



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Выбор климатической модели
для сценарной оценки водных
ресурсов Северо-Западного
региона**

Исполнитель Емельянов Евгений Валерьевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

В.С.М.
(подпись)

д.т.н., профессор,
(ученая степень, ученое звание)

Коваленко Виктор Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

«17» июня 20__ г.

Санкт-Петербург
2016



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Выбор климатической модели**
для сценарной оценки водных
ресурсов Северо-
Западного региона

Исполнитель Емельянов Евгений Валерьевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)
д.т.н., профессор,
(ученая степень, ученое звание)
Коваленко Виктор Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1 Климатические сценарии Пятого оценочного доклада МГЭИК	4
2 Выбор модели для оценки водных ресурсов	8
3 Ретроспективные прогнозы метеоэлементов	17
4 Сценарная оценка характеристик стока с водосборов рек Северо-Западного региона	41
4.1 Методология сценарной оценки	41
4.2 Формирование базы данных	45
4.3 Результаты сверхдолгосрочных прогнозов	51
Заключение	64
Список использованных источников	65
Приложение А – Климатические характеристики по сценарным моделям с различным разрешением	67
Приложение Б – Карты-схемы погрешностей норм стока и коэффициентов вариации по различным моделям за периоды 2016–2035 гг. и 2046–2065 гг.	88

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения климата на сегодняшний день чрезвычайно актуальна. Климат на нашей планете меняется достаточно быстро, и это подтвержденный многочисленными исследованиями факт. Однако все более значительными становятся опасения, что к естественному изменению климата добавилось потепление, вызванное деятельностью человека.

Изменение климата означает не просто повышение температуры. Под термином «глобальное изменение климата» подразумевается перестройка всех геосистем, а потепление рассматривается лишь как один из аспектов изменений. Данные наблюдений свидетельствуют о повышении уровня Мирового океана, изменении режима стока рек, таянии ледников и вечной мерзлоты, усилении неравномерности выпадения осадков и других глобальных изменениях, связанных с изменением климата.

Последствия климатических изменений проявляются уже в настоящее время. Выражаются они в усилении изменчивости погоды (сильные морозы, сменяющиеся резкими оттепелями зимой, рост числа необычайно жарких дней летом), в увеличении частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений (штормов, ураганов, наводнений, засух), распространении инфекционных заболеваний, повышении уровня океана, увеличении средней температуры поверхности планеты.

В связи с вышеизложенным, целью исследования является выбор климатической модели для сценарной оценки водных ресурсов, достоверно учитывающей состояния всех компонентов моделируемой климатической системы, а также естественных и антропогенных воздействий.

1 КЛИМАТИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ ПЯТОГО ОЦЕНОЧНОГО ДОКЛАДА МГЭИК

Потепление климатической системы является неоспоримым фактом, и начиная с 1950-х годов многие наблюдаемые изменения являются беспрецедентными в масштабах от десятилетий до тысячелетий. Произошло потепление атмосферы и океана, запасы снега и льда сократились, уровень моря повысился, концентрации парниковых газов возросли.

С начала 20-го века средняя приповерхностная температура выросла на 0,74 °C. Каждое из трех последних десятилетий характеризовалось более высокой температурой у поверхности Земли по сравнению с любым предыдущим десятилетием начиная с 1850 г. В Северном полушарии 1983–2012 годы были, вероятно, самым теплым 30-летним периодом за последние 1400 лет.

Ниже излагаются сведения, взятые из текста Пятого оценочного доклада.

За последние два десятилетия Гренландский и Антарктический ледниковые покровы теряли массу, ледники сокращались практически во всем мире, площадь морского льда в Арктике и весеннего снежного покрова в Северном полушарии продолжала уменьшаться. В период с 2003 по 2009 гг. ледниковый щит Гренландии потерял более 243 млрд. тонн льда, тем самым повысив уровень Мирового океана на 4 мм. Антарктический ледяной щит тает, повышая тем самым уровень Мирового океана на 0,27 мм в год. С конца 1950-х годов температура на Антарктическом полуострове повысилась на 2,5 °C.

Темпы повышения уровня моря с середины 19-го века превысили средние темпы за предыдущие два тысячелетия. За период 1901–2010 гг. средний глобальный уровень моря повысился на 0,19 [0,17–0,21] м. Ежегодно уровень моря повышается в среднем на 3,2 мм.

Концентрации метана, двуокиси углерода и оксидов азота в атмосфере выросли до беспрецедентных уровней, по меньшей мере, за последние 800 000 лет. Концентрации двуокиси углерода увеличились на 40 % с доиндустриального периода, в первую очередь за счет выбросов от сжигания ископаемого топлива, и, во-вторых, за счет нетто-выбросов в результате изменений в землепользовании. На поглощение океаном приходится около 30 % антропогенных выбросов двуокиси углерода, что приводит к подкислению океана. На арктическом шельфе расположены так называемые “метановые факелы”, проходящие сквозь всю толщу океанической воды, и вносящие свой огромный вклад в количество парниковых газов Земли.

Оценкой изменения климата занимается Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), состоящая из 209 авторов и более чем 600 соавторов, приглашенных для написания статей, вошедших в Пятый оценочный доклад. МГЭИК состоит из трех Рабочих групп. Первая занимается регистрацией, выявлением причин и анализом изменений климата, выявлением их причин. Вторая группа исследователей изучает влияние изменений климата на природу и жизнь людей, и возможность адаптации с целью минимизации неблагоприятных последствий. Третья группа исследует возможности снижения антропогенного воздействия на климатическую систему (прежде всего, снижения выбросов парниковых газов).

Пятый оценочный доклад был подготовлен в 2013 г. Он содержит глобальную оценку изменения климата, выводы из которой констатируют, что в настоящее время с 95%-й достоверностью антропогенное влияние является доминирующей причиной потепления, наблюдаемого с середины 20-го века. Пятый доклад МГЭИК базируется на Четвертом оценочном докладе, вышедшем в 2007 г., но включает в себя новые выводы из Специального доклада по управлению рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата, а также из данных исследований, опубликованных в обширной научно-технической литературе.

МГЭИК собирает и обрабатывает глобальные климатические модели как часть оценочного доклада. Совокупность моделей называется *ClimateModelIntercomparisonProject (CMIP)*. Так, в Четвертом оценочном докладе использовалась глобальная модель *CMIP3*, выпущенная в 2007 г., в Пятом оценочном докладе же используется модель *CMIP5*, вобравшая в себя большее количество моделей и метаданных, описывающих симуляцию моделей, а следовательно, более усовершенствованная.

Также, существенным отличием *CMIP5* от *CMIP3* является новый представленный набор сценариев (*RepresentativeConcentrationPathways (RCP)*). Эти сценарии охватывают широкий диапазон вероятных сценариев радиационного воздействия, как следствие – парникового эффекта. *RCP*-сценарии включают в себя очень низкий сценарий (*RCP2.6*), два сценария стабилизации (*RCP4.5* и *RCP6*), и очень высокий базовый сценарий выбросов в атмосферу (*RCP8.5*). Последний подразумевает отсутствие сокращения выбросов в атмосферу, и представляет собой неспособность предотвратить глобальное потепление к 2100 году. Сценарии определяются приблизительной суммарной величиной радиационного воздействия в 2100 г. по сравнению с 1750 г.: 2,6 Вт*м⁻² для *RCP2.6*; 4,5 Вт*м⁻² для *RCP4.5*; 6,0 Вт*м⁻² для *RCP6* и 8,5 Вт*м⁻² для *RCP8.5*. Согласно *RCP6* и *RCP8.5*, радиационное воздействие достигает максимального значения к 2100 г.; в *RCP2.6* оно достигает максимума и затем снижается; в *RCP4.5* оно стабилизируется к 2100 г.

Поясняющая информация представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные для набора сценариев *RCP*

Сцена рий	CO^2	Использование пахотных земель и пастбищ	Зависимость от ископаемого топлива	Выбросы метана	Населе ние
<i>RCP8</i> , 5	Увеличен ие в 3 раза	Увеличение использования	Сильная	Быстрое увеличение числа значений	Более 12 млрд.
<i>RCP6</i>	Увеличен ие на 25%	Увеличение использования	Сильная	На уровне нынешних значений	~10 млрд.
<i>RCP4</i> , 5	Слабое увеличени е	Снижение использования	Слабая	На уровне нынешних значений	~10 млрд.
<i>RCP2</i> , 6	Уменьшен ие ниже нынешних значений	Снижение использования	Нет	Понижение числа выбросов на 40%	Менее 9 млрд.

Так как сценарии *RCP2.6* и *RCP8.5* дают сильные отклонения от нынешних значений, в данном случае логично воспользоваться сценарием стабилизации (*RCP4.5*).

2 ВЫБОР МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

В каждом сценарии есть разработанные модели. Разработчики и модели показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Модели Пятого оценочного доклада

Название модели	Институт
ACCESS1.0, ACCESS1.3	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia</i>
BCC-CSM1.1, BCC- CSM1.1-M	<i>Beijing Climate Center, China Meteorological Administration</i>
BNU-ESM	<i>College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University</i>
CanESM2	<i>Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis</i>
CCSM4	<i>National Center for Atmospheric Research, USA</i>
CESM1(BGC), CESM1(CAM5), CESM1(WACM)	<i>Community Earth System Model Contributors, USA</i>
CMCC-CM	<i>Centro Euro-Mediterraneo per iCambiamentiClimatici, Italy</i>
CNRM-CM5	<i>Centre National de RecherchesMétéorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en CalculScientifique, France</i>
CSIRO-Mk3.6.0	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization / Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia</i>

Продолжение таблицы 2.1

Название модели	Институт
<i>FGOALS-g2</i>	<i>LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS, Tsinghai University</i>
<i>FIO-ESM</i>	<i>The First Institute of Oceanography, SOA, China</i>
<i>GISS-E2-R</i>	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies, USA</i>
<i>HadGEM2-AO</i>	<i>National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration</i>
<i>HadGEM2-CC, HadGEM2-ES</i>	<i>Met Office Hadley Centre, United Kingdom</i>
<i>INM-CM4</i>	<i>Institute for Numerical Mathematics, Russia</i>
<i>IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5B-LR</i>	<i>Institut Pierre-Simon Laplace, France</i>
<i>MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5</i>	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies</i>
<i>MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR</i>	<i>Max Planck Institute for Meteorology, Germany</i>
<i>MRI-CGCM3</i>	<i>Meteorological Research Institute, Japan</i>
<i>NorESM1-M, NorESM1-ME</i>	<i>Norwegian Climate Centre</i>

Всего в совокупность моделей *CMIP5* входят 39 глобальных моделей. В таких моделях решаются уравнения динамики атмосферы и океана с шагом по пространству порядка 1–2 градусов и с шагом по времени несколько минут. В данных моделях стараются наиболее полно и точно учесть все многообразие явлений и процессов, которые образуют вместе

климатическую систему. Это, например, накопление и таяние снега, таяние, намерзание и движения морского льда, эволюция мерзлоты в почве, речной сток, влияние растений на потоки тепла и импульса, и другие. Все больше моделей включают в себя расчет эволюции углерода растений, почвы и океана, которые в свою очередь позволяют оценить концентрацию углекислого газа в атмосфере. Многие модели учитывают также химические превращения малых газовых составляющих атмосферы, таких как водяной пар, метан, оксид углерода. Около половины моделей атмосферы имеют горизонтальное разрешение приблизительно 150 км (в *CMIP3* была лишь одна такая модель). Это дает более точную и полноценную оценку всех факторов.

