Е. В. Гайдукова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСРЕДНЕННОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СЦЕНАРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛЕТНЕГО РЕЧНОГО СТОКА

E. V. Gaidukova

DEFINITION OF AVERAGE CLIMATIC SCENARIO MODEL FOR A LONG-TERM ESTIMATION OF THE CHARACTERISTICS OF A LONG-TERM RIVER FLOW

Рассмотрена методика определения климатической сценарной модели, характеризующей усредненные условия формирования максимального стока весеннего половодья на примере Арктической зоны России. Выявлено, что для рассматриваемой территории таковой является модель UKMO-HadCM3 сценария SRB1.

Ключевые слова: климатические сценарии, долгосрочный прогноз, максимальный сток весеннего половодья, Арктическая зона России.

The technique of definition of the climatic scenario model describing average conditions of formation of the maximal flow of a spring high water on an example of the Arctic zone of Russia is considered. Is revealed, that for considered territory those is model UKMO-HadCM3 of the scenario SRB1.

Key words: the climatic sceneries, long-term forecast, maximal flow of a spring high water, Arctic zone of Russia.

Введение

При долгосрочной оценке гидрологических последствий изменения климата с использованием стохастических моделей [1, 2, 3] в качестве внешнего воздействия задаются нормы метеорологических характеристик, определяемые по выбранному климатическому сценарию. В настоящее время на сайте Интернет Всемирной метеорологической организации (ВМО) для всеобщего использования прилагается семь сценариев, в каждом из которых 23 модели. Возникает проблема выбора усредненной климатической сценарной модели для целей долгосрочного прогнозирования статистических характеристик многолетнего стока. В статье рассмотрена методика выявления климатического сценария с моделями сценарной модели, характеризующей усредненные условия формирования максимального стока весеннего половодья на примере Арктической зоны России.

Методика исследований

На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ разработана методика долгосрочной оценки статистических характеристик речного стока при изменении климата. Она подробно описана в работах [1,2], но в данной статье использовался упрощенный вариант методики, адаптированный к практическому применению [3].

Адаптация заключается в ряде допущений, сделанных в отношении системы уравнений для моментов, аппроксимирующих модель формирования стока в виде уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова. Оно приведено к виду, справедливому для стационарных случайных процессов (уравнение Пирсона, но с коэффициентами, непосредственно связанными с факторами формирования стока). Были сделаны следующие допущения: 1) использовалось фиксированное отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации; 2) процесс формирования многолетнего стока рассматривался как статистически стационарный, так как сами климатические сценарии предполагают метеорологические характеристики на определенный временной промежуток в несколько десятилетий статистически стационарными. Поэтому для оценки гидрологических последствий изменения климата для рек использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0, \\ -2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\tilde{N}} &= 0, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\bar{c}$ – математическое ожидание параметра, обратного коэффициенту многолетнего стока; m_1, m_2 – первый и второй начальные моменты, зная которые можно определить норму и коэффициент вариации стока; $\bar{N}$ – норма осадков; $G_{\tilde{N}}$ – интенсивность белого шума осадков.

В системе (1) отсутствует интенсивность $G_{\tilde{n}}$ белого шума параметра c, так как она приравнивалась нулю. Такой подход обеспечивает относительную устойчивость решения применяемой модели формирования стока и в настоящем и в будущем климате.

Выявление климатического сценария, характеризующего усредненные условия формирования максимального стока весеннего половодья

Арктическая зона России занимает территорию с различными физико-географическими условиями формирования максимального стока весеннего половодья. Поэтому были выбраны три репрезентативные гидрологические станции, расположенные в Северном крае, Западной Сибири и Восточной Сибири: р. Уфтюга – д. Ярухино (площадь водосбора 3540 км^2), р. Щучья – д. Щучье (площадь водосбора 10 600 км^2), р. Бохапча – 5,4 км от устья (площадь водосбора 13 600 км^2). Координаты этих станции соответственно (широта, долгота): 61.72°, 46.72°; 67.21°, 68.76°; 62.10°, 150.67°.

