

Возможность использования продукта MODIS «snow cover» для характеристики пространственной структуры снежного покрова Предбайкалья

© 2014 г. Е.А. Истомина, Е.В. Максютова

Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

emaksyutova@irigs.irk.ru

Статья принята к печати 22 июля 2013 г.

Валидация, данные гидрометеостанций, космические снимки, появление и сход снега, толщина снега, устойчивый снежный покров, MODIS «snow cover».

MODIS «snow cover», snow appearance and melt, snow depth, space images, stable snow cover, validation, weather stations data.

Для территории Предбайкалья проведено сравнение дистанционных данных MODIS «snow cover» и материалов наблюдений сети гидрометеорологических станций (ГМС) за толщиной снежного покрова в зимы 2000/01, 2007/08, 2008/09 гг. разной снежности. На снимках MODIS «snow cover» с 80%-й достоверностью фиксируется снежный покров при толщине снега более 2 см, при этом несоответствия дешифрирования приходятся в основном на май и октябрь. Материалы космической съёмки дополняют и расширяют точечную информацию сети ГМС о пространственном распределении снега, особенно для горной части территории Предбайкалья, не охваченной наземными наблюдениями. По материалам дистанционного зондирования установлено, что снег раньше появляется и позже сходит на горных участках территории. Равнинные и котловинные участки отличаются более поздним появлением снежного покрова и ранним его сходом.

Введение

Для исследования пространственной структуры снежного покрова на региональном уровне традиционно используют данные гидрометеорологических станций (ГМС). Однако в условиях горных территорий материалов ГМС недостаточно, поэтому в последние годы активно внедряются методы дистанционного исследования снежного покрова по космическим снимкам. В последние 20 лет появился большой объём картографических материалов планетарного уровня, полученных с помощью космических снимков и отражающих характеристики снежного покрова. Съёмочные системы MODIS установлены на спутниках TERRA и AQUA системы исследования Земли NASA. Система ведёт одновременную съёмку в 36 каналах спектра – от 0,4 до 14,4 мкм [7]. На основе данных MODIS создаётся множество производных продуктов, среди которых: температура поверхности Земли; характеристика снежного покрова; классификация типов земной поверхности и их изменение и др.

К одному из наиболее ранних и широко используемых относится продукт «снежный покров», полученный на основе снимков MODIS (The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Он создаётся с использованием автоматического алгоритма, основанного преимущественно на вы-

числении нормализованной разницы между яркостью в видимом и коротковолновом диапазонах, а также на пороговых критериях, и отображает наличие или отсутствие снежного покрова на территории [9]. В свободном доступе на сайте National Snow and Ice Data Center (NSIDC, <http://www.nsidc.org>) есть эти данные с 2000 г. с пространственным разрешением 500 м и временным разрешением один или восемь дней, а также с пространственным разрешением 0,05° и временным разрешением один месяц. Апробирование продукта MODIS «snow cover» проводилось разными авторами [8, 9, 11–15]. В этих исследованиях данные MODIS сопоставлялись с материалами ГМС и дистанционными данными других съёмочных систем для различных территорий; при этом обосновывалось их хорошее соответствие (в среднем 80–90%).

Для гидрологического моделирования и прогнозирования стока важны такие характеристики, как запасы воды в снеге к началу весеннего снеготаяния, которые определяют объёмы весеннего речного стока. В Интернете доступен продукт «водный эквивалент снега» («snow water equivalent»), создаваемый на основе радиолокационных снимков AMSR-E/AQUA с временным разрешением один, пять дней или один месяц и пространственным разрешением 25 км (имеются данные с 2007 г.). Однако такое пространственное разре-

шение недостаточно для исследований на региональном уровне. Отметим, что в настоящее время не существует методов, позволяющих определить водный эквивалент снега с точностью, необходимой для гидрологического моделирования. Для этих целей можно использовать дистанционные данные о покрытых снегом территориях вместе с данными ГМС и наземных измерений толщины снежного покрова [10].

Постановка проблемы

В качестве объекта исследования выбрана территория Предбайкалья, которая относится к географическому региону Южной Сибири и расположена в пределах 50–64° с.ш. и 95–118° в.д. Территория Предбайкалья характеризуется континентальным климатом, который обуславливает большие амплитуды температур воздуха и неравномерное распределение атмосферных осадков по сезонам года. В холодный период года она находится в области действия сибирского антициклона, поэтому здесь выпадает мало осадков (15–35%) и снежный покров незначителен.

