

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.578.46

**МЕТОД ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ СНЕГОЗАПАСОВ
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА
В СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА (с учетом доли твердых осадков)**

А.Н. Кренке, М.М. Чернавская, Е.А. Черенкова

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия, ankrenke@mail.ru

Пространственное распределение максимальных снегозапасов по территории России оценено по сценариям изменения климата с применением эмпирических связей доли твердых осадков и температуры воздуха. Использованы сценарии ECHAM4/OPYC3 в версии Ga2, соответствующей одному из максимальных вариантов потепления климата и HHGSAX модели Hadley умеренного потепления для периода 2040–2069 гг. Зависимость величины максимальных снегозапасов от твердых осадков для территории, расположенной к северу от 50° с.ш., была получена на основе карт Атласа снежно-ледовых ресурсов мира для трех регионов России: Восточно-Европейская равнина, Урал и Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Дальний Восток. Установлено, что снег сохранится на всей территории, его площадь сократится в основном в районах с морским климатом. Для периода 2040–2069 гг. определены территории с максимальными снегозапасами, превышающими 100, 150 и 200 мм слоя воды. Обе модели дают близкие результаты по пространственному распределению, причем ожидаемые максимальные снегозапасы по модели Hadley выше, чем по модели ECHAM.

Изменение климата, максимальные снегозапасы, твердые осадки, сценарные прогнозы, Россия

**MAXIMUM SNOW STORAGE FORECAST METHOD UNDER
THE GLOBAL CLIMATE WARMING OVER THE RUSSIAN TERRITORY
IN THE MIDDLE OF THE 21st CENTURY (based on solid precipitation percentage)**

A.N. Krenke, M.M. Chernavskaya, E.A. Cherenkova

Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Staromonetnyi per., 29, Russia, ankrenke@mail.ru

Spatial distribution of maximum snow storage has been evaluated according to climate change scenarios using the empirical correlation between solid precipitation share and monthly air temperature over the Russian territory. Maximum probable warming scenario ECHAM4/OPYC3 in version Ga2 and moderate warming scenario Hadley in version HHGSAX were taken for the period 2040–2069. Dependence of maximum snow storage on yearly solid precipitation was obtained on the basis of the appropriate maps of the World Atlas of Snow and Ice Resources for three large regions of Russia to the north of 50 degrees latitude: the East-European plain, the Urals and West Siberia, East Siberia and the Far East. It has been ascertained that the snow cover will retain over the whole territory of investigation; its area will diminish in maritime climate regions. The areas with maximum snow storage above 100, 150 and 200 mm of snow water equivalent have been determined for the period 2040–2069. The both coupled models display similar results on maximum snow storage spatial distribution, although maximum snow storage values, according to Hadley model, are higher than ECHAM ones.

Climate change, maximum snow storage, solid precipitation, climate simulation forecast, Russia

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В России систематические исследования снежного покрова начаты в конце XIX в. работами А.И. Воейкова [1889]. Фундаментальные результаты в дальнейшем были получены В.М. Котляковым [1968] и Л.Д. Копаневым [1982]. Изучение изменения характеристик снежного покрова (площадь, продолжительность залегания, максимальные накопления снега и др.) в связи с наблюдаемым

потеплением климата важно для анализа формирования речного стока, состояния вечной мерзлоты, воздействия на атмосферу (через альбедо, влажность почвы, циркуляционные процессы), а также для анализа последствий этих изменений для экономики и общества.

Согласно Четвертому оценочному докладу ИРСС [2007], линейный тренд потепления за

период 1956–2005 гг. почти в два раза превысил тренд за 1906–2005 гг. Следствием повышения глобальной температуры явилось уменьшение доли снегопадов в общем количестве осадков в средних и высоких широтах северного полушария. Спутниковые данные показывают, что начиная с 1966 г. толщина снежного покрова в северном полушарии весной уменьшается со скоростью приблизительно 2 % за десятилетие. Результаты моделирования говорят о продолжении уменьшения площади снежного покрова. Вместе с тем в последние десятилетия в большинстве областей Российской Федерации наблюдается рост максимальных снегозапасов [Кренке и др., 2000] в связи с увеличением зимних осадков [Groisman, Rankova, 2001]. Полученные на основе результатов наблюдений оценки зависимости снегозапасов от зимних осадков и температуры воздуха свидетельствуют о том, что, судя по модельным прогнозам обоих параметров, увеличение снегозапасов в настоящее время близко к предельным значениям, когда увеличение таяния за счет потепления превзойдет рост твердых осадков [Китаев и др., 2004].

