УДК 551.578.46(470.311)«2000/2018» doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-43-58

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ (2000—2018 гг.)

Е.В. Чурюлин[1, 2], Е.Ю. Жданова[1]

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
evgenychur@gmail.com
[2] Гидрометцентр России

Пространственная изменчивость и временные изменения параметров снежного покрова на территории Москвы и Московской области рассматриваются на основе стандартных метеорологических измерений. Плотность снега и водный эквивалент снежного покрова за период 2000 — 2018 гг. были получены с использованием одномерной многослойной модели *SnoWE* для территории Московского региона. Сравнения со снегомерными маршрутными съемками показали, что восстановленный водный эквивалент снежного покрова недооценен, а плотность снега завышена. Альбедо поверхности при наличии снежного покрова в Москве изменялось от 52 до 67 %, коэффициент вариации альбедо поверхности составил 7 % за период с 2001 по 2017 г. Спутниковые данные *MODIS* по альбедо снежного покрова (коллекция *MOD10A1*) сопоставимы с результатами наземных точечных измерений для Москвы в случае однородного покрытия спутникового пикселя снегом.

Ключевые слова: Синоптические наблюдения, модель снежного покрова *SnoWE*, запас воды в снеге, плотность снега, альбедо снега, многолетние измерения.

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF SNOW COVER CHARACTERISTICS IN MOSCOW REGION IN RECENT DECADES (2000 — 2018)

E.V. Churyulin[1, 2], E.Yu. Zhdanova[1]

[1] Lomonosov Moscow State University
[2] Hydrometcenter of Russia

Spatial variability and temporal changes in snow cover characteristics over the territory of Moscow and the Moscow region are considered based on standard meteorological measurements. Snow density and snow water equivalent for the period 2000—2018 were retrieved by using one-dimensional multilayer SnoWE model for the territory of Moscow region. Comparisons with snow route measurements have shown that retrieved snow water equivalent is underestimated and snow density is overestimated. The interannual variations of surface albedo in presence of snow cover in Moscow range from 52 to 67 %, coefficient of variation is 7 % for the period 2001 — 2017. MODIS satellite data of snow cover albedo (MOD10A1 collection) are comparable with ground-based point measurements for Moscow in the case of homogeneous coverage with snow of satellite pixel.

Keywords: synoptic observations, snow cover model SnoWE, snow water equivalent, density of snow, snow albedo, long-term measurements.

Введение

Характеристики снежного покрова являются климатически значимыми параметрами. К основным характеристикам снежного покрова относятся запас воды в снежном покрове, который зависит от толщины снежного покрова и его плотности, а также альбедо. Альбедо снежной поверхности зависит от размера снежных зерен и содержащихся в снежном покрове примесей [13].

Часто для исследования пространственно-временной динамики развития снежного покрова используются данные станционных метеорологических наблюдений или маршрутных снегомерных съемок. В работе [9] по данным маршрутных снегосъёмок показано, что в последние годы толщина снежного покрова на северо-востоке европейской части России стала на 40 % меньше по сравнению с периодом 1966—2000 гг. и в то же время наблюдается увеличение толщины снежного покрова в ряде регионов юга европейской части России. Выявлено, что положительный тренд толщины снежного покрова за 1986—1995 гг. составил 0,4 см/год для Европейской равнины [5]. Было определено, что тенденция увеличения снегозапасов на Восточно-Европейский равнине связана с увеличением снегозапасов в январе [3]. Возможные связи между изменениями атмосферной циркуляции и современной зимней аккумуляции снега рассмотрены в работе [10].

По данным за 50-летний период (до 2005 г.) для территории Москвы было выяснено, что даты образования и разрушения снежного покрова смещались в одном направлении, а число дней со снежным покровом и высота снежного покрова существенно не изменились [6]. Восстановить тонкую структуру снежного покрова возможно с помощью использования специального оборудования, в частности пенетрометра высокого разрешения [4]. Кроме наземных данных, для определения состояния снежного покрова, оценки водного эквивалента снега, альбедо поверхности, площади снежного покрова могут применяться данные спутникового зондирования Земли. Однако в случае восстановленного водного эквивалента снежного покрова наблюдаются существенные расхождения с наземными данными [7]. Кроме того, стоит отметь, что характеристики снежного покрова с высоким пространственным и временным разрешением можно получить с помощью численных моделей снежного покрова [11].

Основная задача настоящей работы заключается в определении пространственной изменчивости характеристик снежного покрова (высоты снежного покрова, запаса воды в снеге, отражательных свойств снежного покрова) и их временных изменений в масштабе отдельного региона (Москва и Московская область). Отличительной особенностью работы является использование полученных за последние два десятилетия данных стандартных метеорологических наблюдений, результатов численных расчетов, которые позволили восстановить ежедневный запас воды в снежном покрове, и данных спутниковых измерений.

Материалы и методы

В настоящей работе использованы данные о высоте снежного покрова, полученные по данным метеорологических станций, расположенных на территории

Москвы и Московской области, в том числе данные метеорологической обсерватории МГУ за период 2000—2017 гг. Расположение метеорологических станций показано на рис. 1: пять метеорологических станций располагается в Москве и 11 станций — в Московской области.

Для восстановления водного эквивалента снежного покрова использовалась усовершенствованная одномерная многослойная модель снежного покрова SnoWE [2,12], которая является обособленной частью мезомасштабной прогностической модели COSMO-Ru [1]. Модель SnoWE разработана в Гидрометцентре России в рамках деятельности международного консорциума COSMO при сотрудничестве с проектом ESSEM COST Action ES1404 (http://www.harmosnow.eu/).