Согласно климатическому районированию М.И. Будыко, на рассматриваемой территории зима умеренно суровая и малоснежная: средняя температура в январе ниже –32 °С, а наибольшая средняя декадная толщина снежного покрова меньше 50 см. Продолжительность залегания снежного покрова в среднем составляет 180 дней в году, а в некоторых районах – 200 дней и более. В конце августа – первой половине сентября снежный покров появляется в высокогорных районах, но на большей части территории первый снег отмечается в первой – второй декаде октября, а на севере территории – в конце сентября – первой половине октября. Устойчивый снежный покров, который сохраняется в течение всей зимы или имеет перерывы не более трёх дней подряд в течение месяца, образуется через 10–15 дней после первых снегопадов на севере и через 20–30 дней на юге территории [6]. В 1961–2010 гг. отмечалась значительная изменчивость толщины снежного покрова и снегозапасов на уровне биогеографических областей и провинций [3].

Быстрее всего толщина снега увеличивается в ноябре–декабре, когда повторяемость циклонической погоды ещё значительная. Своей максимальной величины снежный покров достигает в феврале–марте, а на хр. Хамар-Дабан – в начале апреля. Основная часть территории освобождается от снега к концу апреля, а на севере и в гор-

ных районах – в первой половине мая. Территория исследования характеризуется наличием равнин (абсолютные высоты 200–500 м), плато и горных хребтов (1500–2000 м и более), глубоко врезаемых речных долин разной ширины и ориентации, водной массы оз. Байкал.

Ландшафтная структура территории Предбайкалья – сложная и контрастная. Здесь контактируют два крупных региона – Байкало-Джугджурская и Южно-Сибирская физико-географические области; сочетаются три типа природной среды: тундровый, таёжный и степной; отмечается широкий спектр ландшафтов: гольцовые, подгольцовые, горно-таёжные, горно-лесные, горно-лесостепные (подтаёжные), горно-степные, горно-сухостепные и опустыненно-степные [5]. Более 90% территории, покрытой древесной растительностью, занимают таёжные и подтаёжные ландшафты [2].

Основная особенность Предбайкалья, как и других горных территорий, – контрастность условий, разнообразие ландшафтов и сложность их пространственно-временной организации. Это обуславливает большой разброс количественных характеристик ландшафтных выделов, в том числе и характеристик снежного покрова, что позволяет на примере относительно небольшой территории провести сравнительный анализ и систематизацию сильно отличающихся природных объектов. Цель работы – на основе материалов наблюдений ГМС за толщиной снежного покрова для различных по снежности зим в период 2000–2010 гг. и дистанционных данных MODIS «snow cover» определить их соответствие для территории Предбайкалья, а также выявить пространственные особенности формирования и разрушения здесь снежного покрова.

Методика исследований

В качестве исходных наземных данных использовались материалы наблюдений на 74 гидрометеорологических станциях (ГМС) Иркутского управления гидрометеослужбы и частично Бурятского республиканского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ГМС Баргузинский заповедник и Большой Ушканий остров) за средней декадной толщиной снежного покрова по постоянной рейке [4]. При анализе рассматривалась средняя месячная толщина снежного покрова. Регулярные ежедневные наблюдения за снежным покровом в сети ГМС Росгидромета предусматривают фиксацию следующих характеристик: даты появления и схода; даты

Число несоответствий данных MODIS «snow cover» и наблюдений на гидрометеостанциях

Наличие снега по данным MODIS	Наличие снега по данным ГМС	Месяц									
		IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	
<i>2000/01 г. – неустойчиво-снежный тип зимы</i>											
Нет	Есть	9	10	2	0	0	0	0	1	24	
	Есть, снег выше 2 см	1	3	1	0	0	0	0	0	2	
Есть	Нет	10	2	0	1	0	0	0	0	6	
Покрыто более 50% площади пиксела		0	0	0	0	0	0	0	0	1	
<i>2007/08 г. – среднеснежный тип зимы</i>											
Нет	Есть	1	22	4	0	0	0	2	14	26	
	Есть, снег выше 2 см	0	3	0	0	0	0	1	8	14	
Есть	Нет	6	1	0	0	0	0	2	0	7	
Покрыто более 50% площади пиксела		0	0	0	0	0	0	2	0	0	
<i>2008/09 г. – многоснежный тип зимы</i>											
Нет	Есть	4	18	3	2	0	0	0	4	27	
	Есть, снег выше 2 см	2	2	0	0	0	0	0	3	9	
Есть	Нет	12	3	0	1	1	1	0	2	3	
Покрыто более 50% площади пиксела		1	0	0	0	1	1	0	1	0	

