

Формирование и таяние снежного покрова в бассейнах великих сибирских рек

Введение

Исследованию динамики характеристик снежного покрова в северных регионах посвящено в последнее время большое количество публикаций [3, 9, 11-14, 17-20].

Снежный покров, как и облачность, является одним из сильнейших сезонных механизмов обратной связи в системе атмосфера – подстилающая поверхность. Изучение его свойств и качества воспроизведения характеристик снега в гидродинамических моделях – важный этап в моделировании климатической системы в целом и в развитии численного прогноза погоды, прежде всего для России. Адекватное наблюдением воспроизведение в моделях характеристик снежного покрова и, прежде всего, его таяния в весенний период даст надежду на возможность предсказывать весенние половодья в бассейнах крупных рек, что является чрезвычайно важной проблемой в России, страдающей от ежегодного весеннего подтопления десятков населенных пунктов.

В ряде публикаций [9,13,14] анализировались интегральные по Евразии и Северной Америке характеристики снежного покрова, полученные в экспериментах типа AMIP (Atmospheric Models Intercomparison Project – Проект Сравнения Моделей Атмосферы) [15]. С помощью приведенного в этих работах анализа, можно судить о качестве воспроизведения характеристик снежного покрова в моделях в целом, но невозможно понять качество моделирования распределения снега по континентам. Понятно, что снег является элементом, воспроизведение которого в гидродинамических моделях связано с качеством описания моделями зимней температуры почвы, температуры воздуха вблизи земли и в свободной атмосфере, а также осадков. Анализ региональных характеристик снега является одновременно и анализом региональных гидрологических и термических зимних характеристик.

Для анализа региональных гидрологических характеристик в результатах глобальных моделей часто пользуются осреднением элементов водного баланса по водосборам крупных рек [4,8]. Осреднение по водосборам крупных рек является естественным масштабом для оценки гидрологических характеристик по крупным регионам суши, результаты которого можно сравнить с наиболее надежно измеряемой гидрологической характеристикой - устьевым стоком реки.

В данной работе приводилось сравнение характеристик снежного покрова по эмпирическим данным, реанализам и по результатам численных экспериментов типа AMIP-2 (вторая фаза эксперимента) с российскими гидродинамическими моделями, осредненным по водосборам трех сибирских рек – Оби, Енисея и Лены. Гидрографы устьевого стока строились по данным для Оби – Салехард, для Енисея – Игарка, для Лены – Кусур.

1. Описание данных, применяющихся для анализа

В работе использовались параметры снежного покрова, полученные в экспериментах, проведенных по протоколу AMIP-2 – второй фазы международной программы по сравнению моделей общей циркуляции атмосферы [15]. Как известно, AMIP-2 эксперименты проводятся с моделями общей циркуляции атмосферы с расчетами на 20 лет (1979-1998 гг.) с единой температурой поверхности океана, заданной в соответствии с наблюдениями в пространственных структурах моделей, одинаковой концентрацией углекислого газа и выполнением некоторых единых свойств орографии. Для анализа имелись ряды глобальных полей водного эквивалента снега в AMIP-2 – экспериментах с моделью Гидрометцентра России (ГМЦ). Модель ГМЦ не является официальным участником AMIP-2 проекта, тем не менее, эксперименты по программе AMIP были проведены и сравнение различных аспектов

моделирования приведены в публикациях [5-9]. Кроме того, были любезно предоставлены аналогичные характеристики по воспроизведению снежного покрова официальных участников программы AMIP – Института Вычислительной Математики РАН (ИВМ) [1,2], и Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) [10]. В качестве эталонов в работе использовались данные снегомерных измерений по Сибири, любезно предоставленные сотрудниками лаборатории климата Института Географии РАН. Было также проведено некоторое сравнение характеристик снежного покрова, полученных в реанализах NCAR/NCEP (Национального Центра Атмосферных Исследований – США) [17] версии 1 и 2 и реанализа ERA-40 ECMWF (Европейского Центра Среднесрочного Прогноза Погоды) [16]. В дальнейшем предполагается посвятить вопросу оценки качества воспроизведения характеристик снежного покрова в реанализах отдельную работу.