Расчет водного эквивалента снежного покрова в модели выполняется в зависимости от метеорологических условий на метеостанции за предыдущий день. В зависимости от состояния снежного покрова в модели реализованы три расчетных сценария: 1) снег на метеостанции в предыдущий день отсутствовал — имеется свежевыпавший снег; 2) наблюдался снежный покров в предыдущий день — имеется снежный покров; 3) снег на метеостанции отсутствовал в течение предыдущих пяти дней, и среднесуточная температура воздуха устойчиво превышала 0 °C. В случае выпадения атмосферных осадков в виде снега с дождем или дождя в первую очередь требуется определить, что происходило со снежным покровом за предыдущий день. Если снежный покров отсутствовал, тогда расчет водного эквивалента и его плотности не выполняется из-за отсутствия прироста высоты снежного покрова. Если же на метеостанции наблюдался снежный покров, расчет

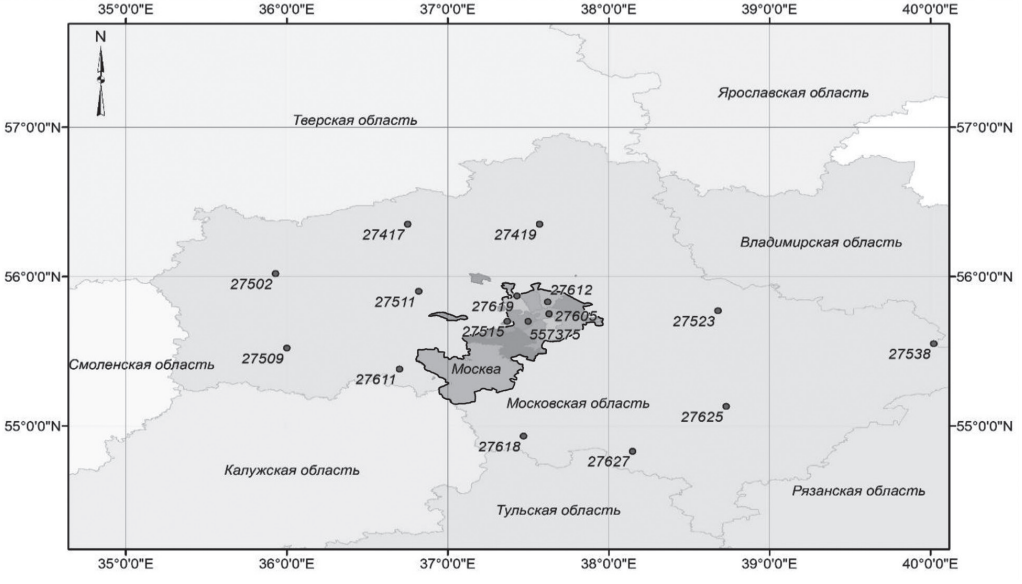

Рис. 1. Расположение метеорологических станций
на территории Москвы и в Московской области.

идет по второму сценарию. Второй сценарий расчета содержит три варианта развития снежного покрова на метеорологической станции в зависимости от его изменения: 1) высота снежного покрова увеличилась; 2) высота снежного покрова не изменилась; 3) высота снежного покрова уменьшилась. В случае увеличении высоты снежного покрова в модели реализованы два подхода к решению задачи расчета запаса воды в снежном покрове: 1) выпал сухой снег; 2) выпал мокрый снег, в том числе учитывается возможность выпадения снега с дождем. В случае уменьшения высоты снежного покрова также реализованы два подхода в зависимости от причины, которая вызвала уменьшение высоты снега: 1) высота снежного покрова уменьшилась за счет сдувания и уплотнения снежного покрова под действием ветра; 2) высота снежного покрова уменьшилась из-за того, что часть снежного покрова растаяла или выпали атмосферные осадки в виде дождя, вследствие чего произошло уплотнение нижележащих слоев снежного покрова под воздействием вышележащих слоев снега [12].

Работа модели снежного покрова SnoWE основывается на использовании стандартных метеорологических данных (приземная температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м, высота снежного покрова, осадки), поступающих в синоптическом коде SYNOP по каналам связи Всемирной метеорологической организации, информации полей первого приближения (поля водного эквивалента и плотности снега) из оперативной системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru на основе данных, поступающих из системы усвоения Немецкой службы погоды (DWD), информации о границах снежного покрова (спутниковые данные, NOAA, пространственное разрешение 4 км).

Расчет по модели SnoWE с 2015 г. выполняется в Гидрометцентре РФ в квази-оперативном режиме на сетках модели COSMO-Ru для трех регионов Российской Федерации с различным пространственным шагом (Центральный федеральный округ — 2,2 км (ЦФО, COSMO-Ru2), Восточно-Европейская равнина — 7 км (ЕТР, COSMO-Ru7), Россия — 13,2 км (ENA, COSMO-Ru13)).

В настоящей работе использовалась сетка ЦФО и режим работы модели SnoWE для станций. Кроме того, был разработан алгоритм и создан макет для фактической метеорологической информации, который позволяет преобразовать фактическую архивную информацию в пригодный для работы с моделью вид. Данное нововведение расширило возможности реализации расчетов модели SnoWE, сделав возможным использовать различные архивы синоптической информации, например информацию с базы данных ВНИИГМИ — МЦД, расположенной на веб-ресурсе http://meteo.ru/.

Для валидации восстановленных запасов воды в снеге по модели SnoWE были использованы результаты маршрутных снегомерных съемок.

Для характеристики пространственного распределения альбедо снега использовались данные MODIS коллекции MOD10A1 по данным спутника Terrra [15] за период 2000—2017 гг. с пространственным разрешением 500 м, в том числе были использованы альбедо снежного покрова и нормализованный дифференцированный снежный индекс NDSI, который представляет собой отношение разности и суммы яркости в каналах 4 и 6 (555 и 1640 нм). При этом учитывается маска

облачности, поскольку облака, как и снег, хорошо отражают излучение в видимой части спектра и поглощают его в инфракрасной. Пороговое значение индекса *NDSI* принималось равным 0,4. Все пиксели, имеющие значение индекса больше порогового, рассматривались как заснеженные [8]. Пиксель считается полностью заснеженным, если индекс NDSI превышает 0,7 [14].

Результаты

1. Многолетние изменения высоты, альбедо и характерных фаз залегания снежного покрова на территории Москвы и Московской области

По данным о высоте снежного покрова, полученным на станциях Москвы и области за период 2000—2018 гг., оценены даты характерных фаз залегания снежного покрова (табл. 1). К основным датам, представляющим наибольший интерес, относятся дата выпадения снежного покрова, дата формирование устойчивого снежного покрова, дата накопления максимальных снегозапасов и дата полного стаивания снега.