образования и разрушения устойчивого снежного покрова; толщины снега. День со снежным покровом считается, когда более половины видимой окрестности ГМС покрыто снегом. При этом залегание его может быть как устойчивым, так и неустойчивым. Под устойчивым понимается снежный покров, который держится непрерывно в течение зимы или с перерывами не более трёх дней подряд или в отдельности в течение 30 дней его залегания. Раннее установление снежного покрова предохраняет почву от глубокого промерзания. Это способствует раннему почвенному оттаиванию и впитыванию большего количества влаги весной.

За период 2000–2010 гг. были выбраны годы, отличающиеся по динамике снежного покрова в зависимости от типа зимы. В процессе исследования использована схема Н.Н. Галахова [1], согласно которой мало- или многоснежной считается зима, когда средние декадные толщины снежного покрова отличаются на $\pm 25\%$ и более от средних многолетних [6] в течение $2/3$ зимы. К среднеснежной относится зима, если отклонения от средних многолетних декадных величин в ту или другую сторону меньше 25%. Неустойчиво-снежной считается зима с резкими колебаниями толщины снега от положительных к отрицательным и наоборот в течение всей зимы или между её первой и второй половинами.

В качестве дистанционных данных для анализа использовались материалы MODIS «snow cover» с

временным разрешением один месяц и пространственным разрешением $0,05^\circ$ (3–5 км) (название продукта – MOD10CM) с сентября по май 2000–2010 гг. Данные представляют собой растровое изображение с пространственной привязкой. Яркость пикселей изменяется от 1 до 100 и соответствует доли площади пиксела, покрытой снегом (например, при яркости 15 покрыто снегом 15% площади пиксела, при яркости 100 – 100% площади пиксела). Такое изображение удаётся получить, потому что данный продукт представляет собой производное от снимков с более высоким пространственным разрешением.

Чтобы проанализировать сходимость данных по 74 ГМС и MODIS «snow cover», для каждой ГМС было снято значение со снимка MODIS «snow cover» для всех месяцев исследуемого периода. Затем были составлены две матрицы значений – M_{ij} и S_{ij} , где M – средняя месячная толщина снега по данным ГМС, S – доля площади, покрытая снегом по данным MODIS «snow cover», i – гидрометеорологическая станция, j – месяц исследуемого периода. После сравнения M_{ij} и S_{ij} выделено четыре типа несоответствий: 1) нет снега по снимку MODIS – есть снег по данным ГМС; 2) нет снега по снимку MODIS – есть снег выше 2 см по данным ГМС; 3) есть снег по снимку MODIS – нет снега по данным ГМС; 4) более 50% пиксела покрыто снегом по снимку MODIS – нет снега по данным ГМС (таблица).