2. Анализ изменения средних характеристик площади снежного покрова в бассейнах великих сибирских рек

На рис.1 приведен годовой ход средних за 20 лет изменений площади, покрытой снегом, по данным реанализов ERA и NCAR/NCEP-2 и по результатам AMIP экспериментов моделей ГМЦ, ГГО и ИВМ, а также годовой гидрограф стоков рек Оби, Енисея и Лены. Из анализа этих графиков можно видеть, что годовые изменения осредненных за 20 лет величин площади покрытия снегом по данным реанализов и по численным экспериментам трех моделей в целом близки друг к другу. Они практически совпадают по площади установившегося снежного зимнего покрова. Видно, что накопление снега и таяние в западной, центральной и восточной частях Сибири (водосборы Оби, Енисея и Лены – соответственно) заметно отличаются друг от друга. В большой мере, это связано с различным характером годового хода температуры и осадков в каждом из регионов. К сожалению, не имелось соответствующих полей приземной температуры воздуха и осадков для всех моделей, а только эмпирические данные и результаты эксперимента с моделью ГМЦ. Эти данные, осредненные по тому же интервалу времени и тем же бассейнам приведены на рис. 2. Ниже, при более детальном анализе результатов рис. 1, будем прибегать и к рассмотрению рис. 2. Причем эталонными данными для приземной температуры воздуха служили ряды температуры на уровне 2м NCAR/NCEP реанализа, а для осадков – данные GPCP (Глобального Проекта Климатических Осадков). Эталонные данные осреднены по тем же временным интервалам и пространственным регионам, что и результаты экспериментов с моделями.

2.1. Анализ формирования снежного покрова в осенний период

Описание изменения массы снежного покрова является отражением термических и гидрологических свойств атмосферы и суши. Как уже упоминалось выше средние термические характеристики в бассейнах рек, приведенные на рис. 2, вполне удовлетворительно описываются в эксперименте с моделью ГМЦ. Можно видеть, что по результатам AMIP – эксперимента в бассейнах Оби и Енисея температуры зимой и осенью на несколько градусов выше наблюдений. В бассейне р.Лены температуры ближе к наблюдениям и отличия заметны только в ноябре-январе.

Осадки по данным эксперимента с моделью ГМЦ завышены по величине во всех сезонах приблизительно в 1,5 раза. Соотношения величины осадков в различных бассейнах в осеннее - зимний период по результатам эксперимента соответствует наблюдениям – а именно осенью и зимой количество осадков в бассейне Оби выше, чем в остальных бассейнах, наименьшие величины осадков в бассейне Лены. Количество осадков именно этого сезона определяет формирование снежного покрова (накопление максимальной величины).

Из анализа рис. 1 видно, что в среднем снежный покров формируется в бассейне р.Обь, начиная с сентября, а с ноября до середины марта площадь, покрытая снегом, практически не

меняется. Причем накопление снега протекает вполне равномерно. В бассейне р.Енисей формирование снежного покрова протекает интенсивнее в первую половину осени и несколько медленнее в конце осени. На Лене в среднем снег ложится чуть ли не на месяц раньше и, судя по данным реанализов, к концу октября его формирование, практически, заканчивается. Снег на Лене держится на месяц дольше, почти до мая – июня.

Объяснение различий в процессе накопления снега связано, естественно, с термическими и гидрологическими особенностями регионов. Обратимся опять к рис.2.

В течение всего периода формирования снежного покрова, согласно рис.2, средняя температура в бассейне р.Обь на 3-4°C выше температуры в бассейне р.Енисей, а температура для бассейна р.Енисей на 4-5°C выше средней температуры бассейна р.Лена. Можно заметить также, что средний термический режим во всех трех бассейнах воспроизведен в эксперименте с моделью ГМЦ весьма близко к данным реанализа. Характерное распределение осадков в период образования снежного покрова также приводится на рис.2. Большие величины осадков в течение всего осенне-зимнего периода соответствуют бассейну р.Обь, несколько меньшие величины – бассейну р.Енисей и еще меньшие – р.Лена. Заметим также, что взаимное соотношение величин осадков по регионам воспроизведено аналогично соотношению осадков по данным GPCP, в то время как абсолютные величины осадков в эксперименте завышены почти во все сезоны и для всех трех бассейнов. Более низкие температуры в бассейне Лены в сентябре приводят к более раннему формированию снежного покрова в Восточной Сибири. Скорость роста снежного покрова выше в первые месяцы в бассейне р.Лена, чуть ниже в бассейне р.Енисей и самая низкая в бассейне р.Обь.