Необходимо отметить, что качество воспроизведения в моделях характеристик снежного покрова хуже, чем температуры воздуха и осадков, причем, как правило, характеристики снега в моделях завышаются. Проведенное сравнение воспроизведения характеристик снежного покрова отечественными моделями (модели Гидрометцентра России, Института вычислительной математики РАН и Главной геофизической обсерватории им. Воейкова) показало, что особенно это относится к толщине и массе снега [Рубинштейн и др., 2007]. Аналогичные исследования для зарубежных территорий показывают, что ошибки могут превышать 50 % [Frei et al., 2005; Roesh, 2006]. Ошибки воспроизведения моделями температуры воздуха и осадков намного меньше, чем характеристик снежного покрова (например, [Торопов, 2005]). В связи с этим даже в Четвертом оценочном докладе ИРСС [2007], в отличие от температуры воздуха и осадков и ряда других метеорологических элементов, приводятся только качественные оценки предстоящих изменений характеристик снежного покрова. В то же время, как свидетельствуют эксперименты, проведенные в рамках международного проекта СМIP3, современные границы снежного покрова на суше удовлетворительно воспроизводятся ансамблем МОЦАО нового поколения [Павлова и др., 2007].

Альтернативный подход, основанный не на моделировании снежного покрова, а на его наблюдаемых современных связях с зимней температурой и суммарными осадками, был использован для прогноза изменений снегозапасов на территории Северной Евразии [Китаев и др., 2008].

При этом разделение осадков на твердые и жидкие было учтено лишь в скрытой форме.

Целью настоящего исследования является разработка нового диагностического метода прогноза средних многолетних максимальных снегозапасов применительно к середине XXI в. по сценариям изменения климата с использованием эмпирических связей доли твердых осадков и температуры воздуха. Такой прогноз имеет большое значение для предвидения и решения экономических проблем, связанных с влиянием изменения характеристик снежного покрова на сельское хозяйство, транспорт и строительство.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу применяемой методики положена гипотеза устойчивости связи между метеорологическими элементами во времени и пространстве (в пределах крупных природных регионов). Пространственное распределение средних многолетних максимальных снегозапасов выявлялось в соответствии со сценариями изменения климата в XXI в. для территории России севернее 50° с.ш. Для анализа привлечены данные численных экспериментов моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), полученные в двух ведущих метеорологических центрах (Center Max Plank Institute Fur Meteorologie, Germany и Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UK) и доступные через Интернет (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>). Использован сценарий ЕСНАМ4/ОРУС3 в версии Ga2 (пространственное разрешение 2,8 × 2,8°), соответствующий одному из максимальных вариантов потепления климата, и сценарий NHGSAX модели Hadley (пространственное разрешение 2,50 × 3,75°), соответствующий умеренному потеплению. Оба прогноза получены при предположении увеличения содержания в атмосфере аэрозоля и парниковых газов на 1 % в год. Для расчета максимальных снегозапасов использовались средние месячные величины суммарных осадков и температуры воздуха в узлах координатной сетки указанных сценариев для базового периода 1961–1990 гг. и соответствующие отклонения метеорологических величин для прогнозируемого периода 2040–2069 гг.

Для определения годовой суммы твердых осадков применялись эмпирические зависимости средней многолетней величины доли твердых осадков в их месячной сумме от средней месячной температуры воздуха [Богданова, 1976]. Эти зависимости были получены по данным 160 метеорологических станций, расположенных во всех районах бывшего СССР, где выпадают твердые и смешанные осадки. Представленные на рис. 1 кривые, относящиеся к северной, северо-западной