Для сценария умеренного антропогенного воздействия *RCP4.5* разработано 32 модели, для сценария *RCP6* – 17. Участвующие в *CMIP5* модели различаются, прежде всего, шагом сетки. Так, в атмосфере типичный шаг сетки составляет 2–3 градуса, но в некоторых моделях (например, японская модель *MRI-AM*) он равен 20 км. Однако такие модели пока могут использоваться лишь для проведения отдельных коротких численных экспериментов. Расчеты на несколько сотен лет по ним практически невозможны. В океане также типичный шаг сетки составляет 1–2 градуса, но некоторые модели (к примеру, английская модель *HadGEM*) используют шаг сетки 0,3 градуса. Обмен информацией между моделями атмосферы и океана происходит каждые 3 часа модельного времени. Этот промежуток служит также и численным шагом модели океана. Пересчет полей с атмосферной на океаническую пространственные сетки происходит методом линейной интерполяции. В модели *INM-CM4* при стыковке атмосферной и океанической моделей не используется коррекция потоков тепла и импульса, коррекция потока пресной воды применяется лишь в Баренцевом, Карском, Норвежском и Гренландском морях. Такая коррекция не влияет непосредственно на такие характеристики гидрологического цикла, как речной сток, осадки и т.п.

Главной особенностью модели *MPI-ESM* является объединенный углеродный цикл, который позволяет изучать взаимосвязь и последствия изменения климата, отраженные в самом углеродном цикле. Другими словами, изменение климата влияет на углеродный цикл так же, как и углеродный цикл влияет на изменение климата.

Кроме того, модели могут включать (или не включать) в себя интерактивный расчет тропосферной и стратосферной химии, углеродного цикла, биохимии океана. Кроме этих простых формальных критериев, модели различаются также по качеству воспроизведения различных климатических характеристик. Это качество зависит, кроме перечисленного, от точности настройки модели, то есть степени взаимосогласованности описания всех процессов. Модель должна адекватно описывать многие явления современного климата, а также правильно воспроизводить изменения климата, наблюдавшиеся в 19, 20 и начале 21-го века. В таблице 2.2 представлены численные значения шагов атмосферной и океанической сеток различных моделей Пятого оценочного доклада.

Если в полях океанической сетки указаны координаты i и j , то их необходимо указывать вручную, что сказывается на точности модели.

Таблица 2.2 – Численные значения атмосферной и океанической сеток

Модель	Атмосферная сетка		Океаническая сетка	
	Широта,°	Долгота,°	Широта,°	Долгота,°
<i>ACCESS 1.0</i>	1,25	1,875	(i,j)	(i,j)
<i>ACCESS 1.3</i>	1,25	1,875	(i,j)	(i,j)
<i>BCC-CSM1.1</i>	2,7906	2,8125	0.3333	1
<i>BCC-CSM1.1(m)</i>	2,7906	2,8125	0.3333	1
<i>BNU-ESM</i>	2,7906	2,8125	0.3344	1
<i>CCSM4</i>	0.9424	1,25	(i,j)	(i,j)
<i>CESM1(BGC)</i>	0.9424	1,25	(i,j)	(i,j)

Продолжение таблицы 2.2

Модель	Атмосферная сетка		Океаническая сетка	
	Широта,°	Долгота,°	Широта,°	Долгота,°
<i>CESM1(CAM5)</i>	0.9424	1,25	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>CESM1(WACCM)</i>	1,8848	2,5	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>CFSv2-2011</i>	1	1	0.5	0.5
<i>CMCC-CESM</i>	3,4431	3,75	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>CMCC-CM</i>	0.7484	0.75	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>CMCC-CMS</i>	3,7111	3,75	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>CNRM-CM5</i>	1,4008	1,4063	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>CNRM-CM5-2</i>	1,4008	1,4063	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>CSIRO-Mk3.6.0</i>	1,8653	1.875	0.9327	1.875
<i>CanCM4</i>	2,7906	2,8125	0.9303	1,4063
<i>CanESM2</i>	2,7906	2,8125	0.9303	1,4063
<i>EC-EARTH</i>	1.1215	1.125	<i>(i,j)</i>	<i>(i,j)</i>
<i>FGOALS-g2</i>	2,7906	2,8125	0.5	1
<i>FGOALS-gl</i>	4.1026	5	1	1
<i>GFDL-CM2.1</i>	2.0225	2,5	0.3344	1
<i>GFDL-CM3</i>	2	2,5	0.3344	1
<i>GFDL-ESM2G</i>	2.0225	2	0.375	1
<i>GFDL-ESM2M</i>	2.0225	2,5	0.3344	1
<i>GISS-E2-H</i>	2	2,5	1	1
<i>GISS-E2-H-CC</i>	2	2,5	1	1
<i>GISS-E2-R-CC</i>	2	2,5	1	2,5
<i>HadCM3</i>	2,5	3,75	2,5	2,5
<i>HadGEM2-AO</i>	1,25	1.875	0.3396	1
<i>HadGEM2-CC</i>	1,25	1.875	0.3396	1

Продолжение таблицы 2.2

Модель	Атмосферная сетка		Океаническая сетка	
	Широта,°	Долгота,°	Широта,°	Долгота,°
<i>HadGEM2-ES</i>	1,25	1.875	0.3396	1
<i>INM-CM4</i>	1,5	2	0.5	1
<i>IPSL-CM5A-LR</i>	1,8947	3,75	(i,j)	(i,j)
<i>IPSL-CM5A-MR</i>	1,2676	2,5	(i,j)	(i,j)
<i>IPSL-CM5B-LR</i>	1,8947	3,75	(i,j)	(i,j)
<i>MIROC-ESM</i>	2,7906	2,8125	0.5582	1,4063
<i>MIROC4h</i>	0.5616	0.5625	0.1875	0.2813
<i>MIROC5</i>	1,4008	1,4063	0.5	1,4063
<i>MPI-ESM-LR</i>	1,8653	1.875	(i,j)	(i,j)
<i>MPI-ESM-P</i>	1,8653	1.875	(i,j)	(i,j)
<i>MRI-CGCM3</i>	1.1215	1.125	0.5	1
<i>MRI-ESM1</i>	1.1215	1.125	0.5	1
<i>NorESM1-M</i>	1,8947	2,5	(i,j)	(i,j)

На рисунке 2.1 приведена оценка качества моделей при воспроизведении современного климата. Мерой ошибки является среднеквадратическое отклонение (СКО), которое, рассматривая каждую переменную по отдельности, изображается в виде относительной погрешности путем нормализации результата медианных погрешностей всех результатов модели. Например, значение 0,2 указывает на то, что СКО модели на 20% больше, чем средняя ошибка *CMIP5* для этой переменной, в то время как значение -0,2 означает ошибку на 20% меньше, чем средняя ошибка.

По левой оси изображены такие предикторы, как прямая длинноволновая (*LWCRE*) и коротковолновая (*SWCRE*) радиация, суммарная

длинноволновая (*RLUT*) и коротковолновая (*RSUT*) радиация, осадки (*PR*), температура воздуха на высоте 2м над уровнем моря (*TAS*), высота над уровнем моря (*ZG*), северный ветер (*VA*), восточный ветер (*UA*), температура атмосферы (*TA*).

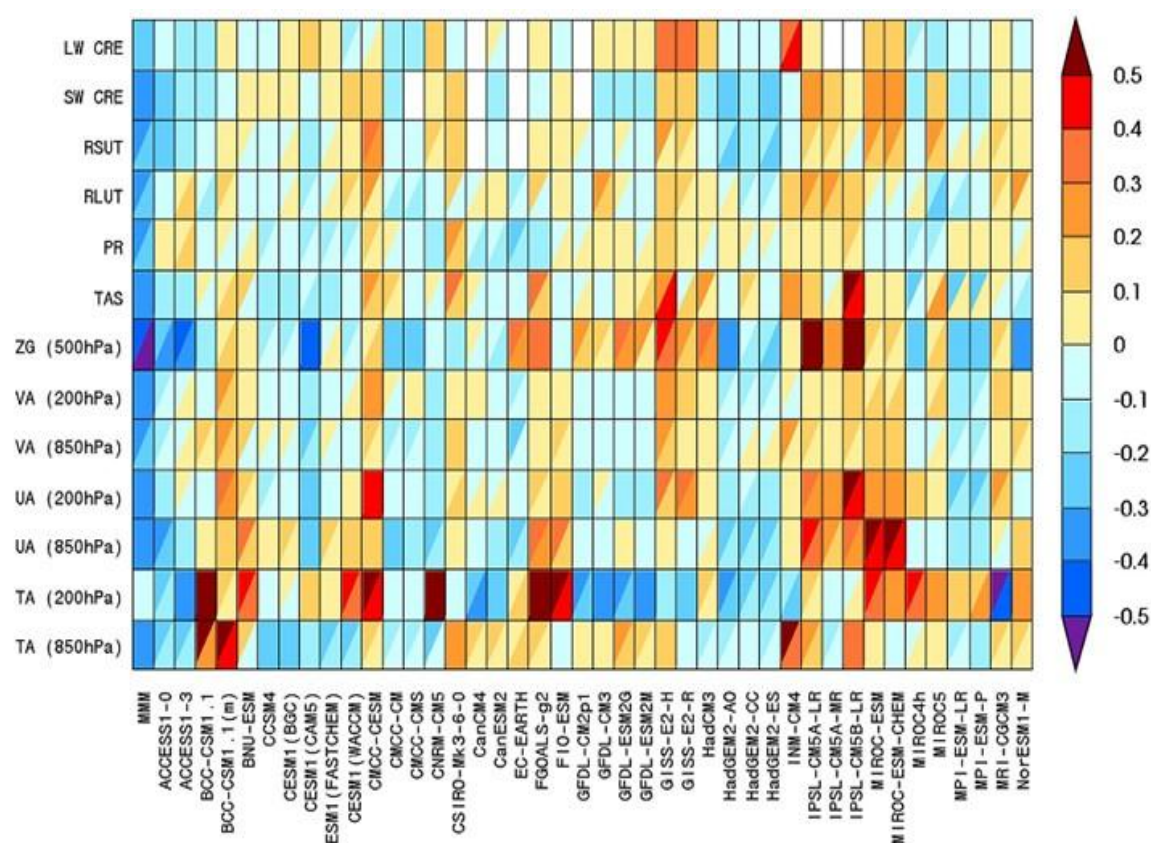


Рисунок 2.1 – Диаграмма оценки качества моделей.

На рисунках 2.2, 2.3, и 2.4 показано изменение температуры приповерхностного воздуха к 2074 году по сравнению с 2004 годом при условии развития сценария *RCP4.5* по данным трех моделей: модели Центра климатических прогнозов и исследований Хэдли *HadGEM2-ES*, ансамбля моделей 5-го оценочного доклада модели института Макса Планка *MPI-ESM-LR*.

