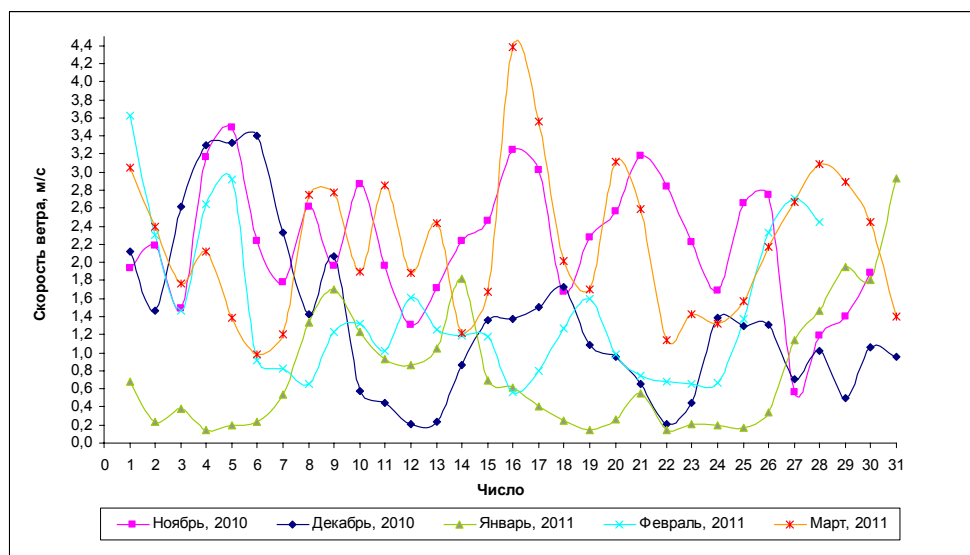


Рис. 4. Средние значения скорости ветра

Изучение метеорологических параметров со спутниковых снимков. В результате обработки космических снимков с изображением облачного покрова получен ряд синоптических параметров. Данные брались в тех точках на снимках, где географически располагаются пять метеостанций Красноярского края. Средние значения метеопказателей занесены в таблицы, а также построены графики зависимости, отражающие состояние атмосферы в зимний период (рис. 5, 6, 7).

Уже на начальном этапе определения метеорологических параметров по данным, полученным с космических снимков, было обнаружено, что самые низкие значения температуры ВГО соответствуют самым высоким показателям высоты ВГО и осадков. Иными словами, достаточно найти на исследуемой территории снимка точку с интенсивными осадками, чтобы

определить максимальное значение высоты ВГО и минимальное значение температуры ВГО.

Данный факт подтверждают результаты экспериментов, представленные на рис. 5, 6 и 7, где наблюдается, что обильным осадкам действительно соответствуют большие значения ВГО и минимальные значения температуры ВГО. Данные об изменении температуры ВГО целесообразно использовать для оценки эволюции облачного массива.

Осадки у Земли начинаются при температуре ВГО примерно -32° . Графики (см. рис. 5 и 6) указывают на подобную зависимость: при значениях температуры ВГО, близких к -32° и ниже, наблюдаются осадки в 4 и 5 мм.

Исследования показали, что период с ноября 2010 г. по март 2011 г. был снежным и холодным, но не аномальным.