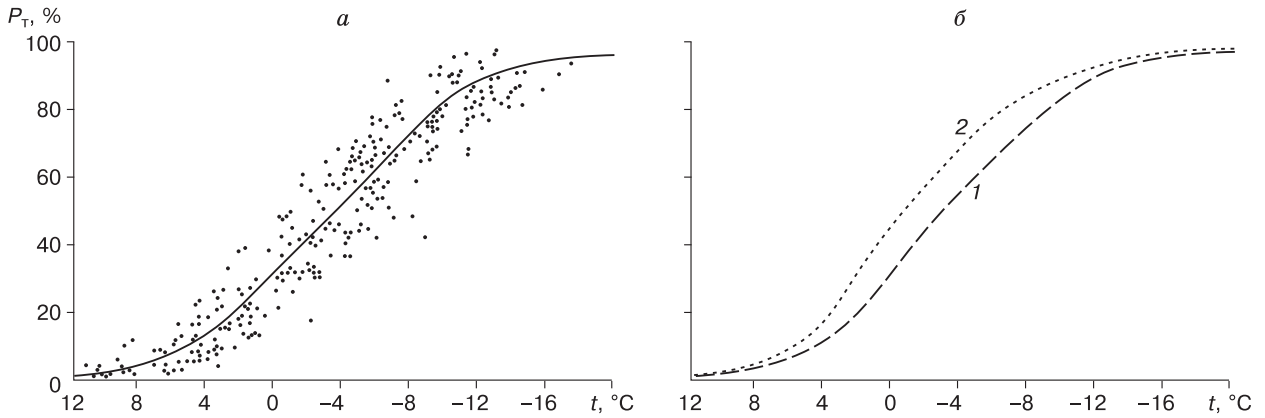


Рис. 1. Зависимость средней многолетней доли твердых осадков в месячной сумме всех осадков ($P_t, \%$) от средней месячной температуры воздуха ($t, ^\circ\text{C}$), по Э.Г. Богдановой [1976]:

a – север, северо-запад и центр Европейской территории России; *б*: 1 – Урал и Западная Сибирь, 2 – Восточная Сибирь и Приморье.

и центральной части Европейской территории России, к Уралу и Западной Сибири, а также к Восточной Сибири и Приморью отличаются углом наклона рассматриваемой функциональной зависимости. По мере увеличения степени континентальности климата этот угол увеличивается. С использованием зависимостей твердые осадки были рассчитаны для каждого узла сетки, исходя из месячных сумм осадков и средней месячной тем-

пературы воздуха, согласно сценариям изменения климата за 2040–2069 гг.

Согласно Атласу снежно-ледовых ресурсов мира (АСЛРМ) [Атлас..., 1997] и Электронному атласу “Снег и лед на Земле” Института географии РАН (<http://webgeo.ru>), максимальные снегозапасы – это наибольшая за год масса воды, содержащаяся в снежном покрове. Эмпирические зависимости средних многолетних максимальных