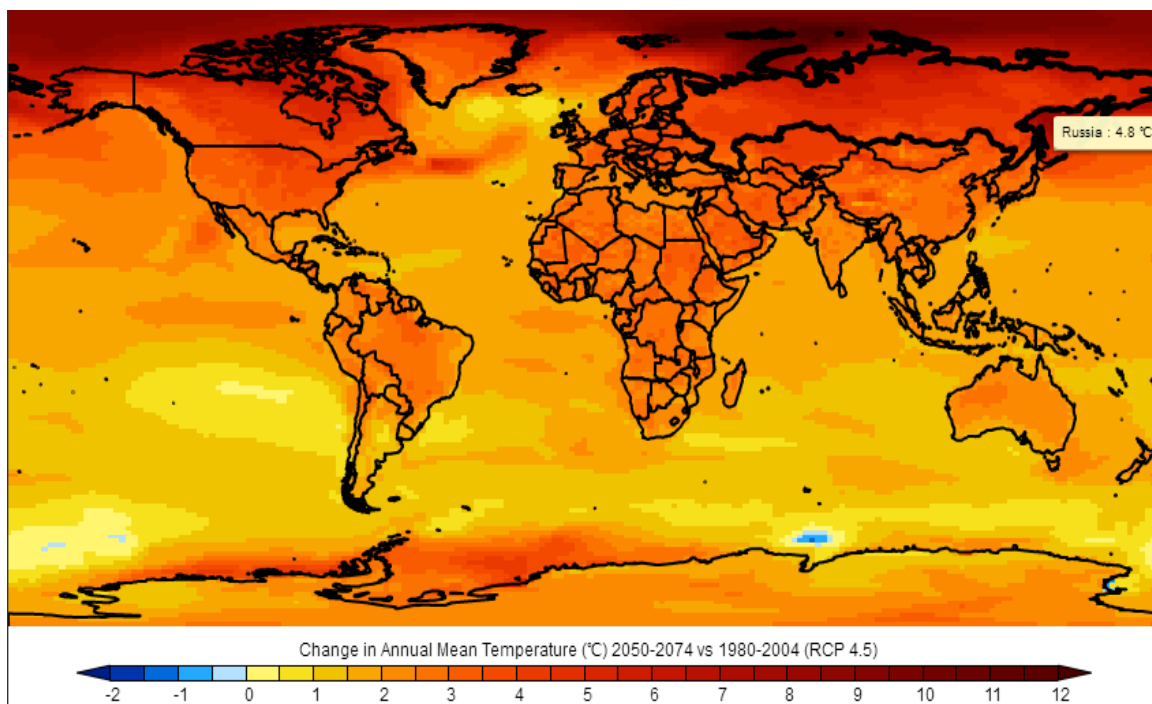


Рисунок 2.2 – Изменение температуры по данным модели *HadGEM2*.

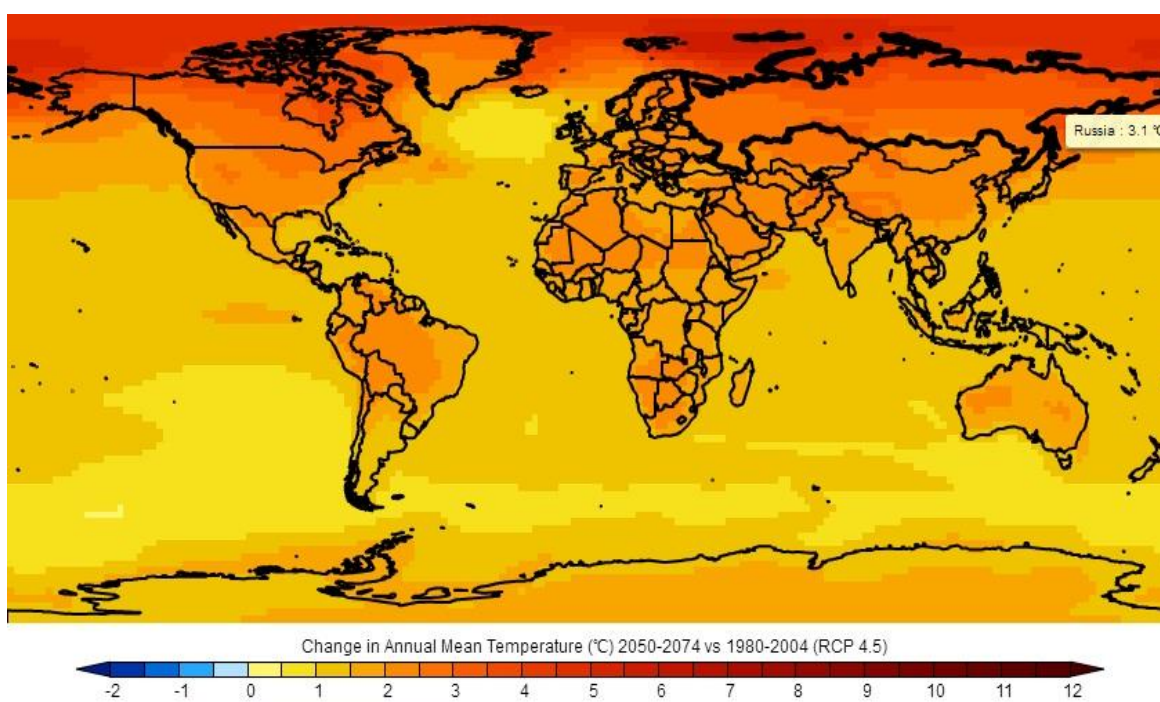


Рисунок 2.3 – Изменение температуры по данным ансамбля моделей 5-го доклада.

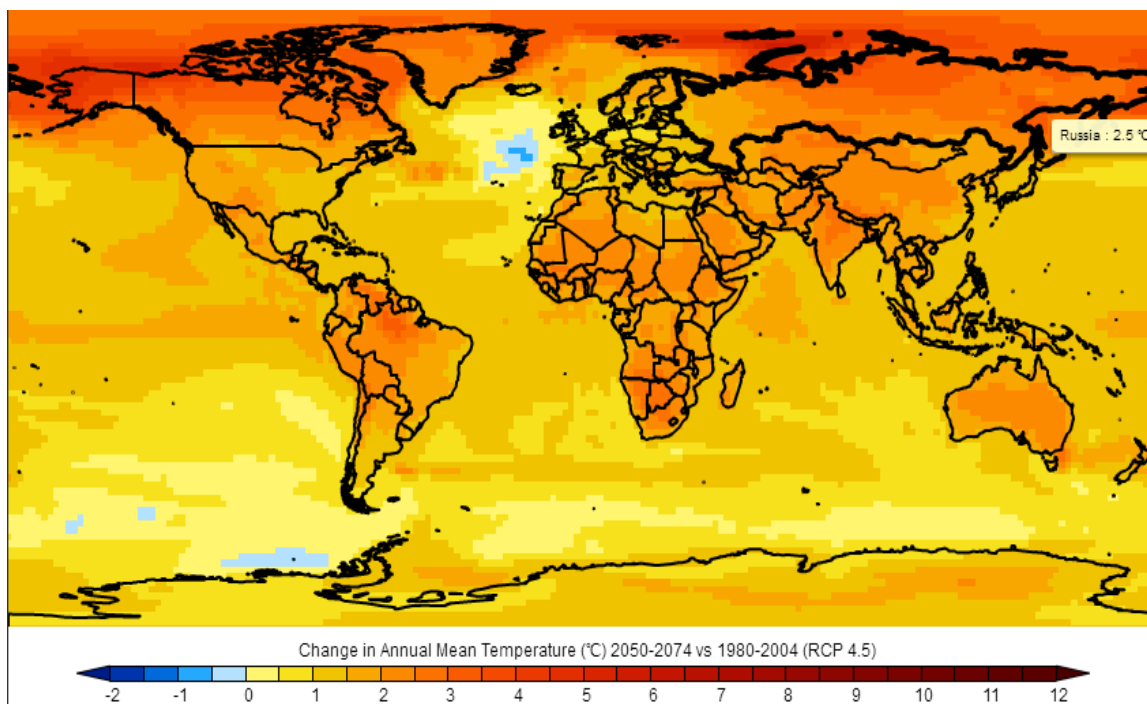


Рисунок 2.4 – Изменение температуры по данным модели *MPI-ESM-LR*.

Таким образом, в данной работе были выбраны модели, освещающие весь диапазон возможного повышения температуры приповерхностного воздуха (ΔT) при условиях сценария *RCP4.5*: ансамбль моделей 5-го оценочного доклада *ensemble* ($\Delta T=3,1^{\circ}\text{C}$), модель Центра климатических прогнозов и исследований Хэдли (Великобритания) *HadGEM2* ($\Delta T=4,8^{\circ}\text{C}$) и модель Института Макса Планка *MPI-ESM-LR* ($\Delta T=2,5^{\circ}\text{C}$).

3 РЕТРОСПЕКТИВНЫЕ ПРОГНОЗЫ МЕТЕОЭЛЕМЕНТОВ

Для выполнения сверхдолгосрочных прогнозов необходимо оценить выбранные модели на примере участка Северо-Западного региона. Для этого были выбраны 7 постов на реках Ленинградской, Псковской и Новгородской областей (р. Саба – д. Райково; р. Сороть – д. Большая Губа; р. Исса – д. Визги; р. Полисть – д. Подтополье; р. Тосна – г. Тосно; р. Воложба – д. Воложба; р. Уверь – д. Меглецы); нанесены на карту контуры водосборов и их центры. Затем были составлены сравнительные таблицы по температуре и осадкам за период с 1951 по 1988 год, по фактическим данным и данным моделей (*HadGEM2-ES* и *MPI-ESM-LR*).

На рисунке 3.1 представлена карта Северо-Западного региона с нанесенными на нее контурами и центрами водосборов.

На рисунке 3.1 видно, что выбранные речные бассейны располагаются довольно равномерно, 3 бассейна – в Псковской области и по 2 бассейна – в Ленинградской и Новгородской областях. 3 из 7 бассейнов имеют вытянутую форму, остальные – форму, близкую к окружности. Центры водосборов находились средневзвешенным способом.

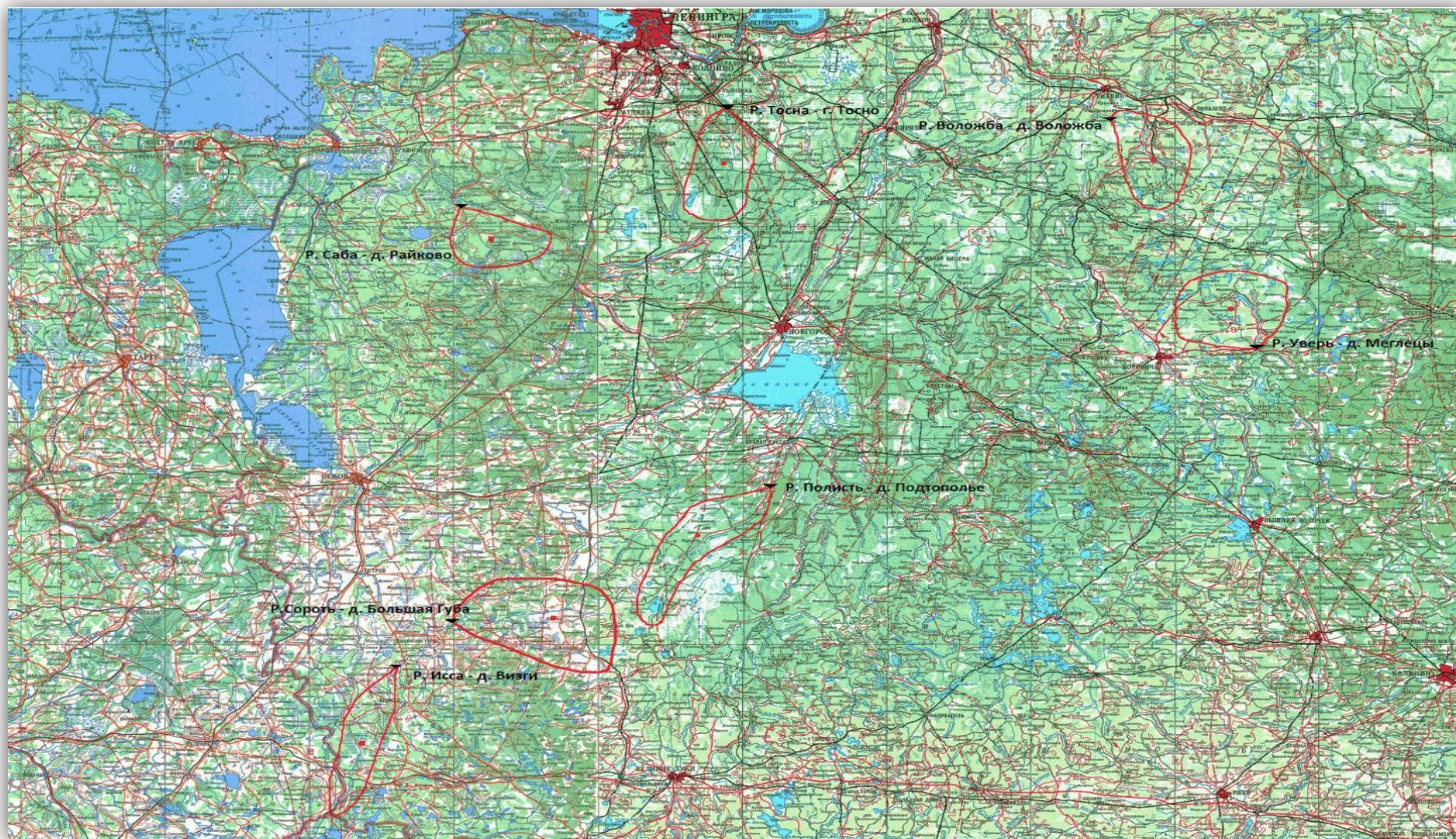


Рисунок 3.1 – Карта Северо-Западного региона с нанесенными на нее контурами и центрами водосборов.