Для выявления территориальной изменчивости снежного покрова в рассматриваемом регионе метеорологические станции были разделены на две группы:

Таблица 1

Даты наступления характерных фаз снежного покрова на территории Москвы и Московской области за период с 2000 по 2018 г., усредненные для всех метеостанций региона

Сезон	Первый снег		Устойчивый снежный покров		Максимальные снегозапасы		Снежный покров растаял	
	Город	Область	Город	Область	Город	Область	Город	Область
2000/01	20.11.00	08.11.00	16.12.00	09.10.00	07.03.01	04.03.01	07.04.01	04.04.01
2001/02	15.11.01	15.11.01	16.11.01	16.11.01	07.01.02	07.01.02	05.03.02	17.03.02
2002/03	10.11.02	07.10.02	10.12.02	04.12.02	25.03.03	15.01.03	12.04.03	15.04.03
2003/04	25.10.03	21.10.03	07.12.03	04.12.03	10.02.04	27.02.04	27.03.04	27.03.04
2004/05	17.11.04	16.11.04	18.11.04	17.11.04	20.03.05	20.03.05	07.04.05	10.04.05
2005/06	20.10.05	26.10.05	01.12.05	01.12.05	14.03.06	14.03.06	10.04.06	10.04.06
2006/07	27.11.06	27.10.06	18.01.07	20.01.07	16.02.07	02.03.07	18.03.07	20.03.07
2007/08	15.10.07	15.10.07	14.11.07	13.11.07	03.02.08	20.02.08	20.03.08	27.03.08
2008/09	20.11.08	16.11.08	16.12.08	14.12.08	20.03.09	12.03.09	12.04.09	11.04.09
2009/10	28.10.09	27.10.09	07.12.09	07.12.09	26.02.10	17.02.10	05.04.10	03.04.10
2010/11	18.11.10	16.11.10	19.11.10	24.11.10	15.02.11	16.02.11	16.04.11	20.04.11
2011/12	08.11.11	08.11.11	16.12.11	16.12.11	14.03.12	14.03.12	16.04.12	16.04.12
2012/13	25.10.12	26.10.12	28.11.12	27.12.12	27.03.13	20.03.13	16.04.13	20.04.13
2013/14	25.11.13	25.11.13	26.11.13	26.11.13	12.12.13	28.11.13	05.04.14	05.04.14
2014/15	17.10.14	16.10.14	01.12.14	01.12.14	10.02.15	10.02.15	08.04.15	23.04.15
2015/16	15.11.15	09.10.15	27.12.15	27.12.15	02.03.16	02.03.16	02.04.16	05.04.16
2016/17	26.10.16	25.10.16	27.10.16	26.10.16	29.01.17	17.02.17	05.04.17	24.04.17
2017/18	15.11.17	23.10.17	04.01.18	01.01.18	07.03.18	04.03.18	06.04.18	06.04.18

1) городские метеостанции, 2) областные метеостанции. На основе проделанной работы установлено, что в области снежный покров в большинстве случаев выпадает раньше, чем в городе (в среднем на 11 дней). Устойчивый снежный покров в области также формируются раньше (в среднем на три дня). Тает снежный покров в области позже, чем в городе (в среднем на шесть дней). Данные выводы свидетельствуют о том, что в городе приземная температура воздуха выше, чем в области, и выпадающие в городе осадки имеют жидкую форму. Следует также отметить, что в большинстве случаев в городе даты накопления максимальных снегозапасов наступают позже (в среднем на пять дней), чем в области, что может косвенно свидетельствовать о влиянии городской застройки на формирование снежного покрова.

За исследуемый период первый снег, по данным всех метеостанций, выпадал преимущественно во второй и третьей декадах октября. Следует также отметить, что за последние 18 лет в случае выпадения снега в октябре первый снег полностью стаивал в течение первой декады ноября. Кроме того, первый снег ни разу не выпадал в первой декаде ноября, поскольку температура воздуха в этот период времени была положительной и фиксировались только жидкие осадки. Во второй декаде ноября снег выпадал в 22 % случаев, в третьей — в 17 % случаев. Следует также отметить, что при выпадении первого снега во второй или третьей декадах ноября снежный покров больше не стаивал до весны в 57 % случаев.

Устойчивый снежный покров формировался во второй и третьей декадах ноября в 44 % случаев. Наиболее часто устойчивый снежный покров формировалсяся в Москве и Московской области к первой декаде декабря (44 % случаев), редко ко второй (6 %). Следует отдельно отметить малоснежную зиму 2006/07 г. Первая часть зимы была теплой, и устойчиво отрицательная температура воздуха установилась только к 21 января 2007 г., вследствие чего устойчивый снежный покров сформировался только в третьей декаде января.

Наибольший интерес вызывают максимальный снегозапас и дата его наступления. Установлено, что максимальные снегозапасы формируются в Московском регионе в следующие временные интервалы: вторая декада февраля — 6 %, третья декада февраля — 22 %, первая декада марта — 22 %, вторая декада марта — 22 %, третья декада марта — 11 %. Из всех зимних сезонов выделяется малоснежный сезон 2013/14 г., когда максимальный снегозапас сформировался в результате сильного снегопада в начале сезона и достиг своего максимума к 27 ноябрю 2013 г. После этой даты снежный покров постепенно стаивал и уплотнялся.

Снежный покров полностью тает в течение двух-трех недель с момента достижения максимальных снегозапасов (исключение составила зима 2013/14 г.). Полное отсутствие снежного покрова в большинстве случаев зафиксировано ко второй декаде апреля (62 %). Установлено, что в городской черте снежный покров тает быстрее, чем в области, на 2—3 дня вследствие более высокой среднесуточной температуры воздуха.

Зимний сезон 2012/13 г. был самым снежным за весь период исследования (рис. 2 *а*). Первый снег в эту зиму выпал в последней декаде октября 2012 г. и полностью растаял в течение 10 дней. Высота снежного покрова достигла

максимального значения (21 см) на метеорологической станции Волоколамск к 2 ноября 2012 г.