Формирование снежного покрова для бассейнов р.Обь и р. Енисей, воспроизводимое моделью ГГО, происходит медленней, чем в модели ГМЦ. Средние величины площади, покрытой снегом, для бассейна р.Обь и р. Енисей по данным эксперимента с моделью ГМЦ ближе к величинам из реанализа NCAR\NCEP, а по данным экспериментов с моделями ГГО и ИБМ эти величины несколько выше и близки к данным реанализа ERA. Для бассейна р.Лена площадь снега по результатам эксперимента с моделью ИБМ по сравнению с остальными моделями и данными реанализов завышена. Модельные расчеты ГГО близки к данным реанализа ERA, а результаты модели ГМЦ – практически совпадают с данными реанализа NCAR\NCEP.

2.2. Анализ процесса таяния снежного покрова великих сибирских рек

Рассмотрим весьма важный, как для анализа качества моделирования гидрологии региона, так и для решения прогностических задач, режим таяния снега. Судя по данным рис. 2, весна в Западной Сибири наступает раньше и температуры воздуха над бассейном р.Оби заметно выше, по сравнению с другими бассейнами, в весенние месяцы. Сезон таяния снега может начинаться в середине – конце марта. В водосборе Лены сход снега происходит на месяц позже. Скорость роста стока рек прямо пропорциональна скорости таяния снежного покрова. Максимум скоростей роста стока и таяния снега для Оби приходится на конец апреля, а для Лены – на май. Интенсивность таяния снега в окрестностях Енисея растет постепенно в течение первых двух календарных весенних месяцев.

Ниже приводятся результаты сравнения таяния снега в реанализах. Время, за которое протекает таяние снежного покрова, зависит как от интенсивности потепления в регионах, так и от запасов снега, накопленных за зиму. Судя по средним данным, приведенным на рис. 2, над Западной Сибирью наблюдаются более высокие зимние осадки, чем над Восточной Сибирью. По результатам многолетних наблюдений максимальная толщина снега в бассейне р.Оби в конце зимы составляет 39 см, а в бассейне Лены – 32 см [19].

Необходимо отметить, что, судя по рис.1, таяние во всех бассейнах (с точностью в месяц) заканчивается почти одновременно - к июлю.

Отметим также, что время таяния снега для бассейна р. Оби практически совпало в данных

обоих реанализов. Темп таяния снега вполне удачно описан в эксперименте с моделью ГМЦ. По результатам эксперимента с моделью ИВМ таяние начинается на месяц – полтора раньше и протекает медленнее. По данным эксперимента с моделью ГГО таяние снега начинается позже чем по данным реанализов и протекает быстрее. Заканчивается таяние (с месячной точностью) практически одновременно по результатам всех моделей.

Для бассейна р.Енисей и Лена по данным реанализа ЕРА снегом покрыта несколько большая площадь, но таяние снега начинается и заканчивается, практически одновременно. Очень близкий к данным реанализов характер таяния снега отразился в эксперименте с моделью ГМЦ. И в бассейне р.Енисей и в бассейне р.Лена таяние снега по данным эксперимента ГГО задержалось практически на месяц и закончилось только в июле. Темп таяния снега по данным модели ИВМ ближе к данным реанализов, но протекает более интенсивно, хотя заканчиваются, как и в остальных моделях, в июне.