База данных по сценарным нормам метеовеличин была сформирована с использованием сайта ВМО http://www.ipcc-data.org [4]. В работе использованы сценарии четвертого доклада [4]: 1PTO2X, 1PTO4X, COMMIT, PICTL, SRA1B, SRA2, SRB1. Сценарий 1PTO2X прогнозирует увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере до двойной по сравнению с 1990 г. Сценарий 1PTO4X отличается тем, что концентрация парниковых газов увеличится в четыре раза. По сценарию COMMIT скорость изменения концентрации парниковых газов останется такой же, как в XX веке. Сценарий PICTL указывает на то, что концентрация парниковых газов вернется к значению, соответствующему 1990 г. Сценарий SRA1B соответствует быстрому экономическому и технологическому росту, который приведет к снижению концен-

трации парниковых газов к середине XXI столетия. По сценарию SRA2 тоже происходит экономический рост, но локальный, не приводящий к снижению уровня концентрации парниковых газов. Сценарий SRB1 похож на сценарий SRA1B; отличается только скоростью роста экономики и технологий.

В табл. 1 представлены сценарные нормы климатических характеристик (осадков и температуры воздуха) на 2060 г. (у некоторых моделей отсутствуют прогнозные значения – прочерки в ячейках таблицы).

Для водосбора р. Уфтюга – д. Ярухино максимальные различия в значениях норм осадков наблюдаются в моделях BCC-CM1 и ECHAM5/MPI-OM по всем сценариям, а по температуре – в моделях GFDL-CM2.0 и BCC-CM1. При оценке общей картины можно отметить, что по всем сценариям происходит незначительное изменение норм осадков в этом бассейне. Температура же меняется значительно, особенно это заметно для сценариев PICTL и COMMIT.

Сценарий PICTL по всем моделям прогнозирует похолодание, хотя норма осадков отличается от современной в среднем на 12 %.

Больше всего рабочих прогнозных моделей у сценария SRA1B. Модели этого сценария прогнозируют как потепление, так и похолодание. Модели CCSM3 и PCM прогнозируют примерно одинаковые нормы осадков, а температура отличается на 5,5 °С. Этот пример показывает, что при прогнозе гидрологических характеристик следует учитывать не только прогнозные осадки, но и температуру, от которой зависят потери осадков на водосборах (испарение).

Последние два сценария SRB1 и SRA2 похожи по численным значениям норм осадков и температуры.

Для водосбора р. Щучья – д. Щучье по сценарию 1PTO2X по пяти моделям прогнозируется потепление, т. е. прогнозная норма приземной температуры больше настоящей нормы температуры. Норма осадков мало изменится на 2060 г., исключая прогнозную норму по модели BCC-CM1.

Сценарий 1PTO4X похож на сценарий 1PTO2X, некоторые модели даже дают одинаковые прогнозные значения и осадков, и температуры.

По сценарию COMMIT происходит похолодание с небольшим, в основном, увеличением норм осадков. А по сценарию PICTL произойдет еще большее похолодание с еще меньшим изменением осадков.

Три «политических» сценария SRA1B, SRA2 и SRB1 схожи по концепции прогноза ожидаемых изменений климата, и в таблице значения климатических характеристик мало отличаются друг от друга. Выпадают из общей картины только модели CCSM3 и BCC-CM1. По ним прогнозируется увеличение температуры воздуха и уменьшение нормы осадков.

Для бассейна р. Бохапча – 5,4 км от устья по всем сценариям прогнозируется значительное увеличение нормы осадков и незначительное изменение нормы приземной температуры, в основном в сторону увеличения, т. е. потепление. Разница между фактическими и прогнозными нормами осадков по сценариям 1PTO2X и SRA1B достигает примерно 900 мм/год. Максимальное отличие между нормами температур составляет 13 °С; оно прогнозируется по модели BCC-CM1.

Таблица 1

Нормы среднегодовых осадков и температуры приземного воздуха на 2060 г.