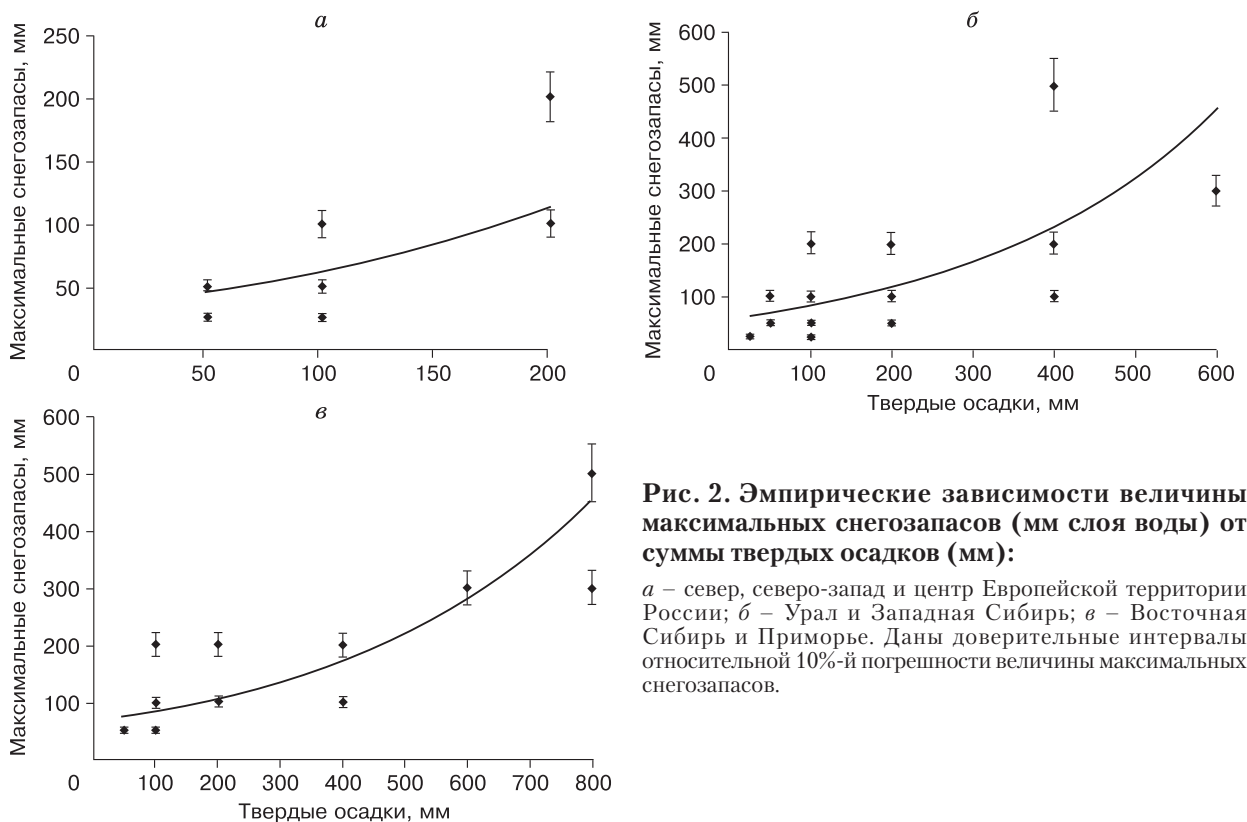


Рис. 2. Эмпирические зависимости величины максимальных снегозапасов (мм слоя воды) от суммы твердых осадков (мм):

a – север, северо-запад и центр Европейской территории России; *б* – Урал и Западная Сибирь; *в* – Восточная Сибирь и Приморье. Даны доверительные интервалы относительной 10%-й погрешности величины максимальных снегозапасов.

Значения параметров экспоненциального уравнения связи

Регион	Коэффициенты		R^2	n
	a	k		
Восточно-Европейская равнина	33,5	0,0061	0,5	33
Урал и Западная Сибирь	59,4	0,0034	0,3	72
Дальний Восток	66,8	0,0024	0,7	37

Примечание. R^2 – достоверность аппроксимации; n – число случаев.

снегозапасов от годовой суммы твердых осадков определены авторами на основе карт “Максимальные снегозапасы, мм слоя воды” и “Твердые осадки, мм (год)” (м-б 1:20 000 000), приведенных в АСЛРМ [Атлас..., 1997]. Данные снимались в узлах регулярной сетки с шагом 2,5°. Согласно принятому шагу, на каждую соответствующую легенде карт градацию количества твердых осадков приходится от одного до нескольких (близких, в том числе и одинаковых) значений снегозапасов. Интервалы относительной 10%-й погрешности для каждой точки величины снегозапасов приведены на рис. 2.

Для множества точек, полученных для рассматриваемых регионов, была выбрана аппроксимация экспоненциального типа:

$$y = ae^{kx}, \quad (1)$$

где y – максимальные снегозапасы, мм слоя воды; a, k – эмпирические коэффициенты (таблица); x – твердые осадки, мм.

Экспоненциальные зависимости были получены для Восточно-Европейской равнины (до 55° в.д.), Урала и Западной Сибири (до 120° в.д.) и для Дальнего Востока (до 190° в.д.). Принятые зависимости использовались для построения карт-схем возможных максимальных снегозапасов для периода 2040–2069 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из анализа полученных результатов следует, что максимальные снегозапасы везде меньше, чем сумма твердых осадков в связи с таянием снега при оттепелях и испарением. Этим, по-видимому, объясняется завышение массы снежного покрова в моделях климата.