После стаивания первого снега снежный покров отсутствовал вплоть до 25 ноября 2012 г., когда начался формироваться устойчивый снежный покров, высота которого достигла максимального значения (78 см) к 21 марта 2013 г. на станции Волоколамск. Следует отметить, что в этот зимний сезон снежный покров практически не таял в связи с отсутствием оттепелей и наблюдалось большое количество твердых осадков. При повышении температуры воздуха весь снег стаял в течение 20 дней. Следует отметить, что год с подобными значениями высоты снежного покрова наблюдался в зимний сезон 2000/01 г.

Зимний сезон 2013/14 г. был самым малоснежным за весь исследуемый период (рис. 2 *б*). Положительные значения среднесуточной температуры воздуха

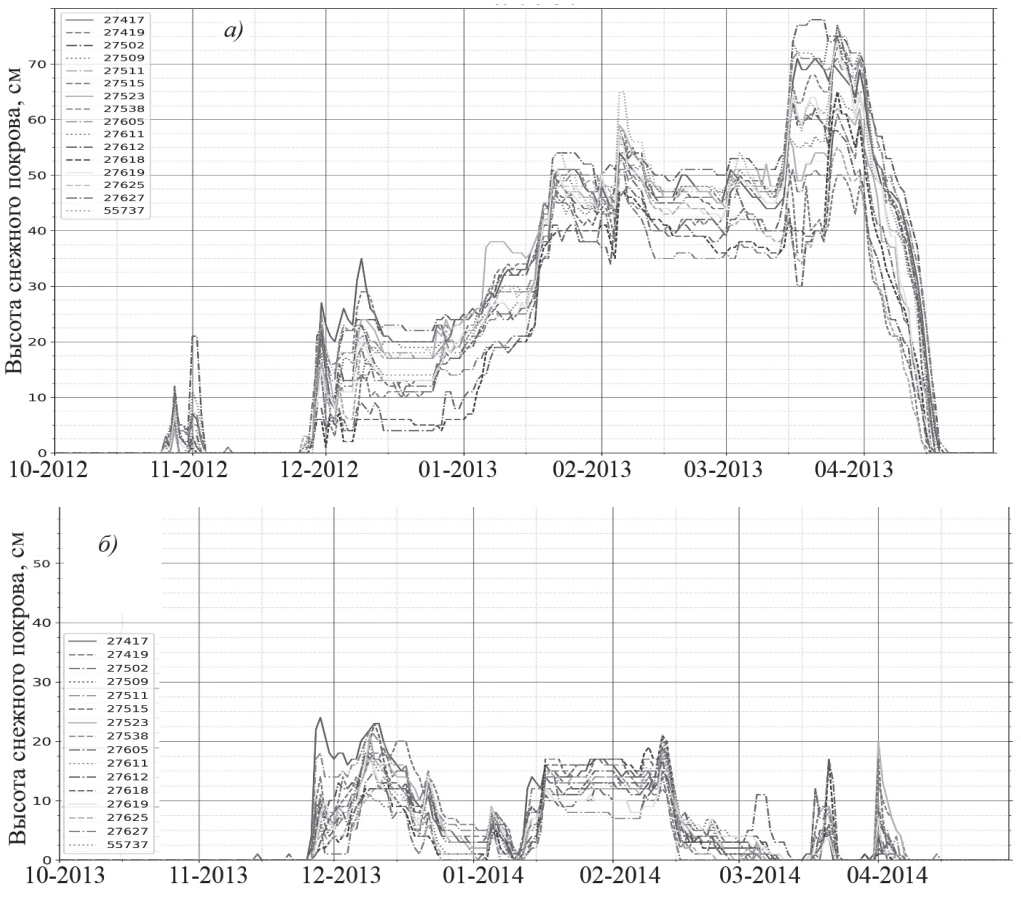

Рис. 2. Накопление снегозапасов за зимний сезон 2012/13 г. (*а*) и 2013/14 г. (*б*) по данным метеорологических станций на территории Москвы и Московской области.

Названия станций, соответствующие приведенным номерам, см. табл. 2.

наблюдались вплоть до второй декады января 2014 г. С 17.01.2014 на 27 дней установилась солнечная, морозная погода, осадки в этот период отсутствовали. Затем вновь были зафиксированы положительные значения среднесуточной температуры воздуха. Также малоснежными были зимние сезоны 2006/07 и 2007/08 гг.

В среднем для Москвы и Московской области высота снежного покрова составляет 43 см. Установлено, что максимальная высота снежного покрова за последние девять зимних сезонов (2010—2018 гг.) увеличились в среднем на 3—4 см на всех метеорологических станциях за исключением Коломны, где она, наоборот, уменьшилась на 3,2 см. Снежный покров распределен по территории в Московской области более равномерно, чем в Москве: разность значений высоты снежного покрова для большинства метеорологических станций в области составляет 4 см. Следует отметить, что наибольшая высота снежного покрова зафиксирована на западе Московской области вблизи границы с Владимировской областью. Наименьшая высота снежного покрова зафиксирована в северной части Московской области. Разница между максимальным и минимальным значениями высоты снега на станциях составляет в среднем 8 см. В городской черте снег распределен неравномерно. Наибольшие значения высоты снежного покрова зафиксированы по данным метеорологической обсерватории МГУ (юго-запад Москвы) и станции ВДНХ (северо-восток Москвы). Наименьшее количество снега зафиксировано на западе Москвы. В среднем в Москве высота снежного покрова составляет 44 см, достигая в снежные годы 51 см (табл. 2).