	Scenario 1PTO2X		Scenario 1PTO4X		Scenario COMMIT		Scenario PICTL		Scenario SRA1B		Scenario SRA2		Scenario SRB1	
Модель	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C
р. Уфтюга – д. Ярухино ($N_{факт}$ =583 мм/год, $T_{факт}$ = 1,1 °C)														
BCC-CM1	68	4,9	58	5,1	–	–	–	–	–	–	–	–	192	5,0
BCCR-BCM2.0	581	-2,9	–	–	570	-3,9	570	-5,9	592	-1,7	–	–	591	-3,0
CCSM3	–	–	–	–	745	2,4	–	–	781	4,5	766	4,2	742	3,5
CGCM3.1(T47)	590	-1,5	718	1,8	–	–	483	-5,6	595	-1,2	–	–	–	–
CGCM4.1(T63)	–	–	–	–	–	–	–	–	606	-0,4	–	–	577	-1,1
CNRM-CM3	662	0,0	742	2,6	643	-1,3	–	–	734	1,0	684	0,8	–	–
CSIRO-MK3.0	632	-2,8	–	–	657	-3,3	–	–	656	-2,1	665	-1,9	639	-2,3
ECHAM5/MPI-OM	927	3,4	–	–	–	–	–	–	893	1,7	845	1,5	840	1,3
ECHO-G	782	1,5	772	0,9	651	-2,7	596	-5,7	721	0,3	742	0,4	–	–
FGOALS-g1.0	–	–	–	–	662	-3,8	690	-3,6	697	-1,4	–	–	681	-2,4
GFDL-CM2.0	643	-4,4	653	-4,6	638	-4,6	668	-7,1	720	-2,0	695	-2,2	711	-2,8
GFDL-CM2.1	620	-2,7	620	-2,7	627	-2,5	613	-4,2	711	0,4	703	-0,5	649	-0,6
GISS-AOM	–	–	–	–	–	–	728	-4,8	800	-1,5	–	–	748	-2,1
GISS-EH	478	-1,8	–	–	–	–	–	–	450	–	–	–	–	–
GISS-ER	543	-2,7	–	–	442	-4,5	–	–	–	–	480	-3,0	455	-3,4
INM-CM3.0	767	2,1	895	5,5	756	0,2	650	-2,1	808	2,6	819	2,6	771	1,9
IPSL-CM4.0	625	-0,5	666	3,3	592	-3,2	583	-5,4	637	0,2	642	0,1	602	-0,6
MIROC3.2(hires)	653	2,7	–	–	–	–	–	–	684	5,2	–	–	677	4,4
MIROC3.2(medres)	647	0,9	647	0,9	612	-0,3	–	–	645	2,6	641	2,3	645	1,6
MRI-CGCM2.3.2	–	–	–	–	577	-3,2	558	-3,9	658	-1,2	629	-1,5	608	-1,9
PCM	–	–	–	–	–	–	–	–	780	-1,1	777	-0,5	–	–
UKMO-HadCM3	–	–	–	–	613	-3,7	585	-4,5	673	-0,7	641	-0,8	659	-1,6
UKMO-HadGEM1	–	–	–	–	–	–	724	-2,0	774	3,3	781	3,2	–	–