Сравнение карты максимальных снегозапасов в середине XX в. [Атлас..., 1997] и полученных нами карт-схем пространственного распределения максимальных снегозапасов на середину XXI в. показало, что даже по сценарию наиболее сильного потепления модели ЕСНАМ (рис. 3, а) снежный покров сохранится на большей части территории России. Кроме того, в континентальной Сибири количество и пространственное распределение максимальных снегозапасов останется примерно постоянным с середины XX до середины XXI в. в связи с увеличением циклонической активности в высоких широтах [IPCC, 2007]. Однако вероятно, что максимальные снегозапасы уменьшатся с 200–300 до 150–200 мм слоя воды на северо-западе Среднесибирского плоскогорья. Это может быть объяснено смещением путей циклонов к северу в связи с уменьшением ледовитости Карского моря и соответствующим потеплением севера Сибири, перекрывающим влияние роста зимних осадков с наветренной стороны плоскогорья. Необходимо отметить, что в данном регионе могут появиться предпосылки к изменению состояния вечной мерзлоты. Это, в свою очередь, скажется на функционировании различных отраслей народного хозяйства, в том числе на состоянии дорог, жилых зданий и промышленных сооружений.

На северо-западе Русской равнины в середине XXI в. по обоим сценариям снегозапасы предполагаются в пределах 75–125 мм слоя воды. Изолиния 100 мм, отражая потепление Арктики, отступит с большей части Кольского п-ова, исключая Хибины. Эта изолиния также отступит примерно

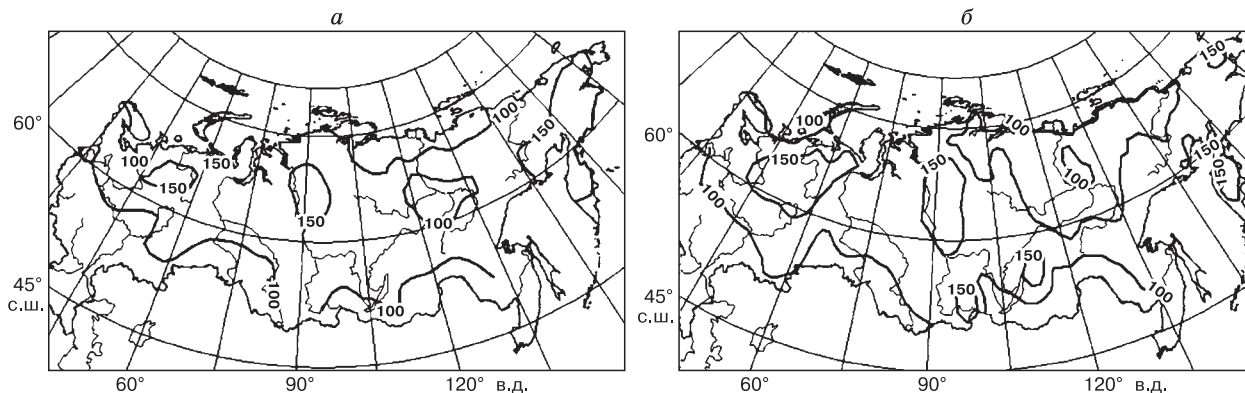


Рис. 3. Максимальные снегозапасы (мм слоя воды) в период 2040–2069 гг. по МОЦАО:

a – ЕСНАМ; b – Hadley.

на 100 км к северо-востоку от линии Ораниенбаум–Валдай–Углич до линии Старая Ладога–Рыбинск. На юге Псковской и на западе Тверской областей максимальные снегозапасы ожидаются в пределах 50–75 мм слоя воды. На северо-востоке Восточно-Европейской равнины максимальные снегозапасы снизятся с 200 до 150 и даже 100 мм слоя воды.

В центре Европейской России максимальные снегозапасы останутся в пределах 50–100 мм, причем ниже 75 мм они будут в Смоленской, Брянской, Белгородской и Пензенской областях. В Поволжье и южном Предуралье по сценарию ЕСНАМ изолиния 100 мм должна отступить от линии Нижний Новгород–Самара–Оренбург до линии Семёнов–Киров–Уфа–Магнитогорск. Лишь в верховьях Камы максимальные снегозапасы останутся в пределах 125–150 мм слоя воды.

В прогнозируемый период в Западной Сибири исчезнет экстремум выше 200 мм слоя воды, наблюдаемый на карте по данным на середину прошлого столетия. Максимальные снегозапасы здесь снизятся до 125–150 мм. На остальной части Западно-Сибирской равнины их величины сохранятся неизменными за счет “ныряющих” циклонов за Уралом. Максимальные снегозапасы останутся выше 100 мм к северу от линии Тобольск–Томск и выше 125 мм чуть севернее широты Ханты-Мансийска при некотором снижении в тени Урала вокруг Обской губы, наблюдаемом и сейчас.