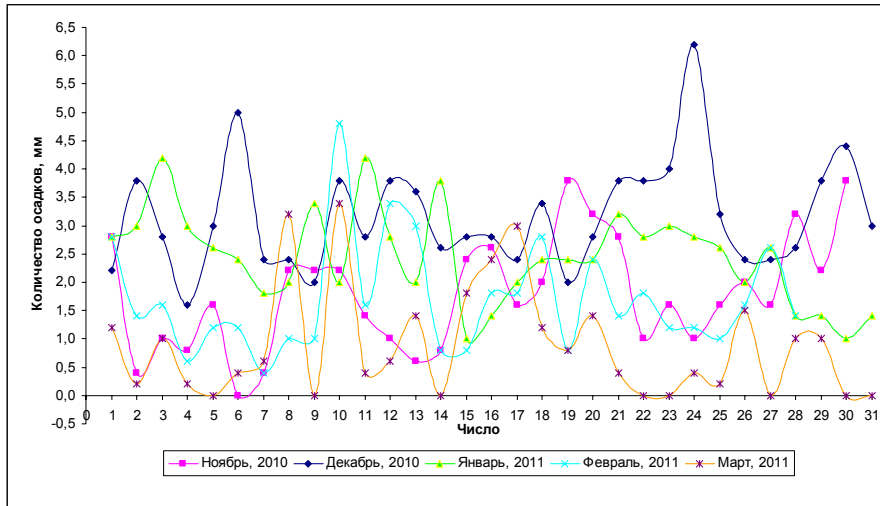


Рис. 5. Средние значения количества осадков

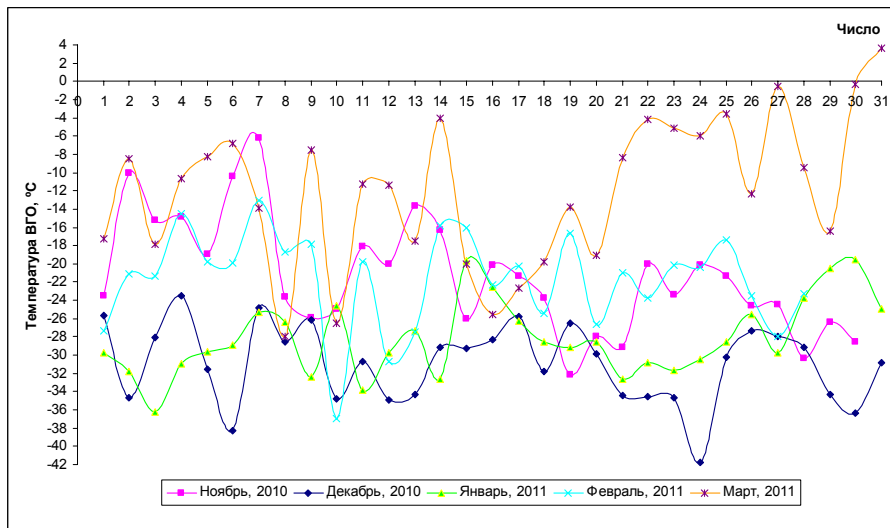


Рис. 6. Средние значения температуры верхней границы облачности

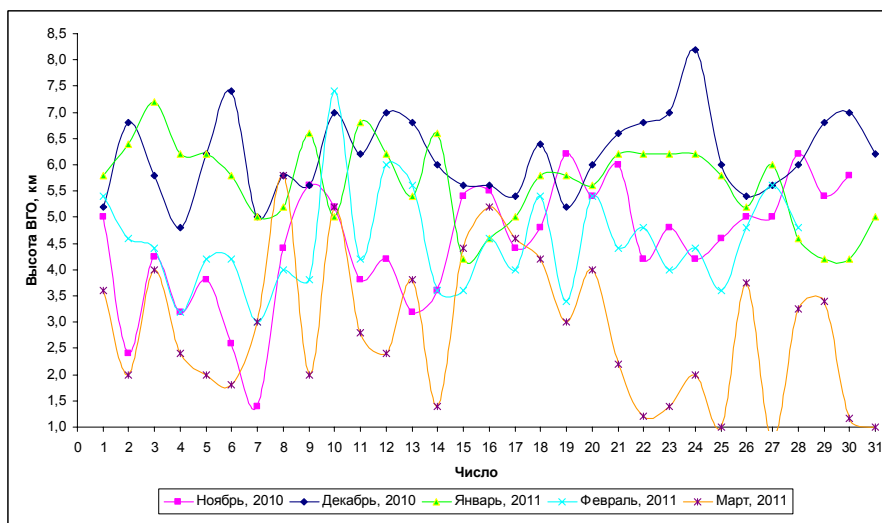


Рис. 7. Средние значения высоты верхней границы облачности

Сильный мороз – это низкая минимальная температура воздуха в течение продолжительного времени и $t_{\max} \leq -35^\circ$ в течение пяти суток. Столь низкие значения температуры воздуха на территории Сибирского федерального округа наблюдались в декабре (с 12-го по 14-е, 21-го и 22-го), но в течение непродолжительного срока (2...3 дней). Все это не характеризует исследуемый период как аномальный в отличие от периода с ноября 2009 г. по март 2010 г.

Определение площади заснеженности территории. Исследовались бассейны трех рек, протекающих на территории Сибирского федерального округа: Томи, Чулыма и Кана. Для обработки и анализа были выбраны снимки радиометра MODIS за период с февраля по апрель 2011 г. с пространственным разрешением в 250 м для первого и второго спектральных каналов и 500 м для четвертого и шестого каналов и созданы многоканальные изображения. Изображения бассейна р. Чулым, полученные с радиометра MODIS, представлены на рис. 8.

После расчета значений индексов NDVI и NDSI была проведена классификация изображений с использованием спектральных сигнатур для каждого класса в качестве обучающей выборки (рис. 9). Пиксели, соответствующие снеговому покрову, воде и льду, представлены во всевозможных оттенках синего

цвета; пиксели грязного или же талого снега – в сером или грязно-голубом цвете; пиксели растительности – в оттенках зеленого; пиксели почвы – в желтом; а пиксели изредка встречавшихся облаков – в белом цвете.