В таблицах 3.1–3.7 представлены значения среднегодовых температур приземного воздуха и суммы годовых осадков, взятые из данных моделей, освещающих ретроспективный период, и фактических данных.

Таблица 3.1 – Сравнительная таблица метеоэлементов, р. Саба – д. Райково

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1951	4,4	3,0	3,9	588	484	596
1952	3,7	6,4	4,7	764	642	670
1953	4,2	5,8	4,5	708	645	584
1954	4,0	2,4	6,8	620	527	530
1955	3,1	2,4	3,1	614	537	496
1956	2,3	5,2	4,9	668	512	530
1957	4,4	4,8	3,9	826	621	492
1958	2,9	3,3	5,2	596	640	603
1959	4,2	5,0	4,0	589	501	621
1960	3,1	5,0	3,5	622	555	519
1961	4,8	4,4	2,6	730	557	616
1962	3,1	4,4	4,6	797	548	495
1963	2,6	5,8	3,2	472	417	489
1964	3,5	4,1	4,9	478	646	775
1965	2,7	4,0	6,1	587	698	538
1966	2,8	4,6	4,6	827	509	542
1967	4,5	6,3	5,1	649	600	788
1968	3,2	3,2	2,9	637	460	579
1969	2,7	4,2	2,2	550	648	740

Продолжение таблицы 3.1

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1970	3,4	6,5	3,4	691	464	580
1971	4,1	4,4	5,4	550	464	498
1972	4,9	2,8	5,9	500	560	678
1973	4,3	3,0	5,0	646	582	756
1974	5,0	2,2	7,0	702	544	633
1975	5,9	4,2	3,3	570	552	584
1976	2,4	4,3	4,7	562	669	625
1977	3,7	2,4	4,3	654	617	497
1978	2,5	4,6	6,2	787	600	495
1979	3,7	5,2	5,6	666	595	568
1980	3,4	3,8	5,3	702	588	562
1981	4,2	4,0	6,7	762	563	518
1982	4,5	6,3	6,3	741	633	604
1983	5,4	3,5	6,7	736	579	608
1984	4,6	4,3	5,1	589	568	540
1985	2,6	5,9	5,9	620	573	629
1986	4,0	5,6	5,2	695	585	546
1987	2,3	3,2	6,0	760	625	572
1988	4,7	5,2	6,6	740	541	698
Коэффициент корреляции		-0,22	0,27	-	0,25	-0,37

Таблица 3.2 – Сравнительная таблица метеоэлементов, р. Сорочь – д. Большая Губа

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1951	5,0	3,4	3,9	479	378	620
1952	4,3	6,8	4,9	645	648	732
1953	4,4	6,1	4,7	621	609	685
1954	4,4	2,6	6,8	579	560	628
1955	4,1	2,8	3,5	570	557	571
1956	2,9	5,6	5,1	634	516	605
1957	5,0	5,1	4,0	736	619	559
1958	3,8	3,6	5,4	630	623	678
1959	4,6	5,2	4,2	501	481	677
1960	3,8	5,1	3,6	711	509	619
1961	5,2	4,6	2,7	605	547	676
1962	3,8	4,8	4,7	712	519	574
1963	3,1	6,2	3,4	459	412	537
1964	4,1	4,5	5,1	461	635	874
1965	3,1	4,4	6,1	525	691	579
1966	3,9	4,9	4,8	702	474	616
1967	5,1	6,5	5,2	660	562	883
1968	3,7	3,4	3,2	615	471	653
1969	3,1	4,3	2,7	537	673	824
1970	4,0	6,8	3,5	629	422	654
1971	4,8	4,7	5,4	519	472	573
1972	5,3	3,1	6,3	538	563	741

Продолжение таблицы 3.2

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1973	5,0	3,3	5,0	565	551	872
1974	5,3	2,5	6,9	582	518	691
1975	6,6	4,6	3,3	520	545	662
1976	3,1	4,7	4,8	547	715	694
1977	4,3	2,8	4,4	667	638	581
1978	3,3	4,9	6,2	744	590	535
1979	4,3	5,6	5,8	608	520	546
1980	3,7	4,2	5,6	602	567	632
1981	4,9	4,2	6,8	693	450	593
1982	5,1	6,6	6,5	586	638	658
1983	6,1	3,6	6,7	664	532	659
1984	5,0	4,6	5,1	616	542	638
1985	3,3	6,5	5,9	744	562	710
1986	4,8	5,9	5,4	566	582	518
1987	3,0	3,6	6,1	749	628	632
1988	5,3	5,7	6,8	663	506	698
Коэффициент корреляции		-0,23	0,24	-	0,17	-0,29

Таблица 3.3 – Сравнительная таблица метеоэлементов, р. Исса – д. Визги

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1951	5,3	4,0	4,1	544	384	616
1952	4,4	7,2	5,1	717	640	763
1953	4,7	6,3	5,0	580	588	730
1954	4,5	3,1	7,0	592	580	685
1955	4,4	3,3	3,8	602	563	609
1956	3,1	5,9	5,4	670	521	646
1957	5,2	5,4	4,2	758	632	615
1958	4,2	4,0	5,6	654	612	733
1959	4,8	5,5	4,4	496	463	693
1960	4,1	5,3	3,8	686	496	662
1961	5,3	4,9	2,9	555	540	701
1962	4,0	5,3	4,9	780	508	632
1963	3,4	6,6	3,7	506	328	557
1964	4,3	4,9	5,3	460	635	914
1965	3,3	4,8	6,2	548	665	608
1966	4,1	5,2	5,2	677	478	669
1967	5,3	6,8	5,4	643	537	923
1968	4,0	3,9	3,6	645	481	694
1969	3,3	4,6	3,2	547	654	868
1970	4,1	7,2	3,8	644	409	699
1971	5,1	5,1	5,6	501	468	617
1972	5,4	3,5	6,7	534	542	759
1973	5,2	3,7	5,2	579	536	908

Продолжение таблицы 3.3

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1974	5,5	2,9	7,0	566	484	709
1975	6,9	5,1	3,4	519	559	702
1976	3,5	5,1	5,0	508	685	716
1977	4,6	3,3	4,6	660	654	644
1978	3,6	5,4	6,3	728	592	568
1979	4,4	6,1	6,1	644	500	561
1980	3,9	4,6	5,9	670	590	684
1981	5,1	4,6	7,0	676	458	634
1982	5,4	6,9	6,8	595	654	687
1983	6,3	3,9	6,8	565	520	722
1984	5,2	5,0	5,2	573	546	707
1985	3,5	7,0	6,1	659	578	751
1986	5,0	6,2	5,7	563	585	566
1987	3,2	4,0	6,3	633	609	656
1988	5,4	6,2	7,1	649	511	797
Коэффициент корреляции		-0,24	0,21	-	0,17	-0,33

Таблица 3.4 – Сравнительная таблица метеоэлементов, р. Полисть – д.
Подтополье

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1951	4,7	3,1	3,8	485	396	662
1952	4,1	6,5	4,7	665	695	723
1953	4,1	5,8	4,5	739	638	657
1954	4,2	2,3	6,7	594	578	571
1955	3,7	2,4	3,1	593	549	552
1956	2,6	5,3	4,9	621	506	574
1957	4,8	4,9	3,9	814	643	540
1958	3,5	3,3	5,2	657	645	643
1959	4,3	4,9	4,0	526	516	687
1960	3,5	4,9	3,5	666	511	595
1961	5,0	4,4	2,4	636	563	692
1962	3,6	4,5	4,5	738	521	560
1963	2,8	6,0	3,2	470	370	531
1964	3,8	4,1	4,9	499	641	863
1965	2,9	4,2	5,9	543	689	573
1966	3,7	4,5	4,6	694	513	581
1967	4,9	6,3	5,0	655	585	877
1968	3,4	3,1	2,9	615	492	644
1969	2,9	4,1	2,3	538	690	825
1970	3,8	6,5	3,3	606	438	621
1971	4,5	4,5	5,2	507	469	538
1972	5,2	2,7	6,0	471	586	747

Продолжение таблицы 3.4

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1973	4,7	3,0	4,8	584	568	873
1974	5,2	2,3	6,8	607	536	705
1975	6,3	4,3	3,2	492	539	655
1976	2,7	4,5	4,5	583	718	703
1977	4,1	2,6	4,1	632	635	562
1978	3,1	4,7	6,0	693	487	539
1979	4,1	5,3	5,6	590	632	564
1980	3,5	4,0	5,4	647	555	622
1981	4,8	4,1	6,6	760	445	584
1982	4,8	6,4	6,3	625	639	667
1983	5,8	3,4	6,6	752	532	649
1984	4,8	4,4	5,0	633	578	589
1985	3,1	6,1	5,7	758	583	679
1986	4,5	5,7	5,1	652	583	485
1987	2,7	3,3	5,9	697	617	656
1988	5,0	5,3	6,5	590	573	763
Коэффициент корреляции		-0,23	0,27	-	0,25	-0,36

Таблица 3.5 – Сравнительная таблица метеоэлементов, р. Тосна – г. Тосно

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1951	4,0	2,5	3,5	557	406	619
1952	3,4	5,8	3,9	718	651	693
1953	3,8	5,2	3,8	694	696	557
1954	3,7	2,0	6,2	623	513	511
1955	2,7	1,8	2,2	542	526	495
1956	1,9	4,4	4,2	589	531	488
1957	4,1	4,3	3,4	758	652	496
1958	2,4	2,8	4,4	634	620	579
1959	3,7	4,7	3,3	583	530	621
1960	2,7	4,7	3,0	589	613	503
1961	4,4	3,9	2,1	611	575	582
1962	2,8	3,7	4,2	713	578	454
1963	2,1	5,3	2,7	496	407	488
1964	3,1	3,6	4,3	498	639	727
1965	2,3	3,4	5,6	531	682	597
1966	2,4	4,0	4,0	740	557	524
1967	4,1	5,7	4,3	604	600	765
1968	2,8	3,0	2,1	631	467	554
1969	2,2	3,8	1,3	602	589	694
1970	3,0	5,9	2,9	670	500	517
1971	3,5	3,9	4,9	528	455	502
1972	4,7	2,3	5,0	450	512	667