Таблица 2

Максимальные и средние значения высоты снежного покрова (h) за зимние сезоны с 2000 по 2018 г. в Москве и Московской области

Номер станции	Название станции	Зимние сезоны			
		2000/01 — 2008/09 гг.		2009/10 — 2017/18 гг.	
		$h_{макс}$, см	$h_{сред}$, см	$h_{макс}$, см	$h_{сред}$, см
27502	Волоколамск	41,6	13,7	44,4	14,6
27509	Можайск	38,0	11,4	42,7	12,8
27417	Клин	44,1	13,1	44,6	13,9
27511	Ново-Иерусалим	40,3	11,8	41,7	13,0
27611	Наро-Фоминск	39,9	11,6	42,0	13,2
27538	Черусти	49,1	16,2	46,7	14,7
27523	Павловский Посад	45,1	14,0	45,3	14,4
27625	Коломна	45,6	13,7	42,4	12,4
557376	МО МГУ	47,6	13,2	49,9	15,3
27515	Немчиновка	28,5	7,8	47,8	13,9
27619	Тушино	37,0	10,6	46,0	13,8
27612	ВДНХ	47,2	13,7	50,3	14,6
27605	Балчуг	28,0	6,7	42,9	12,3
27419	Дмитров	38,3	11,6	41,3	12,9
27627	Кашира	45,0	11,1	40,2	11,8
27618	Серпухов	34,3	9,5	37,8	10,4

Статистическая оценка пространственной однородности средней высоты снежного покрова (применение t-теста для средних) показала, что на большинстве метеостанций Москвы и области средние значения высоты снежного покрова относительно реперной станции ВДНХ не равны, что связано с неоднородностью выпадения осадков, а также рельефом и застройкой местности. Равенство средних значений высоты снежного покрова было получено для станций ВДНХ, Волоколамск и Павловский Посад (уровень значимости больше 0,05). Наибольшие отличия значений средней высоты снежного покрова от значения на станции ВДНХ наблюдаются на юге и западе Московской области (станции Серпухов, Наро-Фоминск, Можайск, Ново-Иерусалим).

Среднегодовые значения высоты снежного покрова и альбедо поверхности по данным стандартных актинометрических измерений метеорологической обсерватории (МО) МГУ за период 2000—2017 гг. представлены на рис. 3. В последние годы небольшая высота снежного покрова связана в 2016—2017 гг. с положительными аномалиями температуры воздуха, а в 2014—2015 гг. как с положительными аномалиями температуры воздуха, так и с отрицательными аномалиями количества осадков. Межгодовые изменения альбедо поверхности при наличии снежного покрова в Москве (от 52 до 67 %, коэффициент вариации 7 %) в целом соответствуют изменениям высоты снежного покрова (см. рис. 3).

2. Восстановление запаса воды в снежном покрове за период 2000—2018 гг. и оценка полученных значений

Особое внимание было уделено исследованию изменений запаса воды в снежном покрове. Для выполнения поставленной цели использовались данные маршрутных снегомерных наблюдений в Московской области и расчеты с помощью модели SnoWE. Для выполнения текущего исследования использовалась возможность счета модели по станциям; в качестве исходных данных использовались станционные стандартные метеорологические данные. Основной трудностью, с которой пришлось столкнуться при выполнении расчетов за исторический период, является наличие в данных измерений ошибок и неточностей.

В результате были получены ряды восстановленных значений запаса воды в снежном покрове и его плотности для территории Москвы и Московской области за каждый день период с 1 сентября 2000 г. по 1 мая 2018 г. Максимальные значения запаса воды в снежном покрове были зафиксированы в зимний сезон 2012/13 г. (рис. 4), а минимальные — в зимний сезон 2013/14 г.

Для того чтобы оценить точность восстановления параметров снежного покрова, была привлечена информация, полученная на маршрутных снегомерных съемках. На территории Московской области маршрутные снегомерные наблюдения выполняются на 12 метеорологических станциях с дискретностью один раз в 5 или 10 дней. На рис. 5 представлено сравнение данных маршрутных снегомерных наблюдений и восстановленных значений снегозапасов за зимний сезон 2012/13 г. для метеорологической станции Волоколамск.