Несколько слов необходимо добавить о связи стока сибирских рек с изменением снежного покрова. По графикам, приведенным на рис. 1, видно, что рост годового стока сибирских рек и уменьшение площади снежного покрова происходит практически одновременно (в весьма грубом месячном приближении). Несмотря на различия в термических характеристиках, в среднем максимальных значений сток достигает на всех реках в мае-июне, в то время, как заметная часть бассейна еще покрыта снегом (порядка 40% площади). По данным реанализов в момент пика стока в бассейне Оби сохраняется 8% покрытия (6,4% по эмпирическим данным из [18]), 18 % для Енисея (21,1% по [18]) и 19% для Лены (32,1% по [18]). В общей картине изменения средней площади, покрытой снегом, эти свойства отражены для всех моделей. Наибольшие отличия от данных реанализов наблюдаются в результатах экспериментов с моделью ГГО. Проводится качественное сравнение таяния снега в моделях с изменением стока, так как сток, и особенно многолетний средний сток, как уже упоминалось выше, является наиболее надежно измеряемой интегральной гидрологической характеристикой бассейна, более точной, чем средние по бассейнам характеристики снежного покрова или осадки.

3. Анализ данных снегомерных наблюдений в бассейнах великих рек Сибири для получения эталонов оценок описания аномалий снежного покрова в численных экспериментах

Кроме анализа воспроизведения моделями средних за 20 лет режимов формирования и таяния снега, была предпринята попытка оценки описания аномалий снежного покрова. Для этого были проанализированы результаты снегомерных измерений по Сибири.

На рис. 3 приведена карта распределения снегомерных станций для водосборов крупных рек России. Видно, что бассейны рассматриваемых нами рек – Оби, Лены и Енисея – покрывают, практически, всю Сибирь и являются значительными континентальными регионами Северного полушария. Необходимо подчеркнуть, что на рис. 3 представлено максимально возможное количества станций, по которым имеются снегомерные измерения в виде толщины снежного покрова и водного эквивалента в нем. Период наблюдений и пропуски наблюдений для каждой станции заметно различаются. В каждый момент времени, особенно в весенний период таяния снега, информация приходит с меньшего числа станций, чем представлено на рис. 3. Даже при том, что приведенная сеть является максимально возможной, видно, что снегомерные станции расположены крайне неравномерно по площади водосборов и основная часть измерений характеристик снежного покрова проводится в верховьях рек. Лишь небольшое количество станций расположено вдоль русла рек. Снежный покров в низовьях рек Обь, Енисей и Лена, даже потенциально, измеряется на очень редкой сети. Для получения представительных для каждого бассейна рядов аномалий снега были выбраны по девять снегомерных станции для каждого бассейна. Выбор станций определялся максимально возможной полнотой и качеством наблюдений с минимальным количеством пропусков в данных за 1979-1998 гг, а кроме того

необходимостью описания характера снежного покрова в верховье, среднем течении реки и в низовье. Для каждой части русла выбиралось не менее 3 станций. Выбор 3 близлежащих станций для каждой части течения реки была связана с необходимостью проведения тщательного контроля данных на наличие ошибок. Данные толщины снежного покрова на каждой станции сравнивались с данными соседних станций, расположенных на однородном ландшафте. Отбраковывались выбросы, при которых величины различались в 3 и более раза, а затем оставшиеся данные усреднялись помесечно. В случае отсутствия или ошибочности данных в интервале более трети месяца, данные отбраковывались. В результате этой процедуры, получился ряд для бассейна с наименьшим возможным пропуском информации. Расположение станций с осредненными рядами для каждого бассейна представлено на карте в виде звездочек.

Для периода 1979-1996 гг. были рассчитаны месячные нормы величин водного эквивалента для каждой станции и, соответственно, их месячные аномалии. Были проанализированы корреляции аномалий для каждой части бассейна и показано, что месячные аномалии по отдельным станциям неплохо согласуются друг с другом во всех частях бассейнов по знакам и по величинам. Коэффициенты корреляции выше 0,6. Необходимо отметить также, что в мае во всех бассейнах было заметно меньше данных наблюдений, чем в остальных месяцах и можно говорить как об отсутствии снега в эти годы, так и об отсутствии информации о снеге на станциях. Коэффициенты парных корреляций временного хода месячных аномалий по станциям каждого бассейна за интервал 20 лет получались в пределах 0,5-0,8. В связи с этим мы усреднили месячные аномалии по 9 станциям бассейна и в дальнейшем рассматривали эти средние аномалии, как станционные характеристики временного хода аномалий массы снега в бассейне. В дальнейшем планируется более детальный анализ данных наблюдений на снегомерной сети.