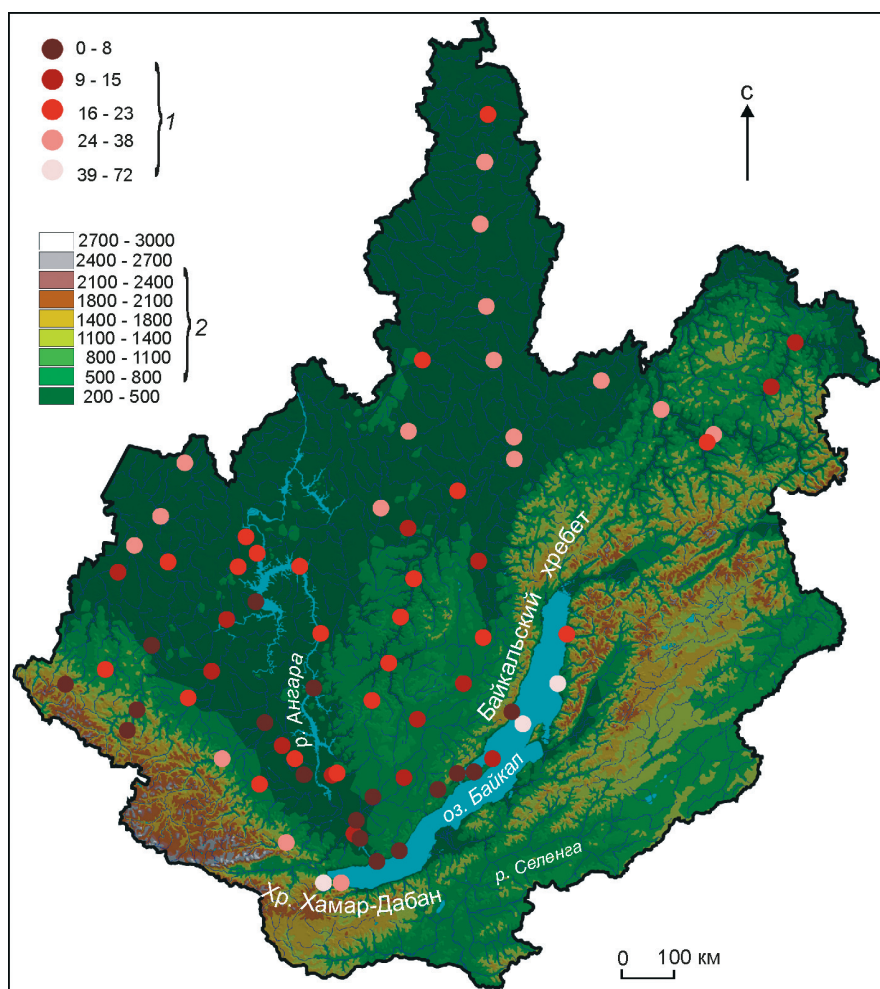


Рис. 1. Расположение гидрометеостанций и рельеф территории исследований:

1 – гидрометеостанции и средняя толщина снега (см) за декабрь 2000 г.; 2 – абсолютная высота, м над ур. моря

Fig. 1. Position of weather stations and topography of research territory:

1 – weather stations and snow depth in December 2000, cm; 2 – altitude a.s.l., m

Результаты исследования

Для анализа пространственного распределения границ снежного покрова выбраны годы с разной снежностью зим. Для 31 ГМС, по которым есть средние многолетние величины [6], рассмотрена динамика отклонений средних декадных толщин снежного покрова за период 2000–2010 гг. Установлено, что наибольшее число отклонений средних декадных толщин снежного покрова на ГМС (13–67%) относится к многоснежному типу зим. Среднеснежный тип зим отмечался в 13–50%, а неустойчивый и малоснежный – в 7–23 и 3–24% соответственно. Так, холодный период 2000/01 г. относится к неустойчиво-снежному типу зим, 2007/08 г. – к среднеснежному, а 2008/09 г. – к многоснежному, при этом год с малоснежным типом не выделен. Наибольшее число отклонений средних декадных толщин снежного покрова для малоснежных типов зим (24%) отмечалось зимой 2007/08 г., которая, согласно данным большинства станций (50%), отнесена к среднеснежному типу.

Используемые для анализа соответствия дистанционные и наземные данные по 74 ГМС представлены на рис. 1. Метеостанции в основном расположены на равнинных территориях и в межгорных котловинах, на высотах 400–600 м, что затрудняет пространственный анализ снежного покрова, так как более половины исследуемой территории относится к горным участкам. Только ГМС Хамар-Дабан, находящаяся на высоте 1442 м в северных отрогах хр. Хамар-Дабан, расположена в пределах горно-таёжного ландшафта. Здесь отмечается максимум снегонакопления. Влияние местных особенностей проявляется на берегу оз. Байкал и на его островах, а также в глубоко врезанных долинах рек в предгорьях Восточного Саяна (ГМС Алынджер, Верхняя Гутара).

Большое число пикселей на изображениях для различных по снежности зим (от 1 до 27, что соответствует 36%) отнесено к незаснеженным участкам по снимкам, тогда как по данным ГМС на этих территориях отмечен снежный покров (см. табли-