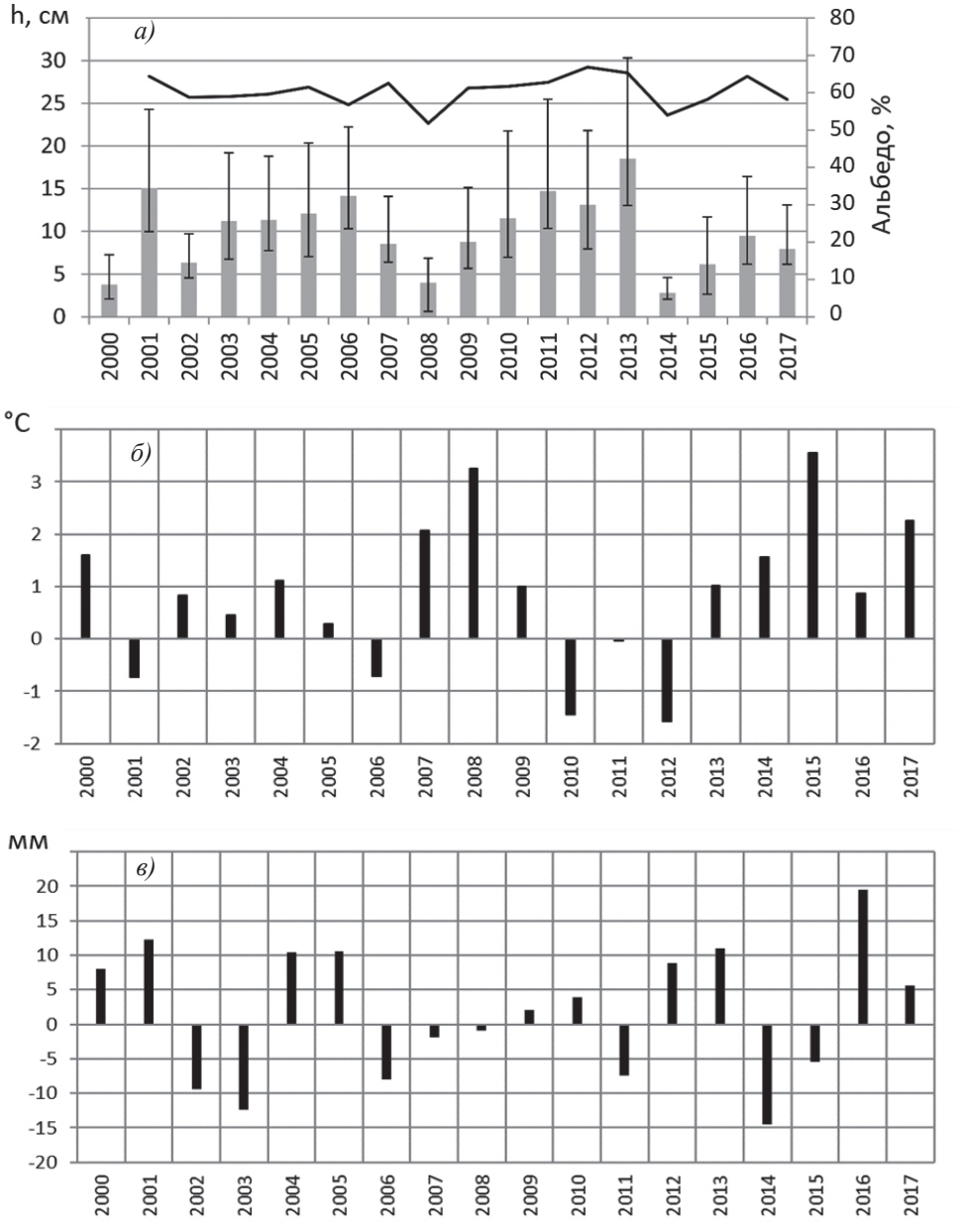

Рис. 3. Средняя высота снежного покрова по данным метеорологических станций Москвы и Московской области (вертикальными отрезками показаны минимальные и максимальные значения высоты снежного покрова) и альбедо поверхности по данным МО МГУ (при наличии снежного покрова) (*а*), а также аномалии температуры воздуха (*б*) и количества осадков (*в*) за холодный период (ноябрь — март) относительно климатической нормы 1981— 2010 гг. по данным МО МГУ.

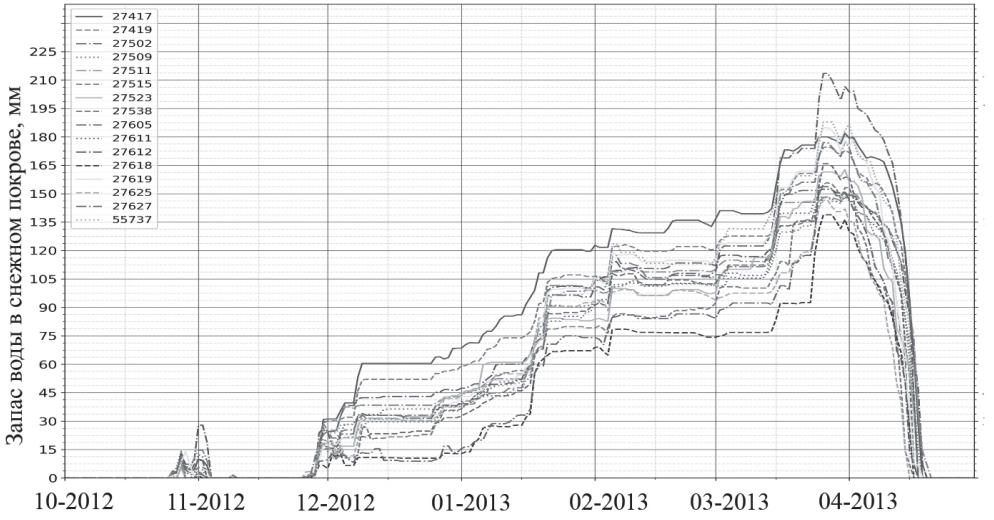

Рис. 4. Распределение запаса воды в снежном покрове
на метеорологических станциях в Москве и Московской области
за зимний сезон 2012/13 г. по данным модельных расчетов.

Названия станций, соответствующие приведенным номерам, см. табл. 2.

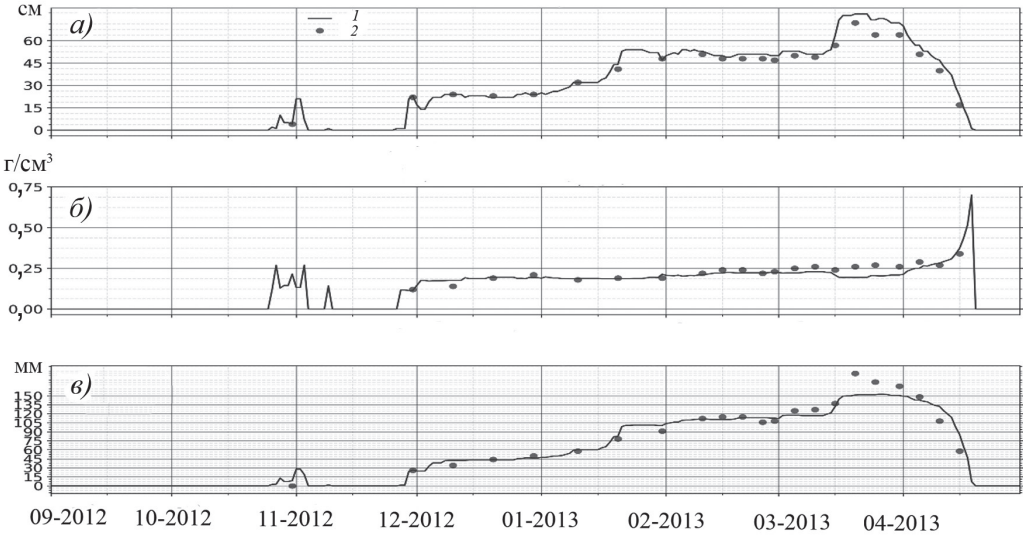

Рис. 5. Сравнение фактических и модельных значений характеристик
снежного покрова на ст. Волоколамск.

а — высота снежного покрова (см), *б* — плотность снега (г/см^3), *в* — запас воды в снеге (мм).
1 — расчетные значения, *2* — данные маршрутных снегомерных наблюдений.