4. Сравнение аномалий площади снежного покрова в анализируемых бассейнах, полученных по данным снегомерных съемок, с результатами реанализов NCAR/NCEP-2 и ERA и результатами AMIP – экспериментов с моделями

Основной задачей работы, как было сказано во введении, является оценка воспроизведения характеристик снежного покрова в российских гидродинамических моделях. Для подобной оценки весьма важным звеном является определение эталона, по сравнению с которым будут оцениваться результаты моделирования. Поэтому следующим этапом работы явилось сравнение аномалий площади снежного покрова для тех же трех бассейнов рек, средних по девяти станциям, с аномалиями величины площади снега, полученными для двух реанализов. Графики временного хода аномалий площади, покрытой снегом, для трех бассейнов рек за 20 лет не приводятся только для экономии места в работе. В таблице приведены коэффициенты парных корреляций между аномалиями площади, покрытой снегом, для каждого бассейна, а также между данными снегомерных станций и стоком соответствующей реки со сдвигом в месяц. Анализируя данную таблицу, можно видеть, что корреляции потенциальных эталонов друг с другом очень низкие. Только для бассейна р.Енисей коэффициенты корреляции аномалий площади снега по данными снегомерной съемки со стоком выше 0,5.

Парные коэффициенты корреляции рядов аномалий площади, покрытой снегом, по данным измерений и реанализов
для бассейнов рек Оби, Лены и Енисея за 1979-1998 гг.

	Месяц	ERA-STA	STA-NCEP	ERA-NCEP
--	-------	---------	----------	----------

Бассейн Енисея	Март	-0,35	0,30	0,14
	Апрель	0,24	0,33	0,27
	Май	0,44	0,47	0,22
	Июнь	–	–	0,35
Бассейн Лены	Март	0,26	-0,49	-0,07
	Апрель	0,41	-0,15	0,08
	Май	0,47	-0,34	0,34
	Июнь	–	–	0,41
Бассейн Оби	Март	0,05	-0,19	0,07
	Апрель	0,23	-0,09	0,30
	Май	-0,25	0,21	0,44
	Июнь	–	–	-0,02

Примечание. ERA-STA – корреляция данных снегомерных съемок с результатами ERA – реанализа; STA-NCEP – корреляция данных снегомерных съемок с результатами NCAR/NCEP – реанализа; ERA-NCEP – корреляция результатов ERA – реанализа с результатами NCAR/NCEP – реанализа.

В связи с этим, на данном этапе исследования не имеется достаточно надежных эталонов аномалий площади, покрытой снегом, для бассейнов рек и оценка рядов аномалий характеристик снежного покрова для бассейнов рек по результатам моделирования в настоящее время невозможна.

Выводы

В работе анализируются характеристики снежного покрова, полученные в реанализах NCAR/NCEP и ERA, а также в численных экспериментах с моделями ОЦА типа AMIP-2 ГМЦ, ИВМ РАН и ГГО им. А.И.Воейкова.

Показано, что средние за 20 лет эксперимента изменения площади снежного покрова в регионах великих сибирских рек Обь, Енисей и Лена воспроизводятся всеми моделями. В осеннее-зимний период формирования снежного покрова результаты всех моделей близки друг к другу, а в весенний период активного таяния снега – в эксперименте с моделью ГМЦ ближе к эталону, чем в остальных российских моделях.

После сравнения аномалий осредненных данных снегомерной съемки в бассейнах рек с данными реанализов и результатами численных экспериментов показано также, что в настоящее время затруднительно и не достаточно надежно оценивать аномалии характеристик снежного покрова в бассейнах сибирских рек.

Авторы работы выражают признательность сотруднику ИВМ РАН Володину Е.В., и сотруднику ГГО им. А.И. Воейкова Катцову В.И. за предоставленные ряды по водному эквиваленту снега в экспериментах AMIP-2.

Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ N 03-05-64312, 04-05-64151, 04-05-65099, а также гранта INTAS - 03-51-5296.

Список литературы

1. Володина Е.Е., Бенгтссон Л., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепловлагопереноса в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 5. – С. 5-14.
2. Дианский Н.А., Володин Е.М. Воспроизведение современного климата с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 38. – № 6. – С. 824-840.