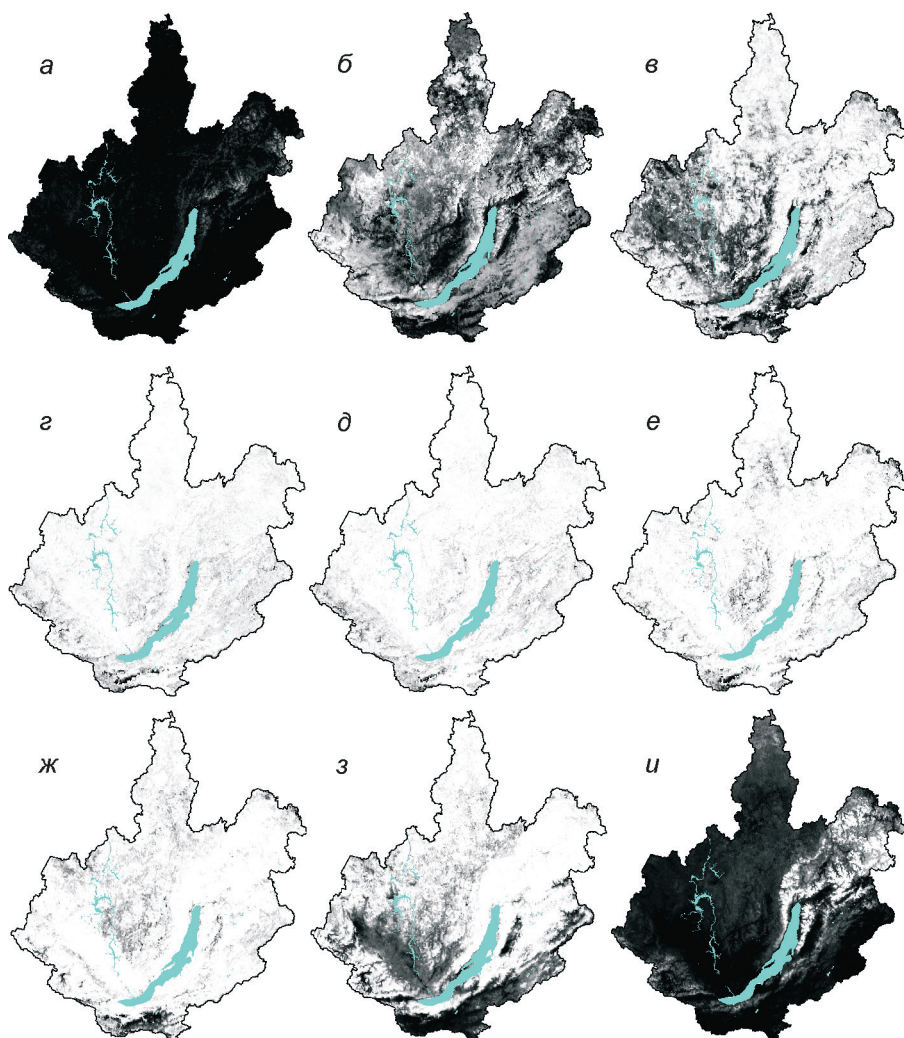


Рис. 2. Распределение снежного покрова на территории в 2000/01 г.:

а – сентябрь; *б* – октябрь; *в* – ноябрь; *г* – декабрь; *д* – январь; *е* – февраль; *ж* – март; *з* – апрель; *и* – май; цвет отражает долю территории в данном пикселе, которая покрыта снегом: чёрный цвет – совсем не покрыта; белый – полностью покрыта; зелёный – водные объекты

Fig. 2. Variability of snow cover in 2000/01:

a – September; *б* – October; *в* – November; *г* – December; *д* – January; *е* – February; *ж* – March; *з* – April; *и* – May; colour conforms to the fraction of territory that is covered with snow: black – fully not covered; white – fully covered; green – water surface

цу). Этот тип несоответствий приходится на сентябрь–октябрь и май, когда устойчивый снежный покров только образуется или уже разрушается. Но если считать покрытыми снегом только те территории, где толщина снежного покрова более 2 см, то число несоответствий сокращается до 1–3 точек в сентябре–октябре (1–4%) и до 2–14 точек – в мае (3–19%). При этом две точки отмечаются в неустойчивоснежную зиму 2000/01 г., а 14 точек – в среднеснежную зиму 2007/08 г. Следовательно, на снимках MODIS «snow cover» с более высокой степенью достоверности фиксируется снежный покров при толщине снега более 2 см, а несоответствия дешифрирования приходятся в основном на май и октябрь для различных по снежности зим.