Из рис. 5 видно, что модель снежного покрова *SnoWE* воспроизводит динамику развития снежного покрова и его характеристик на примере метеорологической станции Волоколамск. Данная метеорологическая станция была выбрана в качестве примера, поскольку за зиму 2012/13 г. на станции было выполнено наибольшее число маршрутных снегомерных наблюдений. Результаты статистического сравнения модельных расчетов и данных измерений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Статистическая оценка сравнения фактических и восстановленных данных о снежном покрове на территории Москвы и Московской области за период с 2000 по 2017 г.

Номер станции	Название станции	Коэффициент корреляции	СКО	Смещенность	RMSE
		Запас воды в снеге, мм			
27417	Клин	0,939	38,8	3,41	14,0
27502	Волоколамск	0,938	36,5	0,43	14,0
27509	Можайск	0,927	34,2	-0,25	13,8
27511	Ново-Иерусалим	0,927	34,7	-8,41	15,9
27515	Немчиновка	0,884	38,1	-7,88	21,2
27523	Павловский Посад	0,922	38,4	-10,5	19,9
27538	Черусти	0,922	39,8	-7,45	18,7
27611	Наро-Фоминск	0,954	37,3	-6,62	14,1
27618	Серпухов	0,959	34,4	-17,6	21,9
27625	Коломна	0,951	33,6	-1,30	11,4
27627	Кашира	0,937	38,6	-8,18	16,6
		Плотность снежного покрова, г/см^3			
27417	Клин	0,74	0,080	0,039	0,070
27502	Волоколамск	0,60	0,073	0,022	0,069
27509	Можайск	0,70	0,074	-0,001	0,059
27511	Ново-Иерусалим	0,69	0,082	0,024	0,075
27515	Немчиновка	0,65	0,082	-0,022	0,073
27523	Павловский Посад	0,57	0,092	0,031	0,100
27538	Черусти	0,32	0,101	0,051	0,153
27611	Наро-Фоминск	0,62	0,093	0,044	0,099
27618	Серпухов	0,76	0,075	0,011	0,055
27625	Коломна	0,76	0,068	0,001	0,050
27627	Кашира	0,59	0,088	0,008	0,088

Примечание. СКО — среднеквадратическое отклонение, RMSE — среднеквадратическая ошибка.

В табл. 3 не представлена статистическая оценка изменения высоты снежного покрова, потому что модель снежного покрова *SnoWE* использует измеренную высоту снега на станции в качестве входных данных. Несоответствие модельных и фактических данных свидетельствует о том, что высота снега на маршруте отличается от измеренной на станции, в определенных случаях разность достигает значений 10—15 см. В связи с этим могут проявляться дополнительные ошибки

при расчете плотности или запаса воды по модели, вызванные несоответствиями с измеренными характеристиками.

Таким образом, модель снежного покрова SnoWE хорошо воспроизводит динамику развития снежного покрова и его характеристик: коэффициент корреляции с данными наблюдений для запаса воды в снеге достигает 0,96 (минимум 0,88); коэффициент корреляции с данными наблюдений для плотности достигает 0,76 (минимум 0,32). Модель снежного покрова незначительно занижает значения восстановленного запаса воды и завышает значения восстановленной плотности. Завышение плотности в основном происходит в весенний период времени, когда снег начинает активно таять. Занижение водного эквивалента снежного покрова происходит в связи с недоучетом ветровой составляющей и приносом снега извне. В дальнейшем планируется увеличить мерность модели и улучшить учет ветрового переноса.

3. Оценки альбедо снежного покрова по спутниковым данным на территории Московского региона

Для оценки пространственного распределения альбедо снега на территории Московского региона использовались спутниковые данные коллекции MOD10A1, спутник *Terra*, 2000—2017 гг. Для метеорологических станций были выбраны спутниковые пиксели, ближайшие к координатам метеорологических площадок, для которых нормализованный дифференцированный снежный индекс был больше 0,4. Кроме того, были отобраны только те данные, которые обладали самым высоким качеством (табл. 4).

Таблица 4

Альбедо снега и индекс NDSI по спутниковым данным за 2000—2017 гг. для пикселей, ближайших к наземным станциям

Станция	φ° с.ш.	λ° в.д.	Альбедо снега, %	NDSI	Число наблюдений
МО МГУ	55,7069	37,5219	25	54	220
ВДНХ	55,8314	37,6221	36	55	242
Волоколамск	56,0127	35,9331	46	61	531
Можайск	55,5180	36,0126	62	67	298
Ново-Иерусалим	55,9100	36,8413	64	67	287
Павловский Посад	55,7716	38,6927	38	53	326
Черусти	55,5473	39,9978	71	73	369
Балчуг	55,7454	37,6300	47	59	331
Тушино	55,8783	37,4368	34	55	292
Кашира	54,8230	38,1540	63	68	294

Примечание. NDSI — нормализированный дифференцированный индекс.

Наименьшее значение альбедо характерно для пикселя, наиболее близко расположенного к станции МО МГУ, наибольшее — для станции Черусти. Более высокое альбедо снега отмечается в городской черте на станциях Балчуг и ВДНХ,

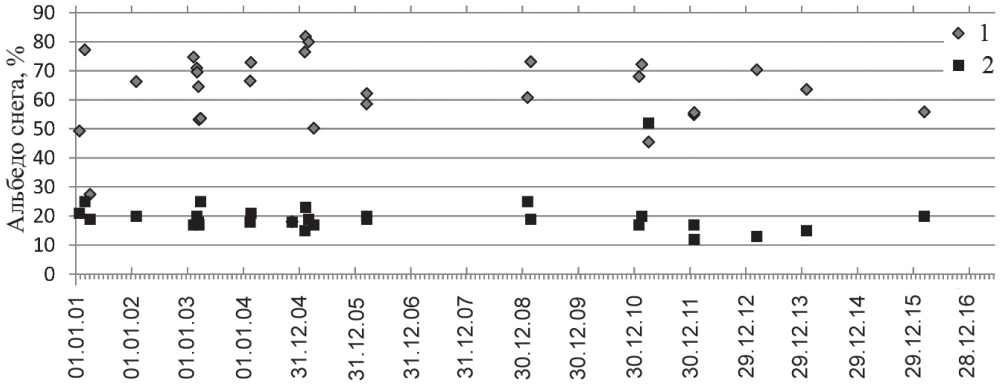

Рис. 6. Альбедо снега по данным актинометрических измерений (*1*) и спутниковым данным (*2*) коллекции MOD10A1 для МО МГУ.