Продолжение таблицы 3.5

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1973	3,9	2,6	4,4	601	608	668
1974	4,7	1,6	6,6	648	533	641
1975	5,5	3,6	2,9	565	606	562
1976	1,8	3,7	4,2	582	593	606
1977	3,4	1,7	3,8	642	594	474
1978	2,1	3,7	5,8	626	525	495
1979	3,5	4,4	4,9	596	539	544
1980	3,1	3,3	4,6	642	572	482
1981	3,9	3,4	6,1	692	492	521
1982	4,1	5,9	5,5	623	589	589
1983	5,0	3,3	6,2	641	599	675
1984	4,2	3,7	4,7	572	598	513
1985	2,2	5,1	5,5	580	572	601
1986	3,6	4,9	4,7	609	594	445
1987	2,0	2,6	5,5	630	615	570
1988	4,3	4,4	5,8	615	569	702
Коэффициент корреляции		-0,2	0,28	-	0,41	-0,29

Таблица 3.6 – Сравнительная таблица метеозлементов, р. Воложба – д. Воложба

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1951	3,4	1,9	3,0	561	435	773
1952	3,1	5,4	3,2	830	680	699
1953	3,1	4,6	3,1	829	719	655
1954	3,3	1,4	5,6	779	555	570
1955	2,2	1,4	1,6	762	543	570
1956	1,4	3,7	3,4	723	575	564
1957	3,7	3,9	2,8	923	707	606
1958	2,0	2,4	3,7	769	667	637
1959	3,0	4,0	2,8	671	585	707
1960	2,3	4,2	2,3	634	648	612
1961	3,7	3,4	1,3	803	591	655
1962	2,5	3,3	3,5	798	553	550
1963	1,6	4,9	1,8	620	463	501
1964	2,6	3,2	3,5	644	618	788
1965	1,8	2,9	4,9	641	744	679
1966	2,1	3,2	3,2	855	595	561
1967	3,8	5,2	3,9	771	631	853
1968	2,4	2,6	1,3	718	552	612
1969	1,6	3,2	0,6	729	731	762
1970	2,7	5,4	2,0	633	522	610
1971	2,8	3,5	4,2	682	512	580
1972	4,2	1,7	4,3	512	566	730

Продолжение таблицы 3.6

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1973	3,4	2,2	3,5	724	651	807
1974	4,3	1,4	6,2	671	588	690
1975	4,8	2,9	2,4	670	646	606
1976	1,2	3,4	3,3	630	641	698
1977	3,0	1,3	3,1	759	617	554
1978	1,7	3,2	5,1	738	565	585
1979	3,0	3,8	4,1	632	566	666
1980	2,6	3,0	4,1	696	588	626
1981	3,8	3,0	5,1	847	619	605
1982	3,5	5,7	4,7	770	571	682
1983	4,5	2,6	5,9	986	591	770
1984	3,7	3,4	4,1	723	632	585
1985	1,8	4,4	4,7	714	633	672
1986	3,1	4,3	3,9	668	607	496
1987	1,5	2,2	4,8	695	660	688
1988	3,8	3,9	5,2	733	614	723
Коэффициент корреляции		-0,21	0,37	-	0,44	-0,16

Таблица 3.7 – Сравнительная таблица метеоэлементов, р. Уверь – д. Меглецы

год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1951	3,4	1,8	3,1	519	432	785
1952	3,2	5,5	3,6	766	662	685
1953	3,0	4,6	3,2	820	661	701
1954	3,3	1,3	5,8	661	577	549
1955	2,3	1,3	1,7	729	605	561
1956	1,4	3,8	3,4	708	575	563
1957	3,8	4,1	2,7	841	644	587
1958	2,1	2,4	3,7	737	662	663
1959	2,9	4,0	2,9	627	524	734
1960	2,4	4,2	2,3	613	564	614
1961	3,7	3,5	1,5	751	540	743
1962	2,5	3,5	3,5	737	544	627
1963	1,6	4,9	2,0	536	414	530
1964	2,7	3,2	3,8	609	666	845
1965	1,7	3,1	4,9	608	684	653
1966	2,4	3,1	3,2	797	551	516
1967	3,8	5,3	4,1	722	610	839
1968	2,4	2,5	1,7	665	519	681
1969	1,6	3,0	1,0	675	667	845
1970	2,9	5,4	2,0	556	489	592
1971	2,8	3,5	4,1	654	499	605
1972	4,1	1,5	4,7	463	593	791

Продолжение таблицы 3.7

Год	Температура, °C			Осадки, мм		
	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>	факт.	<i>HADGem2</i>	<i>MPI</i>
1973	3,5	2,1	3,6	710	641	885
1974	4,2	1,6	6,1	651	598	690
1975	4,8	2,8	2,3	623	610	670
1976	1,3	3,7	3,3	645	652	719
1977	3,0	1,4	2,8	746	594	582
1978	1,8	3,3	5,0	725	550	572
1979	3,0	3,7	4,1	606	535	709
1980	2,5	3,2	4,3	704	553	672
1981	4,0	3,1	5,0	785	530	601
1982	3,5	5,6	4,8	659	561	710
1983	4,5	2,4	5,9	857	598	768
1984	3,7	3,5	4,1	632	615	576
1985	2,0	4,5	4,6	683	649	690
1986	3,1	4,4	3,8	654	612	477
1987	1,5	2,3	4,7	629	669	684
1988	3,9	4,1	5,2	627	625	722
Коэффициент корреляции		-0,22	0,38	-	0,42	-0,2

Исходя из данных, полученных в таблицах 3.1–3.7, можно сделать вывод, что модель *MPI-ESM-LR* дает более схожие данные с фактическими данными по температуре (коэффициент корреляции равен 0,38), в сравнении с моделью *HADGem2-ES* (коэффициент корреляции равен -0,2). Однако модель

HADGem2-ES дает более схожие данные с фактическими данными по осадкам, коэффициент корреляции равен 0,44.

На рисунках 3.2–3.15 представлена информация таблиц в графическом виде.

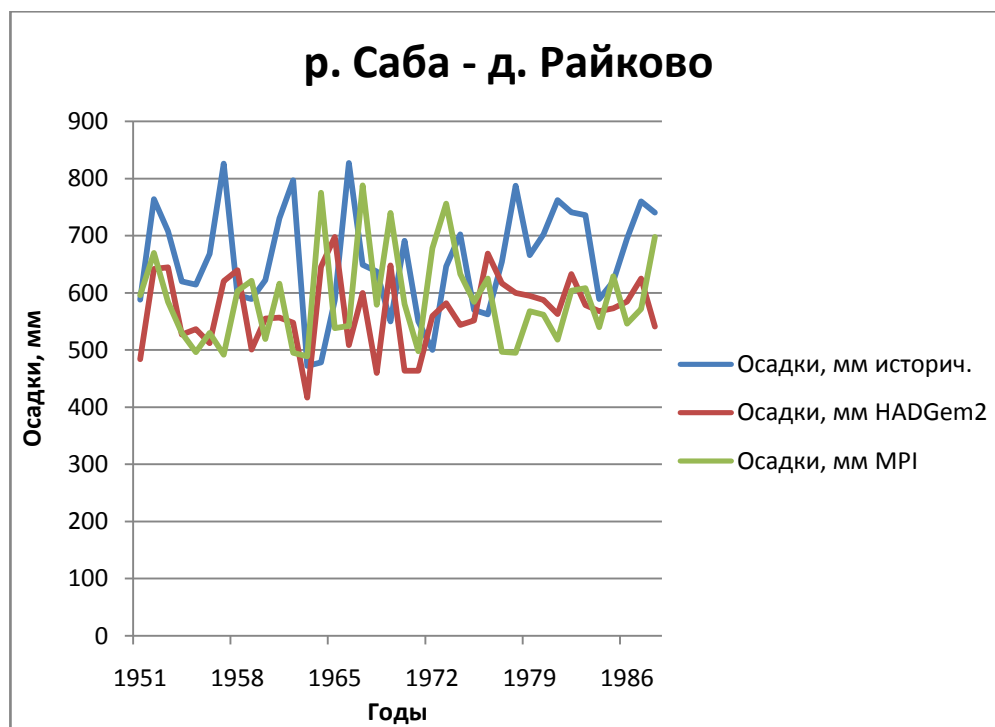


Рисунок 3.2 – Сравнительный график осадков, р. Саба – д. Райково.

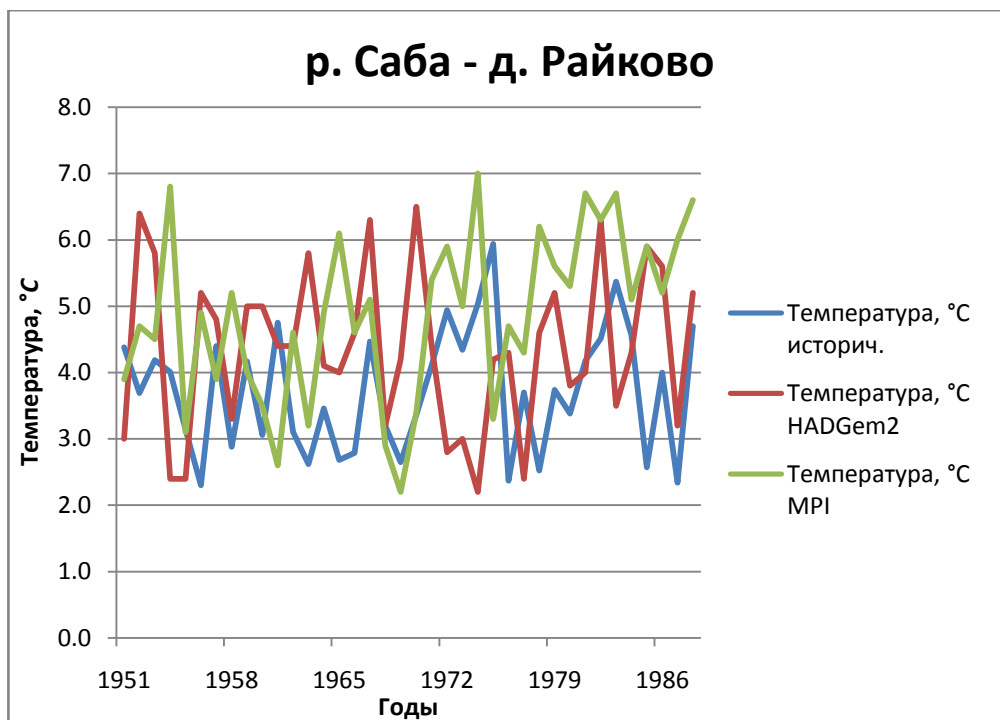


Рисунок 3.3 – Сравнительный график температуры, р. Саба – д. Райково.