Число точек, которые по снимкам отнесены к участкам с наличием снежного покрова, а по данным ГМС снег на них отсутствует, максимально в сентябре (см. таблицу). Наибольшее число точек

(16%) отмечено в многоснежную зиму 2008/09 г. Такая ситуация вполне возможна, так как размер пиксела на местности равен $0,05^\circ$ (3–5 км), в то время как данные ГМС относятся к точечным. При учёте пикселей, заснеженность которых превышает 50%, число несоответствий минимально и составило 1% в мае 2001 г. и сентябре 2009 г. Все несоответствия этого типа относятся к лесным участкам. Это можно объяснить тем, что снег в лесу тает медленнее, особенно в весенний период, поэтому на открытых участках ГМС снежный покров уже разрушился, а в лесу ещё лежит.

Детальный анализ данных ГМС и изображений по космическим снимкам проведён для зимы 2000/01 г. (рис. 2). На территории Предбайкалья при неустойчиво-снежном типе зимы первый снег появился в первой декаде сентября в южной, горной части территории: на хр. Хамар-Дабан (ГМС Хамар-Дабан, толщина снега 15 см), на Тункинских

гольцах (ГМС Алыгджер, толщина снега 1 см), а также на Верхнеангарском хребте и в северной части Баргузинского хребта. В октябре почти полностью не покрытыми снегом остаются территория Предбайкальской впадины, а также котловины байкальского типа. Частично покрыты снегом Иркутско-Черемховская равнина и Лено-Ангарское плато. Самые поздние сроки появления снега – вторая декада октября на ГМС Большой Ушканий остров, которая находится в средней части оз. Байкал. Устойчивый снежный покров наблюдается с первой декады октября на севере территории (ГМС Токма). К концу октября снегом покрыта уже большая часть Предбайкалья, за исключением южной части территории (ГМС Нижнеудинск, Зима, Усть-Ордынский, Иркутск) и средней части оз. Байкал (ГМС Большой Ушканий остров), где снег установился уже в первой – второй декаде ноября, а также ГМС Алыгджер, расположенной в глубоко врезанной узкой долине р. Уда, где снежный покров зафиксирован только в третьей декаде декабря.

По данным наземных наблюдений, самое раннее разрушение устойчивого снежного покрова отмечалось в горной западной части Восточного Саяна во второй декаде февраля (ГМС Алыгджер). Во второй декаде марта снежный покров разрушается в южной части побережья оз. Байкал (ГМС Большое Голоустное). В основном на территории Предбайкалья устойчивый снежный покров разрушался в конце апреля – начале мая, а его сход отмечался с конца апреля – до середины мая. Наиболее поздние сроки разрушения устойчивого снежного покрова и его схода отмечаются в южной горной части территории (ГМС Хамар-Дабан) в последней декаде мая. Согласно дистанционным данным, сход снега начинается в марте с южного макросклона хр. Малый Хамар-Дабан, Тункинской и Баргузинской долин, Верхнеангарской впадины, Лено-Ангарского плато. В апреле почти полностью освобождаются от снега южная часть исследуемой территории, Тункинская и Баргузинская долины, а также Иркутско-Черемховская равнина. В мае снег остаётся только на горных участках исследуемой территории.

Сроки образования и разрушения устойчивого снежного покрова рассматриваемых зим колеблются в широких пределах. Устойчивый снежный покров в целом на территории формируется в течение 79 дней при неустойчиво-снежном типе зим, 41 дня – при среднеснежном и 59 дней при многоснежном. Устойчивый снежный покров разрушается в течение 98 дней при неустойчиво-снежном

типе зим, 80 дней при среднеснежном и 105 дней при многоснежном типах зим. При неустойчиво-снежном типе зимы 2000/01 г. на ГМС Хамар-Дабан сход снега был ранним и отмечался в третьей декаде мая. В конце многоснежной зимы 2008/09 г. самые крайние сроки схода снежного покрова на ГМС Хамар-Дабан отмечались в третьей декаде июня.

Заключение

Для территории Предбайкалья определено соответствие дистанционных данных MODIS «snow cover» и материалов наблюдений сети ГМС за толщиной снежного покрова в годы, соответствующие различным по снежности зимам. На снимках MODIS «snow cover» с 80%-й достоверностью фиксируется снежный покров при толщине снега более 2 см, при этом несоответствия дешифрирования для разного типа зим приходится в основном на май и октябрь. В сентябре–октябре и мае, когда устойчивый снежный покров только образуется или уже разрушается, соответствие дистанционных и наземных данных составляет 64%.