Полученные в ходе эксперимента значения нормализованного снегового индекса для выделенных классов снега представлены в таблице. В колонке «Характеристика» помещены названия классов, созданные в ходе классификации спутниковых снимков.

Следует заметить, по данным классификации, что грязный на самом деле снег, который имеет значения NDSI $\sim 0,6 \dots 0,7$ и выше, классифицировался как чистый и наоборот. Талый же снег на всех снимках был классифицирован верно. На снимке территории бассейна р. Томь за 16 апреля 2011 г. были обнаружены отрицательные значения NDSI, классифицированные как грязный снег. Скорее всего, это промышленные районы населенных пунктов (заводы, фабрики и т. д.), где снега уже не было или он очень грязный. Также стоит отметить, что среднее квадратическое отклонение уменьшается с ростом количества измерений и имеет высокие значения там, где классификация была проведена неточно. Из этого следует, что необходимо создавать больше классов при классификации спутниковых снимков и более точно отслеживать значения снегового индекса.

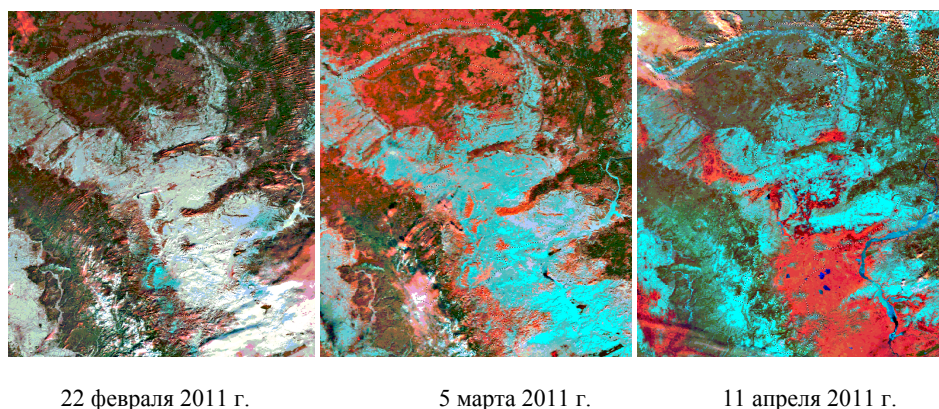


Рис. 8. Исходные спутниковые снимки бассейна р. Чулым (MODIS)

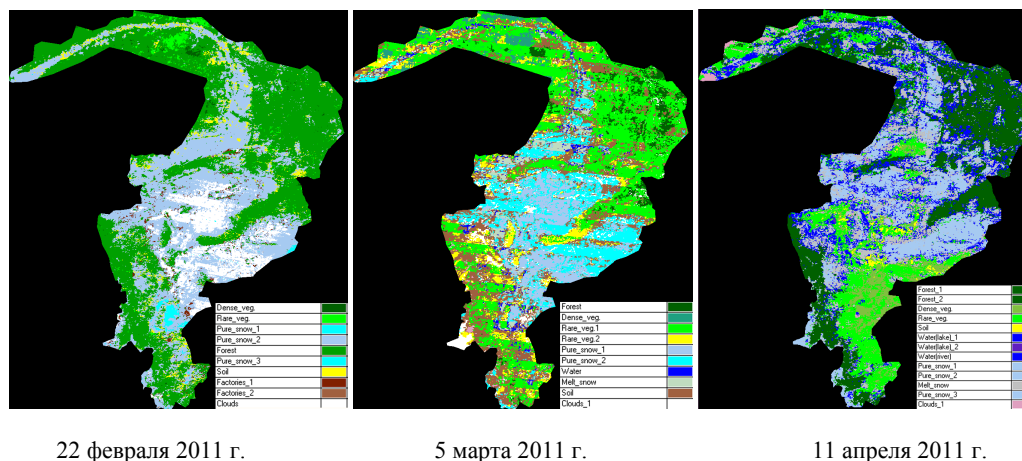


Рис. 9. Результат классификации изображений бассейна р. Чулым (MODIS)