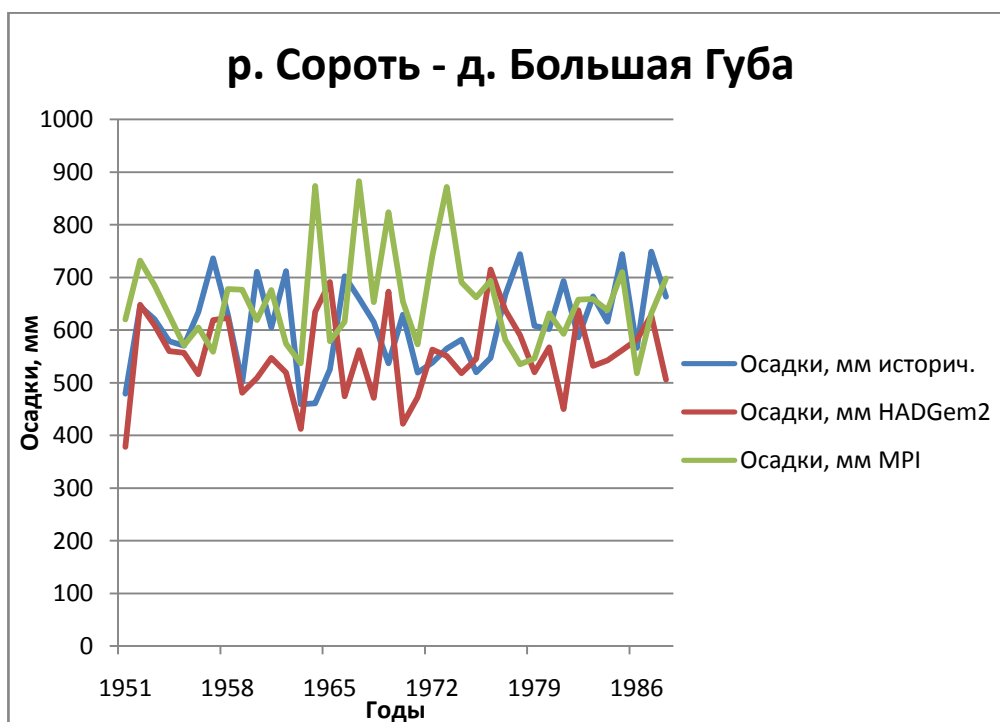


Рисунок 3.4 – Сравнительный график осадков, р. Сорочь – д. Большая Губа.



Рисунок 3.5 – Сравнительный график температуры, р. Сороть – д. Большая Губа.

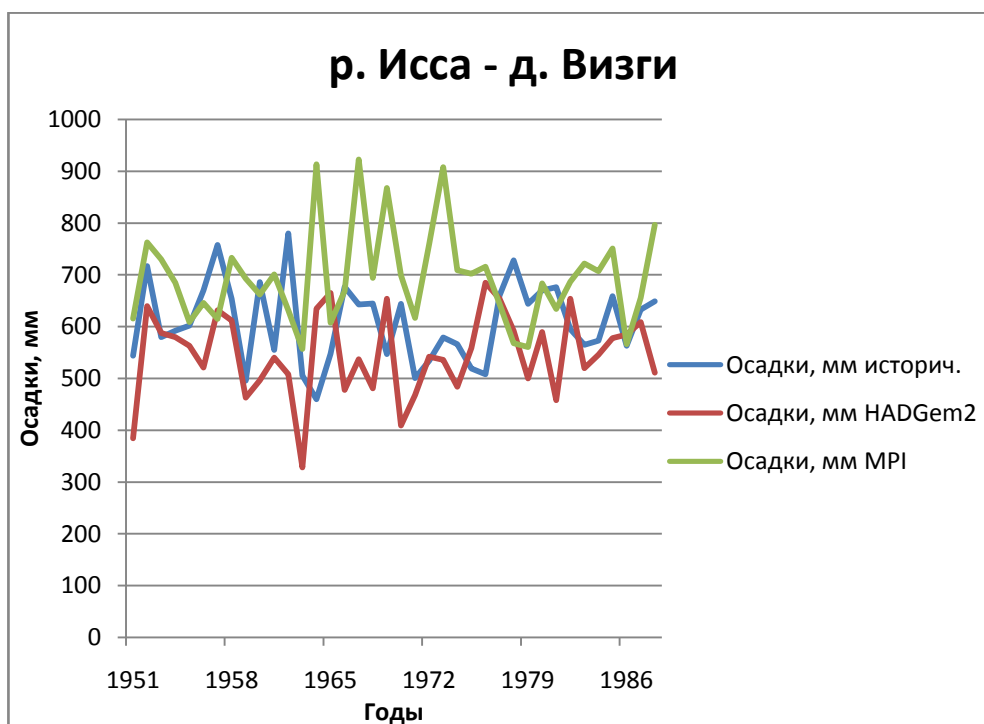


Рисунок 3.6 – Сравнительный график осадков, р. Исса – д. Визги.

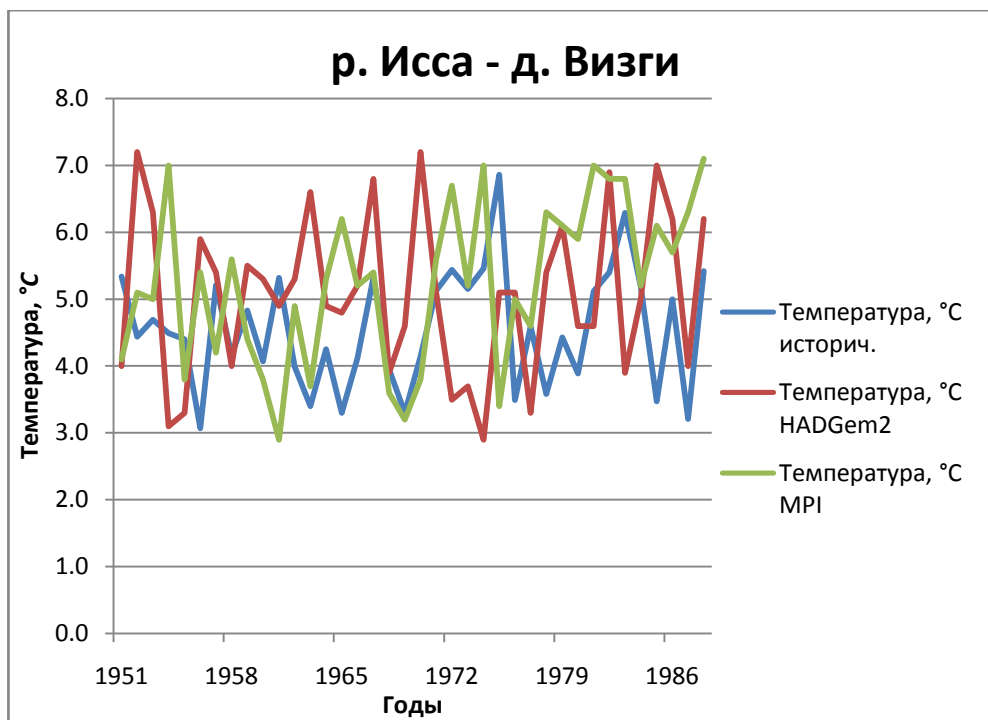


Рисунок 3.7 – Сравнительный график температуры, р. Исса – д. Визги.

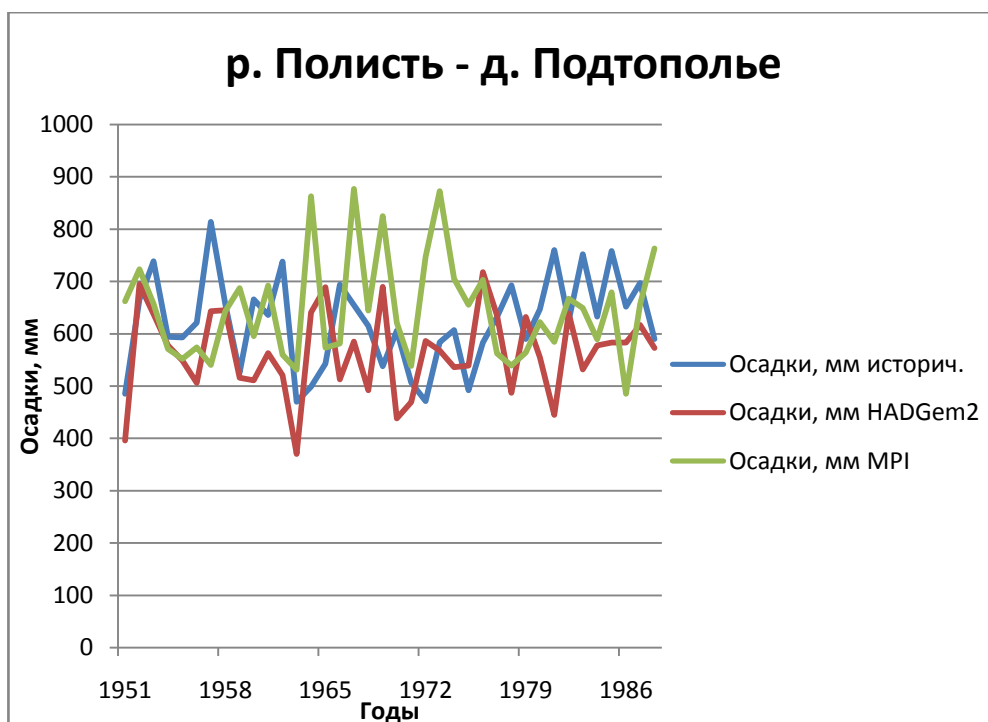


Рисунок 3.8 – Сравнительный график осадков, р. Полисть – д. Подтополье.



Рисунок 3.9 – Сравнительный график температуры, р. Полисть – д. Подтополье.

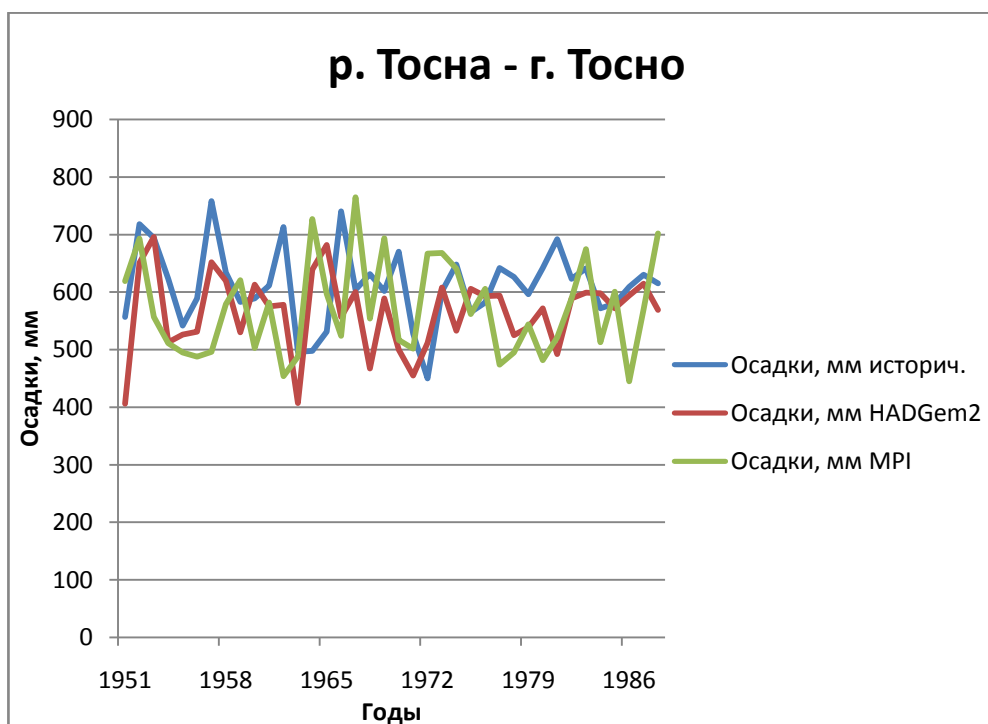


Рисунок 3.10 – Сравнительный график осадков, р. Тосна – г. Тосно.