Продолжение таблицы 1

	Scenario 1PTO2X		Scenario 1PTO4X		Scenario COMMIT		Scenario PICTL		Scenario SRA1B		Scenario SRA2		Scenario SRB1	
Модель	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C
р. Щучья – д. Щучье ($N_{факт}$ =387 мм/год, $T_{факт}$ = – 6,1 °C)														
BCC-CM1	45	1,3	39	1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	109	1,9
BCCR-BCM2.0	365	-12,7	–	–	358	-13,6	364	-16,2	364	-11,1	–	–	379	-12,5
CCSM3	–	–	–	–	569	-3,6	–	–	610	-0,2	599	-0,6	606	-1,9
CGCM3.1(T47)	352	-8,1	442	-3,8	–	–	296	-13,1	369	-7,1	–	–	–	–
CGCM4.1(T63)	–	–	–	–	–	–	–	–	388	-6,6	–	–	391	-7,6
CNRM-CM3	467	-8,7	561	-4,6	430	-10,4	–	–	502	-7,3	483	-7,7	–	–
CSIRO-MK3.0	470	-10,9	–	–	479	-11,2	–	–	477	-10,2	504	-9,5	487	-10,6
ECHAM5/MPI-OM	646	-2,1	–	–	–	–	–	–	581	-4,0	621	-4,8	576	-4,9
ECHO-G	470	-4,0	461	-4,9	395	-9,1	366	-11,9	440	-5,2	444	-5,3	–	–
FGOALS-g1.0	–	–	–	–	596	-9,6	623	-9,5	637	-6,8	–	–	622	-8,2
GFDL-CM2.0	477	-11,8	466	-12,1	453	-11,3	438	-14,4	492	-9,0	471	-9,3	480	-10,0
GFDL-CM2.1	345	-10,8	345	-10,8	433	-9,2	393	-11,5	483	-5,8	472	-7,1	434	-7,4
GISS-AOM	–	–	–	–	–	–	537	-12,0	627	-7,7	–	–	579	-8,5
GISS-EH	326	-10,2	–	–	–	–	–	–	315	-10,0	–	–	–	–
GISS-ER	380	-12,1	–	–	347	-13,7	–	–	–	–	363	-11,9	355	-12,2
INM-CM3.0	542	-3,9	586	-0,1	497	-5,8	442	-8,4	553	-3,5	540	-3,3	522	-4,4
IPSL-CM4.0	492	-10,6	608	-6,1	574	-13,1	485	-15,7	600	-9,8	500	-9,8	500	-10,1
MIROC3.2(hires)	501	-5,0	–	–	–	–	–	–	549	-2,0	–	–	565	-2,8
MIROC3.2(medres)	363	-11,2	363	-11,2	321	-11,8	–	–	400	-8,1	388	-8,2	374	-9,6
MRI-CGCM2.3.2	–	–	–	–	360	-12,4	316	-14,0	391	-9,8	378	-10,4	350	-10,7
PCM	–	–	–	–	–	–	–	–	420	-9,7	422	-9,5	–	–
UKMO-HadCM3	–	–	–	–	405	-13,6	373	-15,3	486	-10,1	483	-10,4	455	-10,7
UKMO-HadGEM1	–	–	–	–	–	–	518	-11,1	627	-3,8	612	-4,4	–	–

	Scenario 1PTO2X		Scenario 1PTO4X		Scenario COMMIT		Scenario PICTL		Scenario SRA1B		Scenario SRA2		Scenario SRB1	
Модель	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C	*N* мм	*T* °C
р. Бохапча – 5.4 км от устья ($N_{факт}$ =351 мм/год, $T_{факт}$ = – 11,6 °C)														
BCC-CM1	65	2,0	69	2,0	–	–	–	–	–	–	–	–	259	1,8
BCCR-BCM2.0	720	-12,6	–	–	696	-12,7	650	-14,4	759	-11,2	–	–	746	-11,5
CCSM3	–	–	–	–	716	-10,6	–	–	790	-8,3	799	-8,3	740	-9,3
CGCM3.1(T47)	445	-12,7	589	-8,4	–	–	380	-16,5	480	-12,2	–	–	–	–
CGCM4.1(T63)	–	–	–	–	–	–	–	–	499	-12,5	–	–	477	-13,1
CNRM-CM3	824	-10,3	936	-7,1	777	-10,8	–	–	835	-9,0	821	-9,4	–	–
CSIRO-MK3.0	688	-8,9	–	–	651	-9,4	–	–	651	-8,1	659	-8,0	682	-8,6
ECHAM5/MPI-OM	868	-8,2	–	–	–	–	–	–	837	-9,6	770	-9,8	803	-9,8
ECHO-G	619	-9,0	601	-9,9	501	-13,3	488	-14,9	541	-10,4	586	-10,5	–	–
FGOALS-g1.0	–	–	–	–	893	-11,3	984	-11,6	985	-8,6	–	–	1017	-9,5
GFDL-CM2.0	548	-13,4	584	-13,4	561	-13,0	554	-14,6	582	-11,8	568	-11,9	594	-11,9
GFDL-CM2.1	546	-11,3	546	-11,3	551	-11,8	467	-13,6	606	-9,3	569	-10,1	563	-10,2
GISS-AOM	–	–	–	–	–	–	882	-8,6	991	-5,7	–	–	996	-6,2
GISS-EH	1210	-9,0	–	–	–	–	–	–	1232	-9,1	–	–	–	–
GISS-ER	772	-7,4	–	–	695	-8,5	–	–	–	–	760	-7,2	716	-8,1
INM-CM3.0	739	-3,7	879	0,3	774	-4,6	713	-7,0	819	-2,6	779	-2,8	763	-3,6
IPSL-CM4.0	713	-6,7	814	-2,7	694	-8,2	637	-9,9	728	-5,9	691	-6,5	722	-6,8
MIROC3.2(hires)	691	-9,0	–	–	–	–	–	–	761	-6,7	–	–	747	-7,1
MIROC3.2(medres)	687	-9,7	687	-9,7	643	-10,4	–	–	738	-7,9	738	-8,3	708	-8,5
MRI-CGCM2.3.2	–	–	–	–	450	-10,9	454	-11,7	472	-9,6	454	-10,0	457	-10,3
PCM	–	–	–	–	–	–	–	–	584	-13,2	588	-13,4	–	–
UKMO-HadCM3	–	–	–	–	429	-11,4	407	-13,6	540	-8,2	515	-8,4	509	-9,4
UKMO-HadGEM1	–	–	–	–	–	–	447	-15,3	562	-9,5	544	-9,4	–	–