вероятно, в связи с влиянием расположенных близко к выбранным пикселям Водоотводного канала и Латвийского сквера.

Сравнение спутниковых и наземных данных показало, что восстановленные спутниковые данные об альбедо снежного покрова значительно отличаются от результатов точечных наземных измерений. Спутниковые данные существенно занижены по сравнению со стандартными актинометрическими данными, поскольку последние представляют собой точечные измерения, а спутниковые данные — эффективное альбедо поверхности. Среднее значение альбедо снега по данным наблюдений в полученной выборке составляет 62 % (стандартное отклонение 15 %), а по спутниковым данным — 20 % (стандартное отклонение 7 %). Согласие между спутниковыми и наземными данными улучшается при увеличении значений индекса NDSI (чем выше значение индекса NDSI, тем большая площадь спутникового пикселя занята снежным покровом). В частности, 4 апреля 2011 г. при индексе NDSI, равном 85, альбедо по данным наблюдений составляет 46 %, а по спутниковым данным — 52 % (рис. 6).

Выводы

В ходе проделанной работы установлено, что в Московской области снежный покрова лежит на 2—3 недели дольше, чем в Москве. В области снежный покров выпадает раньше и устойчивый снежный покров формируется быстрее. Данное явление связано с более высокой приземной температурой воздуха в городе и влиянием городской застройки на формирования снежного покрова. Также установлено, что значения максимальной высоты снежного покрова за последние девять зимних сезонов (2010—2018 гг.) увеличились в среднем на 3—4 см на всех метеорологических станциях за исключением станции Коломна, где высота снежного покрова, наоборот, уменьшилась на 3,2 см. Снежный покров распределен

в Московской области более равномерно, чем в Москве. Снег в Москве весной тает на несколько дней быстрее, чем в Московской области.

В ходе работы было выполнено усовершенствование модели снежного покрова SnoWE. Разработана «архивная» версия счета модели. На основании архивной версии модели выполнено восстановление характеристик снежного покрова для территории Москвы и Московской области за период с 2000 по 2018 г. Модель снежного покрова SnoWE воспроизводит динамику развития снежного покрова и его характеристик: коэффициент корреляции с данными наблюдений для запаса воды в снеге достигает 0,96 (минимум 0,88); коэффициент корреляции с данными наблюдений для плотности снега достигает 0,76 (минимум 0,32). Наибольшие различия восстановленных значений запасов воды в снеге с данными маршрутных снегосъемок наблюдаются в случае различия высоты снежного покрова на маршруте и на станции.

Значения запаса воды в снеге, восстановленного с помощью модели SnoWE, занижены (максимальное занижение 17 мм). Для восстановленной плотности снега характерны завышенные значения (максимальное завышение 0,051 г/см^3). Наибольшие ошибки восстановления запаса воды снежного покрова выявлены в период весеннего таяния снежного покрова.

Межгодовые изменения альбедо поверхности при наличии снежного покрова в Москве составляют от 52 до 67 %, коэффициент вариации равен 7 % за период 2001—2017 гг. Спутниковые данные MODIS (коллекция MOD10A1) об альбедо снежного покрова существенно занижены по сравнению со стандартными актинометрическими данными. В случае если наблюдается однородное покрытие спутникового пикселя снегом, то значения альбедо по спутниковым данным сравнимы с данными наземных точечных измерений для Москвы.

За предоставление данных и консультацию по работе с системой прогноза COSMO-Ru авторы выражают благодарность Г.С. Ривину и Д.В. Блинову.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18—35—00498 мол_а (результаты — раздел 1), РНФ № 17—11—01254 (результаты — раздел 2), РНФ № 17—77—10132 (результаты — раздел 3).

Список литературы

1. *Блинов Д.В., Ривин Г.С.* Система краткосрочного негидрастатического прогноза погоды COSMO-Ru: Технологическая линия // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 142—162.
2. *Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А.* Модель для расчёта характеристик снежного покрова на основе данных наблюдений стандартной метеорологической сети // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 352. С. 85—102.
3. *Китаев Л.М., Кислов А.В.* Региональные различия снегонакопления — современные и будущие изменения (на примере Северной Европы и севера Западной Сибири) // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 2. С. 98—104.
4. *Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Гребенников П.Б., Сократов С.А.* Пространственно-временная неоднородность снежной толщи по данным пенетрометра SnowMicroPen // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, №. 4. С. 473—485.
5. *Кренке А.Н., Разуваев В.Н., Китаев Л.М., Мартуганов Р.А., Шакирзянов Р.И.* Снежность на территории СНГ и его регионов в условиях глобального потепления // Криосфера Земли. 2000. Т. IV, № 4. С. 97—106.

6. *Локощенко М.А.* Снежный покров и его современные изменения в Москве // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 71—82.
7. *Носенко О.А., Долгих Н.А., Носенко Г.А.* Снежный покров центра европейской части России по данным AMSR-E и SSM/I // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3, №. 1. С. 296—300.
8. *Пьянков С.В., Шихов А.Н.* Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь: Раритет-Пермь, 2014. 296 с.
9. *Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Пространственная и временна́я изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // Лёд и Снег. 2015. Т. 54, №. 4. С. 72—80.
10. *Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М.* Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и Снег. 2015. Т. 55, № 4. С. 73—86.
11. *Турков Д.В., Сократов В.С.* Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального тепловлагообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56, №. 3. С. 369—380.
12. *Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г.* Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. Вып. 2 (368). С. 120—143.
13. *Aoki T., Hachikubo A., Hori M.* Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos // J. Geophys.Res. 2003. 108 (D19). 4616. doi:10.1029/2003JD003506.
14. *Klein A.G., Stroeve J.* Development and validation of a snow albedo algorithm for the MODIS instrument //Ann. Glaciol. 2002. V. 34. P. 45—52.
15. *Stroeve J.C., Box J.E., Haran T.* Evaluation of the MODIS (MOD10A1) daily snow albedo product over the Greenland ice sheet // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 105, No. 2. P. 155—171.