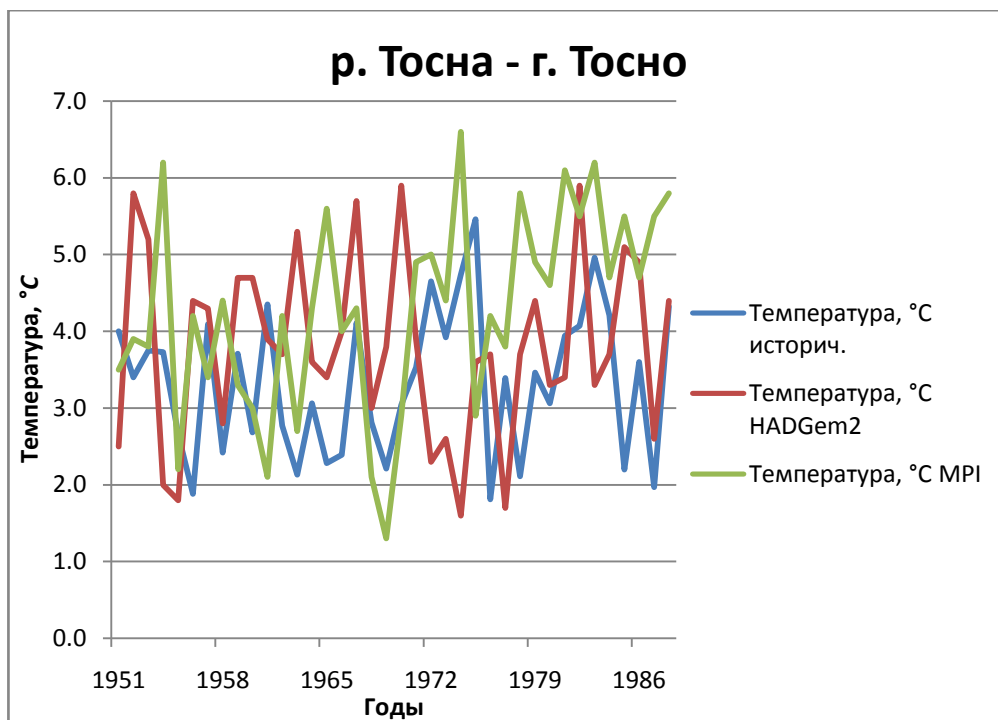


Рисунок 3.11 – Сравнительный график температуры, р. Тосна – г. Тосно.

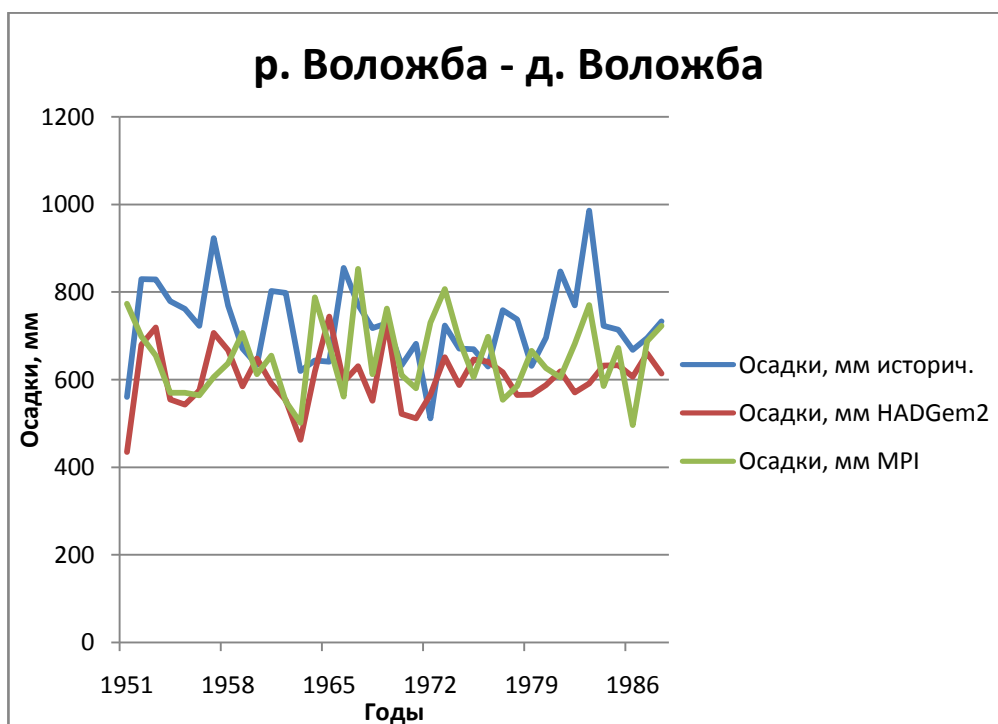


Рисунок 3.12 – Сравнительный график осадков, р. Воложба, д. Воложба.

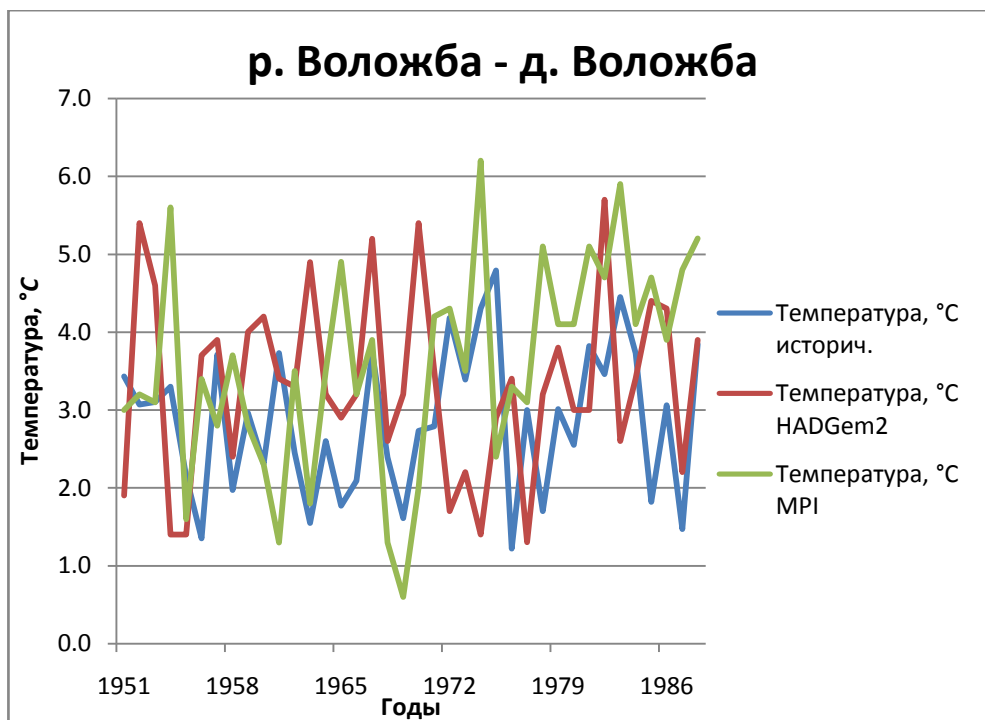


Рисунок 3.13 – Сравнительный график температуры, р. Воложба – д. Воложба.

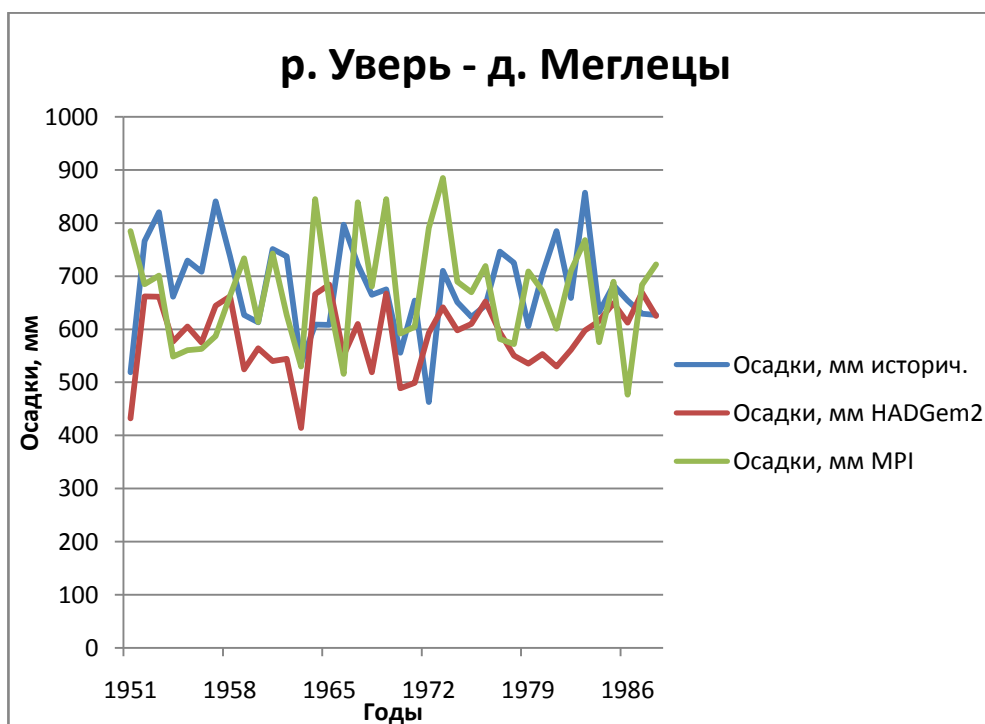


Рисунок 3.14 – Сравнительный график осадков, р. Уверь – д. Меглецы.

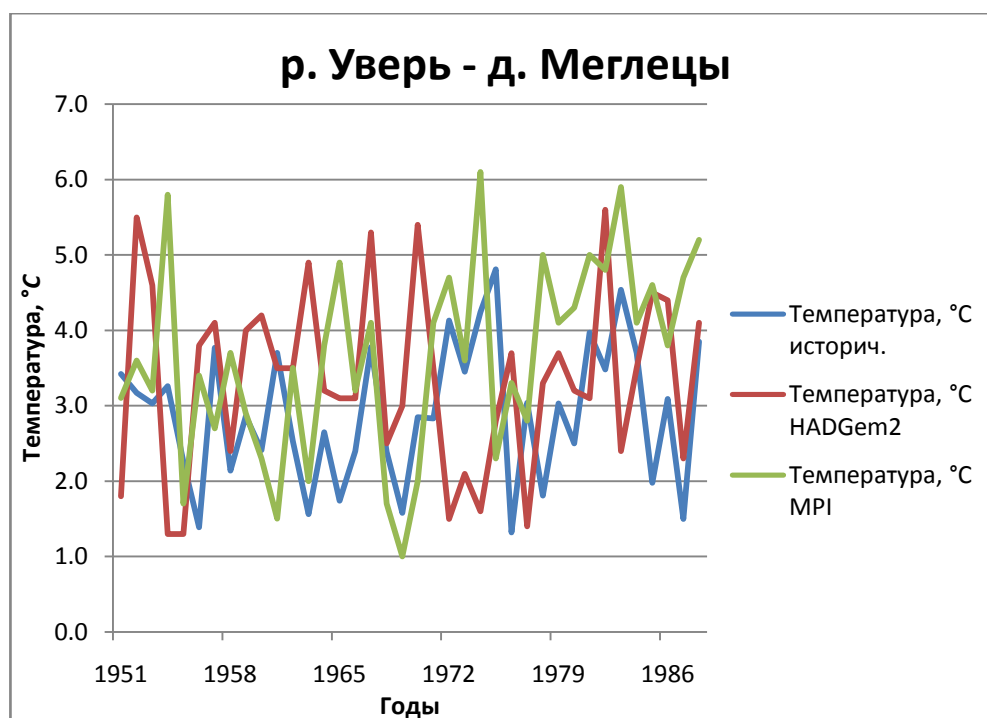


Рисунок 3.15 – Сравнительный график температуры, р. Уверь – д. Меглецы.