По изложенной выше методике спрогнозированы норма слоя стока весеннего половодья, второй и третий моменты (соответственно коэффициенты вариации и асимметрии) по всем перечисленным сценариям и моделям на 2060 г. По норме прогнозного слоя стока, коэффициентам вариации и асимметрии построены аналитические кривые обеспеченности Пирсона III типа (рис. 1).

Для каждого сценария рассчитаны осредненные по моделям кривые обеспеченности (на рис. 1 – черные кривые) и найдены те сценарные модели, к которым эти средние ближе всего.

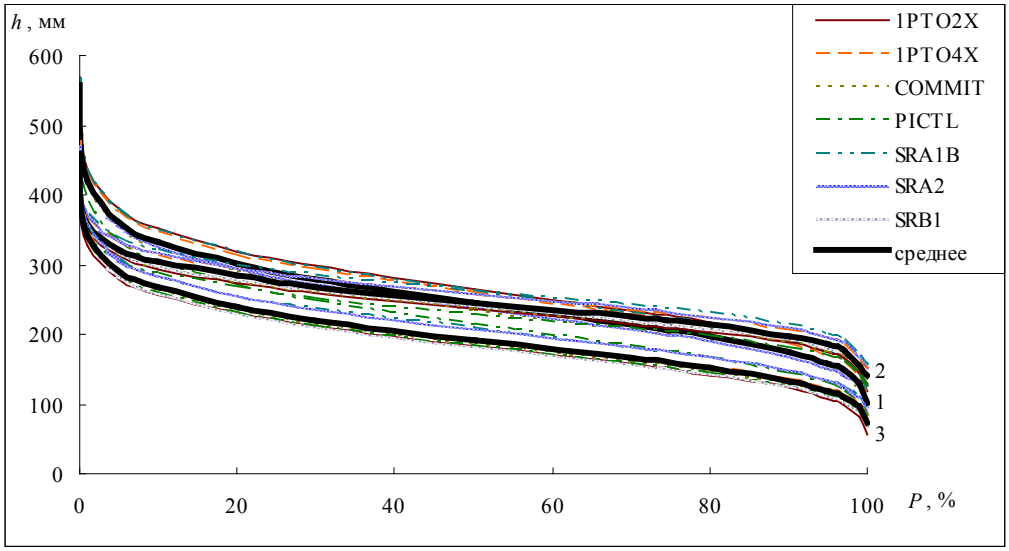

Рис. 1. Осредненные прогнозные кривые обеспеченности на 2060 г.
1 – р. Уфтюга – д. Ярухино; *2* – р. Щучья – д. Щучье; *3* – р. Бохапча – 5,4 км от устья.