В Восточной Сибири распределение максимальных снегозапасов, кроме Среднесибирского плоскогорья, ожидается близким к современному. Наибольшему предполагаемому здесь потеплению соответствует усиление циклоничности за счет ослабления сибирского максимума. В бассейне Ангары (от Иркутска до Братска) максимальные снегозапасы могут даже увеличиться до 100 мм, что важно для развивающегося там каскада ГЭС. На крайнем юге в степях Забайкалья и в Тувинской котловине также следует ожидать роста максимальных снегозапасов с 40–50 до 75 мм слоя воды.

На Дальнем Востоке в условиях морского климата, где в связи с усилением южных вторжений [Кононова, 2006] наблюдается рост зимней температуры, так же как и в Европе, возможно заметное уменьшение запасов снега. Корреляция снежности в Восточной Европе и на Дальнем Востоке отмечалась и ранее [Кренке и др., 2000]. На Чукотке вместо сегодняшних 175–250 мм ожидается 135–175 мм, что благоприятно для оленеводства, в то время как сокращение морских льдов затруднит морской промысел. В Магаданской области максимальные снегозапасы могут снизиться с 200 до 125–150 мм, в Хабаровском крае и Приамурье – с 125 до 100 мм и ниже.

На равнине юго-востока Камчатки останутся максимальные снегозапасы, превышающие 200 мм,

вместо сегодняшних 300–350 мм, такие же величины, вероятно, будут на большинстве горных хребтов, где в настоящее время наблюдаются еще большие снегозапасы. К сожалению, пространственное разрешение использованных нами моделей климата недостаточно для более детального описания распределения максимальных снегозапасов в горах. Такова в целом картина распределения предполагаемых максимальных снегозапасов, соответствующая одному из максимальных вариантов потепления климата по модели ЕСНАМ.

При сравнении результатов прогноза пространственного распределения максимальных снегозапасов по территории России, полученных в данной работе и статье [Кутаев и др., 2008], оказалось, что согласно обоим методам ожидается снижение максимальных снегозапасов в районах с морским климатом. Однако по методике авторов на Урале и в Сибири не обнаружено их увеличения, ожидаемые максимальные снегозапасы останутся на современном уровне.

Сравнение результатов, полученных на середину текущего столетия (2040–2069 гг.) по сценариям МОЦАО ЕСНАМ и Hadley, показало, что по порядку величин и пространственному распределению эти сценарии демонстрируют в основном близкие результаты ожидаемого максимального снегонакопления на территории России.

Рассмотрим подробнее результаты численных экспериментов, проведенных по этим моделям (см. рис. 3, а, б). Область в Восточной Европе, соответствующая изолинии 150 мм, согласно сценарию Hadley (с максимальными абсолютными значениями 216 мм слоя воды), имеет площадь приблизительно в 3 раза больше, чем по сценарию ЕСНАМ (с максимальными абсолютными значениями 164 мм).

На территории Западной Сибири область, ограниченная изолинией со значением 150 мм слоя воды (в центре Западной Сибири), для обоих сценариев имеет меридиональное направление. Для сценария Hadley площадь этой области в 1,5 раза больше, чем по сценарию ЕСНАМ, и ее южная граница продвинулась до 58° с.ш. Предполагаемые максимальные значения снегозапасов составляют 220 мм слоя воды (для ЕСНАМ – 160 мм). На юге Сибири, согласно сценарию Hadley, возможные максимальные снегозапасы в Иркутской области и Бурятии составят 150–200 мм слоя воды. По сценарию ЕСНАМ, эта величина не превысит 150 мм.

В Якутии, по сценарию ЕСНАМ, ожидаются значения максимальных снегозапасов 100–110 мм, в центре республики – в среднем 90 мм. По сценарию Hadley, на территории Якутии прогнозируется 100–140 мм. Область ожидаемых значений до 100 мм, согласно Hadley, располагается не только в центральной части республики, но и на

севере, и по площади она почти в 4 раза больше, чем по сценарию ЕСНАМ. В прибрежной зоне Северного Ледовитого океана обе модели показывают сходные результаты.