Экспериментальные значения NDSI для выделенных классов снега

Бассейн реки	Дата снимка	Номер класса снега	Характеристика	Значения NDSI	Среднее квадратическое отклонение	S_s , км ²	x , %	
Томь	08.02.2011	1	Чистый 1	0,69	0,05	18 819,14	30,34	
		2	Чистый 2	0,67				
		3	Горный 1	0,63				
		4	Горный 2	0,63				
		5	Грязный 1	0,43				
		6	Грязный 2	0,39				
	13.03.2011	1	Чистый 1	0,73	0,04	39 247,75	63,27	
		2	Чистый 2	0,69				
		3	Горный	0,69				
		4	Горный	0,66				
		5	Чистый 3	0,72				
		6	Грязный	0,52				
		7	Грязный	0,48				
	16.04.2011	1	Чистый	0,77	0,21	20 405,27	32,90	
		2	Грязный 1	0,24				
		3	Грязный 2	-0,05				
		4	Горный	0,84				
		5	Грязный 3	-0,16				
	Чулым	22.02.2011	1	Чистый 1	0,71	0,08	29 920,98	22,33
2			Чистый 2	0,47				
3			Чистый 3	0,46				
05.03.2011		1	Чистый 1	0,73	0,03	23 189,68	17,31	
		2	Чистый 2	0,60				
		3	Талый	0,60				
		4	Чистый 3	0,55				
		5	Чистый 4	0,58				
11.04.2011		1	Талый 1	0,54	0,08	27 539,99	20,55	
		2	Чистый 1	0,89				
		3	Чистый 2	0,76				
		4	Талый 2	0,51				
		5	Чистый 3	0,90				
Кан		15.02.2011	1	Чистый 1	0,74	0,04	13 424,14	36,38
			2	Чистый 2	0,65			
	3		Грязный	0,55				
	4		Чистый 3	0,57				
	07.03.2011	1	Чистый	0,73	0,06	21 475,51	58,20	
		2	Горный	0,61				
		3	Грязный	0,53				
	15.04.2011	1	Чистый 1	0,81	0,17	5 701,064	15,45	
		2	Чистый 2	0,47				

Рассчитаны величины площадей заснеженности, занимаемые определенными классами снега на снимке, определена общая заснеженность каждого бассейна по формуле

$$x = \frac{S_S}{S_B} \cdot 100 \%,$$

где S_S – площадь бассейна, занимаемая снегом, км²; S_B – площадь речного бассейна, км². Результаты всех вычислений также занесены в таблицу.

По данным таблицы видно, что бассейны р. Томь и Кан больше всего были заснежены в марте (63 и 58 % соответственно) и самая высокая заснеженность наблюдается у бассейна Томи. Это объясняется тем, что за весь зимний период снег накапливается на земной и водной поверхности, площадь, которую он покрывает, растет и к марту становится максимальной, но уже к апрелю в связи с повышением температуры воздуха снег начинает постепенно стаять.

Таким образом, получены следующие результаты.

1. Определены метеорологические параметры, полученные с наземных станций. Сравнительный анализ графиков температуры воздуха и точки росы, а также невысокие значения относительной влажности от 51 до 84 % свидетельствуют о том, что период с ноября 2010 г. по март 2011 г. был снежным и холодным, но не аномальным в отличие от соответствующего периода прошлого года.

2. По данным дистанционного зондирования определены метеорологические элементы и установлено, что большие значения высоты ВГО и минимальные значения температуры ВГО соответствуют интенсивным осадкам за этот же период. Средние значения количества осадков составили в ноябре ($53,8 \pm 4,2$)

мм; в декабре ($97,6 \pm 3,3$) мм; в январе ($75,8 \pm 3,3$) мм; в феврале ($47,4 \pm 3,2$) мм; в марте ($27,2 \pm 5,3$) мм.

3. Исследована метеорологическая обстановка на территории СФО и установлено, что данные с наземных метеостанций и данные со спутниковых снимков хорошо согласуются и дополняют друг друга, что позволяет использовать совокупную оценку этих параметров для дополнения при исследовании динамики снегового покрова по данным MODIS [2].

4. Вычислены значения NDSI и NDVI, а также в результате классификации спутниковых изображений со спектрорадиометра MODIS рассчитаны величины площадей заснеженности, занимаемые определенными классами снега на каждом снимке и общая площадь заснеженности каждого бассейна.

5. В итоге разработана комплексная методика оценки динамики снегового покрова по спектрально-отражательным характеристикам снега.

На основе полученных результатов в следующем году планируется исследование спутниковых снимков загрязнения снегового покрова вокруг крупных городов СФО, а также изучение других параметров снега и создание модели прогноза талого стока сибирских рек с помощью полученной методики.

Библиографические ссылки

1. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие. М. : Логос, 2001.
2. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока / Д. А. Бураков, В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин и др. // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 100–109.

A. I. Sukhinin, M. V. Vorobiova, E. A. Okhotkina

REMOTE SENSING OF SNOW COVER IN SIBERIA ON DATA OF RADIOMETER MODIS

The authors present analysis of dynamics of snow cover of Siberian Federal District (SFD). Additionally, they present the theoretical basis of calculation of the index of snow cover based on the study of spectral reflectance and absorption characteristics of the snow. Therefore, the main objective of this research is to analyze the dynamics of snow cover of SFD in order to create a forecast model of snowmelt runoff of the Siberian rivers.

Keywords: Reflectance, meteorological parameters, ground stations, snow index, relative humidity, determining the area of snow cover.

© Сухинин А. И., Воробьева М. В., Охоткина Е. А., 2011