В табл. 2 представлены выбранные модели по всем сценариям для трех рассматриваемых водосборов. Чаще всего встречаются модели GFDL-CM2.1 и CSIRO-MK3.0.

Для каждой из рек, которые являются репрезентативными для определенной физико-географической зоны, были выбраны свои характерные (ближе всего соответствующие осредненным прогностическим распределениям) сценарные модели. Для рек, находящихся в Западной и Восточной Сибири, сценарии совпадают, модели разные. При сравнении Азиатской части Арктической зоны и Европейской части получено, что сценарии разные, причем сценарии отличаются по технологии прогноза климатических характеристик: сценарий 1PTO4X учитывает только концентрации парниковых газов, а сценарий SRB1 – еще и экономическое и социальное развития населения.

В качестве характерной сценарной модели для всей территории Российской Арктики можно рекомендовать модель UKMO-HadCM3 сценария SRB1. Он является «политическим», так как в нем учитывается потенциальное экономическое развитие Арктической зоны РФ, а модель разработана для учета изменения запасов водных ресурсов в новом климате [4].

Таблица. 2

Модели, соответствующие осредненным прогнозным кривым обеспеченности

р. Уфтюга – д. Ярухино		р. Щучья – д. Щучье		р. Бохапча – 5,4 км от устья	
Сценарий	Модель	Сценарий	Модель	Сценарий	Модель
1PTO2X	GISS-ER	1PTO2X	CSIRO-MK3.0	1PTO2X	BCCR-BCM2.0
1PTO4X	CGCM3.1(T47)	1PTO4X	GFDL-CM2.0	1PTO4X	MIROC3.2 (medres)
COMMIT	GFDL-CM2.1	COMMIT	GFDL-CM2.0	COMMIT	CSIRO-MK3.0
PICTL	GFDL-CM2.1	PICTL	INM-CM3.0	PICTL	GFDL-CM2.0
SRA1B	FGOALS-g1.0	SRA1B	GFDL-CM2.0	SRA1B	IPSL-CM4.0
SRA2	GFDL-CM2.1	SRA2	UKMO-HadCM3	SRA2	CSIRO-MK3.0
SRB1	MIROC3.2 (medres)	SRB1	UKMO-HadCM3	SRB1	CSIRO-MK3.0
Средний сценарий и модель	1PTO4X CGCM3.1(T47)	Средний сценарий и модель	SRB1 UKMO-HadCM3	Средний сценарий и модель	SRB1 CSIRO-MK3.0

Выводы

Проанализированы все имеющиеся в открытом доступе климатические сценарии. Выявлены сценарные модели, прогнозирующие осредненные условия формирования слоя стока весеннего половодья Арктической зоны Российской Федерации. Климатические модели были найдены с учетом физико-географической особенности Российской Арктики, которая была поделена на три зоны, отличные друг от друга процессом формирования слоя стока весеннего половодья. Установлено, что для Европейской части Арктической зоны наиболее вероятной является модель CGCM3.1(T47) сценария 1PTO4X, для Западносибирской части – UKMO-HadCM3 сценария SRB1, а для Восточносибирской части – CSIRO-MK3.0 сценария SRB1. Подобная информация позволит давать более обоснованные долгосрочные прогнозы слоя стока весеннего половодья для Арктической территории России, [5].

Исследования выполнялись в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (грант № П740).

Литература

1. *Коваленко В.В.* Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 100 с.
2. *Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В.* Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е, испр. и доп. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
3. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. / Под ред. В. В. Коваленко – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – 50 с.
4. The IPCC Assessment Reports // [Электронный ресурс]: IPCC, 2009. – Режим доступа: htpp//www.ipcc.ch. Свободный. – На англ. яз.
5. *Коваленко В.В. и др.* Влияние изменения климата на многолетний слой стока весеннего половодья рек Арктической зоны России // Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 14, с. 14-19.