3. Катцов В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Пресноводный бюджет полярных регионов по оценкам моделей общей циркуляции атмосферы // Изв. АН. Физика Атмосферы и Океана. 1998. – Т. 34. – № 4. – С. 479-489.
4. Павлова Т.В., Мелешко В.П., Говоркова В.А. Характеристики теплового и водного баланса на водосборах крупных рек в модели атмосферы ГГО, рассчитанные в рамках международного проекта сравнения моделей атмосферы АМИР-I и АМИР-II // Труды ГГО. – 2001. – вып. 550. – С. 85-109.
5. Рубинштейн К.Г., Егорова Е.Н., Шмакин А.Б. Региональные изменения гидрологического баланса на суше и в атмосфере при уничтожении Сибирских лесов (результаты численных экспериментов с моделью ОЦА Гидрометцентра России). Проблемы гидрометеорологии и окружающей среды на пороге XXI века // Труды междунар. теоретической конф. – СПб.: Гидрометиздат. – 2000. – С. 200-215.
6. Рубинштейн К.Г., Егорова Е.Н. Оценка воспроизведения годового хода характеристик атмосферы и суши моделью общей циркуляции атмосферы // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – вып.33. – С. 41-98.
7. Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Егорова Е.Н. Влияние температуры поверхности океана на свойства азиатского муссона (анализ результатов экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России) // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 8. – С. 18-27.
8. Рубинштейн К.Г., Шмакин А.Б. Оценки сезонного хода крупномасштабного речного стока в глобальной модели общей циркуляции Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 5. – С. 31- 48.
9. Рубинштейн К.Г., Громов С.С., Воспроизведение характеристик снежного покрова в моделях общей циркуляции атмосферы // Изв. АН. Физика Атмосферы и Океана. 2005 (в печати).
10. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Соколов А.П. и др. Глобальная модель общей циркуляции атмосферы и верхнего слоя океана ГГО // Труды ГГО. – 1997. – вып. 544. – С. 3-123.
11. Barnett T. P., Dumenil L., Schlese U. Roeckner E., Latif M. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. // J. of Atm.Sc. V.46. No 5. 1989, p. 661-685.
12. Foster J., Liston G., Koster R., Essery R., Behr H., Dumenil L., Verseghy D., Thompson S., Pollard D. and Cohen J. Snow cover and snow mass intercomparisons of general circulation models and remotely sensed datasets. // J.Clim. No 9, 1996, p. 409-426.
13. Frei A., D. Robinson., Evaluation of snow extent and its vaiability in the Atmospheric Model Intercomparison Project. // J.of Geoph.Res., 1998, vol 103, N D8, p. 8859-8871.
14. Frei A., J.A.Miller, D. Robinson., Improved simulation of snow extent in the second phase of Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-2). //J.of Geoph.Res., 2003, vol 108, N D12, p. 10-1,10-17.
15. Gates W. L. An overview of AMIP and preliminary results. // Proceedings of The First International AMIP scientific conference (Monterey, California, USA, 15-19 May 1995), 1995, WMO/TD-No.732, p 1-8.
16. Gibson R., Kallberg P., Uppala S., Hernandez A., Nomura A., Serrano E. // ERA description, ECMWF Re-analysis Project Report Series, Vol. 1. Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 1997. 72 p.
17. Kalnay E., Kanamitsu M., R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne, Dennis Joseph. // The NCEP/NCAR 40 –Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77(3), p. 437-470.
18. Kattsov V.M., Walsh J.E., Rinke A., Dethloff K. Atmospheric climate models: Simulation of the

- Arctic Ocean fresh water budget components. // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean. E. L. Lewis(ed.). Dordrecht, 2000, Kluwer Academic Publ., 209-247.
19. Yang D., Robinson D., Zhao Y., Estilow T., Ye B. Streamflow response to seasonal snow cover extent changes in large Siberian watersheds. // Journal of Geophysical Research, 2003, Vol. 108, No. D18, p. 4578-?.
 20. Walsh J.E., Kattsov V., Chapman W. et al. Comparison of Arctic climate simulations by uncoupled and coupled global models. // J. Climate, 2002, vol. 15, p.1429-1446.