По данным MODIS и наблюдениям на ГМС выявлены пространственные особенности формирования и разрушения снежного покрова на исследуемой территории. Материалы космической съёмки дополняют и расширяют точечную информацию сети ГМС о появлении и сходе снежного покрова, позволяют определить границы и дать пространственную характеристику распределения снежного покрова по территории Предбайкалья, особенно для её горной части, не охваченной наземными наблюдениями. По материалам космической съёмки установлено, что снег раньше появляется и позже сходит на горных участках территории (хр. Хамар-Дабан, Тункинские гольцы, Верхнеангарский и Баргузинский хребты). Равнинные и котловинные участки (Тункинская и Баргузинская долины, Верхнеангарская впадина, Лено-Ангарское плато, Иркутско-Черемховская равнина) характеризуются наиболее поздним появлением и ранним сходом снега.

Дистанционные данные перспективны для изучения пространственно-временной динамики распределения снежного покрова. Данная работа – начальный этап исследования, т.е. апробация возможности использования материалов космической съёмки в сочетании с данными ГМС для анализа границ снежного покрова. В дальнейшем планируются расширение периода наблюдений, а также привлечение более широкого спектра дистанционных материалов, включая данные в радиодиапазо-

не, содержащие информацию о толщине снежного покрова, что позволит исследовать современную пространственно-временную динамику снежного покрова Прибайкалья.

Литература

1. *Галахов Н.Н.* Выделение типов зим по высоте и динамике снежного покрова на большей части территории СССР // Роль снежного покрова в природных процессах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 11–26.
2. Ландшафты юга Восточной Сибири. М-б 1:1 500 000 / В.С. Михеев, В.А. Ряшин. М.: изд. ГУГК, 1977. 4 л.
3. *Максимова Е.В.* Многолетние колебания толщины снежного покрова и максимальных снегозапасов на территории Предбайкалья // Лёд и Снег. 2013. № 2 (122). С. 40–48.
4. Метеорологический ежемесячник: Вып. 22. Ч. 2. Иркутск: изд. Иркутского управления гидрометеослужбы, 2000–2010 гг.
5. *Михеев В.С.* Ландшафты Байкальского региона: структура, оценка состояния, проблемы // География и прир. ресурсы. 1995. № 3. С. 68–78.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3. Вып. 22. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 604 с.
7. *Barnes W.L., Pagano T.S., Salomonson V.V.* Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1 // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. № 36 (4). P. 1088–1100.
8. *Bitner D., Carroll T., Cline D., Romanov P.* An assessment of the differences between three satellite snow cover mapping techniques // Hydrological Processes. 2002. V. 16. P. 3723–3733.
9. *Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., Barton J.S., Casey K., Chien J.Y.L., Di Girolamo N.E., Klein A.G., Powell H.W., Tait A.B.* Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms, available at: <http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/atbd01.html>, 2001.
10. *Hall D.K., Riggs G.A.* Accuracy assessment of the MODIS snow products // Hydrological Processes. 2007. V. 21. P. 1534–1547.
11. *Klein A.G., Barnett A.C.* Validation of daily MODIS snow cover maps in the Upper Rio Grande River Basin for the 2000–2001 snow year // Remote Sensing of the Environment. 2003. V. 86. P. 162–176.
12. *Maurer E.P., Rhoads J.D., Dubayah R.O., Lettenmaier D.P.* Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS // Hydrological Processes. 2003. V. 17. P. 59–71.
13. *Parajka J., Blöschl G.* Validation of MODIS snow cover images over Austria // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2006. V. 10. P. 679–689.
14. *Tekeli A.E., Akyurek Z., Sorman A.A., Sensoy A., Sorman A.U.* Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey // Remote Sens. Environ. 2005. V. 97. P. 216–230.
15. *Zhou X., Xie H., Hendrickx J.M.H.* Statistical evaluation of remotely sensed snow cover products with constraints from streamflow and SNOTEL measurements // Remote Sensing of the Environment. 2005. V. 94. P. 214–231.

Summary

Validation of remote sensing data MODIS «snow cover» in the period from September to May 2000/01, 2007/08, 2008/09 is realized on the base of weather stations data. Good repeatability of weather stations data and snow cover data is shown (more than 80% when snow depth is exceeds 2 cm). The minimum accuracy is in May and October for the variety of snowfall winters. Remote sensing data give possibility to extend the dot information of hydrometeorological stations network on the spatial snow distribution to the mountainous area of Predbajkalje where ground-based observations are absent. According to remote sensing earlier appearance and later melting of snow in mountain areas were identified. The plains and basins areas are characterized by later appearance and earlier melting of snow.