Максимальные снегозапасы на Чукотке ожидаются согласно прогнозу ЕСНАМ – 150–190 мм, Hadley – 100–140 мм. На территории Хабаровского и Приморского краев, в Амурской области обе модели дают близкие значения. По сценарию МОЦАО Hadley, ожидаемые максимальные снегозапасы на Камчатке в рассматриваемый период – до 200 мм, по сценарию ЕСНАМ – до 170 мм. В целом, согласно сценарию Hadley, на территории России, за исключением северо-востока, ожидаются большие максимальные снегозапасы, чем по сценарию ЕСНАМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан новый метод оценки будущих максимальных снегозапасов с использованием сценариев МОЦАО. Основным результатом такой оценки применительно к территории России к северу от 50° с.ш. является свидетельство о сохранении снежного покрова в течение последующих 50 лет. В континентальных районах сохраняются близкие к современным величины максимальных снегозапасов (100 мм и более). В регионах с морским климатом (Дальний Восток, запад Восточной Европы) будет отмечаться снижение максимальных снегозапасов на 20–25 %. Ожидаемые максимальные снегозапасы по модели Hadley в среднем на 32–37 % выше, чем по модели ЕСНАМ. Обе МОЦАО дают близкие результаты по пространственному распределению. Эти оценки необходимо учитывать при хозяйственном и социальном планировании в северных и арктических районах России в условиях меняющегося климата.

Работа выполнена в рамках проекта Программы Отделения наук о Земле РАН № 14.

Литература

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Карта № 34. Максимальные снегозапасы / Авт. И.Д. Копанев, В.И. Липовская; Карта № 29А. Твердые осадки / Авт. Ц.А. Швер. М., 1997, 392 с.

Богданова Э.Г. Способ расчета доли твердых, жидких и смешанных осадков в их месячной норме // Материалы гляциол. исслед., 1976, вып. 26, с. 202–207.

Воейков А.И. Снежный покров, его влияние на почву, климат, погоду и способы исследования // Зап. Рус. геогр. о-ва по общей географии. СПб., 1889, т. 18, № 2, 212 с.

Китаев Л.М., Кренке А.Н., Титкова Т.Б. Климатические условия пределов нарастания снежности на севере Евразии // Материалы гляциол. исслед., 2004, вып. 97, с. 117–122.

Китаев Л.М., Кренке А.Н., Титкова Т.Б. Прогноз изменений снегозапасов на территории Северной Евразии в начале XXI века // Изв. РАН. Сер. геогр., 2008, № 1, с. 37–50.

Кононова Н.К. Изменение характера циркуляции атмосферы в последние десятилетия как фактор изменения климата и ледовитости Арктики // Материалы гляциол. исслед., 2006, вып. 100, с. 191–199.

Копанев Л.Д. Снежный покров и климат. М., Гидрометеоздат, 1982, 212 с.

Котляков В.М. Снежный покров Земли и ледники. Л., Гидрометеоздат, 1968, 479 с.

Кренке А.Н., Китаев Л.М., Разуваев В.Н. и др. Снежность на территории СНГ и его регионов в условиях глобального потепления // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 4, с. 97–106.

Павлова Т.В., Катцов В.М., Надежина Е.Д. и др. Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 3–13.

Рубинштейн К.Г., Громов С.С., Игнатов Р.Ю. Оценка воспроизведения характеристик снежного покрова в моделях общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 3, с. 327–341.

Торопов П.А. Оценка качества воспроизведения моделями общей циркуляции атмосферы климата Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология, 2005, № 5, с. 5–21.

Groisman P.Ya., Rankova E.Ya. Precipitation trends over the Russian permafrost zone // Intern. J. Climatol., 2001, No. 21, p. 657–678.

Frei A., Miller J.A., Brown R., Robinson D.A. Snow mass over North America. AMIP-2 // J. Hydrometeorol., 2005, No. 6, p. 681–685.

IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds). Cambridge, N.Y., Cambridge Univ. Press, 2007, 996 p.

Roesh A. Evaluation of surface albedo and snow cover in AR-4 coupled with climate models // J. Geophys., 2006, vol. 111, No. 5, p. 54–73.

Поступила в редакцию
30 июня 2008 г.