На рисунках 3.2–3.15 видно, что за некоторые годы происходит асинхронный ход температур и осадков, что подтверждается довольно низкими коэффициентами корреляции. Размах и модельных, и фактических данных практически одинаков, размах по осадкам больше, чем по температуре.

4 СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА С ВОДОСБОРОВ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА

4.1. Методология сценарной оценки

Основой базовой стохастической модели формирования многолетнего речного стока является дифференциальное уравнение первого порядка с сосредоточенными параметрами:

$$dQ/dt = -(1/k\tau)Q + \dot{X}/\tau, \quad (4.1)$$

где Q –скользящие осредненные расходы воды (модули или слой) в замыкающем створе речного бассейна;

k – коэффициент стока (может приниматься как постоянным, так и зависящим от различных факторов подстилающей поверхности, таких как залесенность бассейна, его заболоченность, и т.п. – или гидрометеорологических факторов – интенсивности осадков $\dot{X}$ и температуры воздуха $T^{\circ}\text{C}$);

τ – время релаксации речного бассейна, в данном случае – один год).

После переобозначений и введения в (4.1) шумов, получается стохастическое дифференциальное уравнение (модель линейного формирующего фильтра):

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt, \quad (4.2)$$

где $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$; $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$;

$\bar{c}$, $\bar{N}$ – математические ожидания;

$\tilde{c}, \tilde{N}$ – коррелированные друг с другом белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$.

В науке используется процедура замены модели линейного формирующего фильтра статистически эквивалентным ей уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), описывающим марковскую эволюцию плотности вероятности $p(Q, t)$:

$$\frac{\partial p(Q; t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(A(Q; t)p(Q; t)) + 0.5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(B(Q; t)p(Q; t)), \quad (4.3)$$

Где A и B – коэффициенты сноса и диффузии, определяющиеся физико-статистическими параметрами, входящими в (4.2).

Главным аргументом в пользу уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (4.3), как описывающего процесс формирования многолетнего стока, является то обстоятельство, что для стационарных случайных процессов данное уравнение переходит в уравнение Пирсона:

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2} p, \quad (4.4)$$

решением которого является семейство кривых $p(Q)$. Изначально данное уравнение не имело отношения к гидрологии, оно было предложено для аппроксимации эмпирических распределений без всякой связи с уравнением ФПК.

Ситуация радикально меняется при подходе к уравнению Пирсона со стороны уравнения ФПК: коэффициенты связываются формулами с параметрами $\bar{c}, \bar{N}, G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{N}}, G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ и приобретают физический смысл. Это открывает возможность рассматривать уравнение (4.3) как генетическую

модель формирования стока, а решение $p(Q)$ уравнения Пирсона с физически обоснованными коэффициентами a, b_0, b_1, b_2 – как теоретическое распределение, с которым согласуется (или не согласуется) эмпирический набор точек. Меняя факторы формирования стока (климатические или подстилающей поверхности бассейнов) через параметры $\bar{c}$ и $\bar{N}$, т. е. через осадки $\dot{X}$ и величины, влияющие на коэффициент стока k , становится возможным оценивать чувствительность к подобным изменениям кривой плотности вероятности.

Так как в практической гидрологии из-за коротких рядов наблюдений ограничиваются 3–4 моментами вероятностных распределений, то имеет смысл аппроксимировать (4.3) системой дифференциальных уравнений для начальных моментов m_i :

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Данной системы уравнений достаточно для определения всех расчетных гидрологических характеристик: нормы $\bar{Q} = m_1$, коэффициентов вариации $C_v = f(m_1, m_2)$ и асимметрии $C_s = f(m_1, m_2, m_3)$, а также эксцесса $Eh = f(m_1, m_2, m_3, m_4)$. Для m_3 , как видно из третьего уравнения системы (4.5), неустойчивость возникает при $G_{\tilde{c}}/\bar{c} = 0,67$, что имеет место почти на половине территории России. Четвертый момент m_4 на практике не используется, а в отношении коэффициента асимметрии целесообразнее выбрать соотношение C_s/C_v , чем рассчитывать его самостоятельно. Климатические сценарии носят квазистационарный характер (выделяется временной промежуток, к примеру, в 20 лет, и для него указываются характеристики метеоэлементов). Другой

набор – для следующего временного промежутка и т.д. Таким образом, для каждого интервала процесс формирования многолетнего стока можно рассматривать как статистически стационарный, т. е. можно считать, что $dm_i / dt \approx 0$.

Таким образом, система (4.5) сводится к двум алгебраическим уравнениям для m_1 и m_2 , в которых присутствует только $a = 2\bar{N} / 2\bar{c}$ и $b_0 = -G_{\tilde{N}} / 2\bar{c}$.

Согласно сделанным упрощениям, система (4.5) вырождается в две простые формулы:

$$-\bar{c}m_1 + \bar{N} = 0, \quad (4.6)$$

$$-2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\tilde{N}} = 0.$$

Причем, так как $\tau=1$, то $\bar{c}=1/\bar{k}$, $\bar{N}=\bar{\dot{X}}$. Вначале, зная m_1 , m_2 и $\dot{X}$ находятся $\bar{c}$ и $G_{\tilde{N}}$, затем определяется прогнозное значение коэффициента стока. Для этого используется выражение для коэффициента стока $k = \bar{Q} / \dot{X} = 1 - \bar{E} / \bar{\dot{X}}$, полученное из уравнения водного баланса для замкнутых речных водосборов ($\bar{Q} = \bar{\dot{X}} - \bar{E}$). Коэффициент стока связывается с параметрами, фигурирующими в климатических сценариях ($\bar{T}, ^\circ\text{C}$ и $\bar{\dot{X}}$), путем использования формулы Н.А. Багрова ($E = f(\dot{X}, E_0)$, E_0 – испаряемость) и Л. Тюрка ($E_0 = f(T)$):

$$k = 1 - \text{th}((300 + 25\bar{T} + 0,05\bar{T}^3) / \bar{\dot{X}}). \quad (4.7)$$

Решение прогностической задачи разбивается на два этапа: по имеющимся (из карт или в результате наблюдений) данным находятся m_i , и по ним выполняется параметризация модели (4.5), т. е. находятся $\bar{c}$, $\bar{N}$, $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$, $G_{\bar{c}\bar{N}}$, а затем, меняя (в соответствии с климатическим сценарием) значения $c(\dot{X}, T)$ и $N(\dot{X})$, находятся сценарные значения моментов $m_i^{\text{пр}}$. По ним и вычисляются прогнозные расчетные характеристики.

4.2 Формирование базы данных

В качестве исходных данных для выполнения прогноза взяты площади водосборов 7 пунктов в Ленинградской, Псковской и Новгородской областях, фактические и прогнозные осадки и температура, модуль стока, слой стока и коэффициент вариации.

В таблице 4.1 представлены исходные данные рек Северо-Западного региона, а также произведен расчет основных характеристик стока,

где F – площадь водосбора, км²,

$T, T_{\text{пр}}$ – фактическая и прогнозная температура соответственно, °C,

$X, X_{\text{пр}}$ – фактические и прогнозные осадки соответственно, мм,

q – модуль стока, л/с*км²,

h – слой стока, мм,

$C_v, C_{v_{\text{пр}}}$ – коэффициенты вариации, фактический и прогнозный соответственно,

$k, k_{\text{пр}}$ – коэффициенты стока, фактический и прогнозный соответственно,

$c, c_{\text{пр}}$ – коэффициент, обратно пропорциональный коэффициенту стока, фактический и прогнозный соответственно,

$m_1, m_{1\text{пр}}$ – первый момент (норма стока), фактический и прогнозный соответственно,

$m_2, m_{2\text{пр}}$ – второй момент, фактический и прогнозный соответственно,

Gn – интенсивность внешних шумов,

Δm_1 – погрешность прогноза нормы стока по модели, %,

ΔCv – погрешность прогноза коэффициента вариации по модели, %.

Таблица 4.1 – Исходные данные рек Северо-Западного региона для ретроспективной оценки нормы стока и коэффициента вариации

Река – пункт	F , км ²	T , °C	X , мм	$T_{пр}$, °C	$X_{пр}$, мм	q , л/с*км ²	h , мм	C_v
<i>HadGem2-ES</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	4,4	570	7,17	226	0,28
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	4,7	553	6,89	217	0,26
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	5,1	547	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	4,4	565	6,13	193	0,28
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	3,8	566	7,02	221	0,31
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	3,3	605	9,05	285	0,35
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	3,3	586	8,76	276	0,36
<i>MPI-ESM-LR</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	4,9	589	7,17	226	0,26
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	5	655	6,89	217	0,24
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	5,2	695	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	4,8	646	6,13	193	0,26
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	4,3	572	7,02	221	0,30

Продолжение таблицы 4.1

Река – пункт	$F, \text{ км}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$X, \text{ мм}$	$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$X_{\text{пр}}, \text{ мм}$	$q, \text{ л/с*км}^2$	$h, \text{ мм}$	C_v
<i>MPI-ESM-LR</i>								
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	3,6	651	9,05	285	0,37
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	3,6	669	8,76	276	0,35

Продолжение таблицы 4.1

Река – пункт	k	$k_{\text{пр}}$	c	$m_2, \text{ м}^6/\text{с}^2$	$Gn, \text{ м}^6/\text{с}^3$	$c_{\text{пр}}$	$m_{1\text{пр}}, \text{ мм}$	$m_{1\text{пр}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$m_{2\text{пр}}, \text{ м}^6/\text{с}^2$	$C_{v\text{пр}}$	$\Delta m_1, \%$	$\Delta C_v, \%$
<i>HadGem2-ES</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,38	2,91	55080	23317	2,64	216	8,8	51066	0,31	4	-10
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,36	2,81	50272	17896	2,81	197	18,6	42025	0,29	9	-10
р. Исса – д. Визги	0,33	0,34	3,06	41696	12822	2,95	186	8,3	36668	0,25	7	-9
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,37	3,22	40169	18823	2,67	212	14,5	48415	0,28	-10	0
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,39	2,76	53535	25953	2,54	223	9,2	54818	0,32	-1	-3
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,44	2,54	91175	50623	2,28	265	11,2	81437	0,40	7	-13

Продолжение таблицы 4.1

Река – пункт	k	$k_{\text{пр}}$	c	$m_2,$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Gn,$ $\text{м}^6/\text{с}^3$	$c_{\text{пр}}$	$m_{1\text{пр}},$ мм	$m_{1\text{пр}},$ $\text{м}^3/\text{с}$	$m_{2\text{пр}},$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Cv_{\text{пр}}$	$\Delta m_1,$ %	$\Delta Cv,$ %
<i>HadGem2-ES</i>												
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,42	2,45	86048	48432	2,36	249	13,8	72141	0,41	10	-13
<i>MPI-ESM-LR</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,38	2,91	54529	20105	2,64	223	9,1	53529	0,28	1	-6
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,42	2,81	49801	15249	2,37	277	26,1	79881	0,21	-28	15
р. Исса – д. Визги	0,33	0,44	3,06	41696	12822	2,26	308	13,7	97529	0,17	-55	25
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,42	3,22	39767	16230	2,37	273	18,6	77920	0,21	-41	17
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,38	2,76	53237	24305	2,61	219	9,1	52777	0,31	1	-4
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,46	2,54	92345	56573	2,17	300	12,7	103132	0,38	-5	-3
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,47	2,45	85508	45778	2,12	316	17,6	110810	0,33	-15	6

Обе модели дали довольно схожие значения прогнозного коэффициента стока, близкие к фактическим значениям.

Результаты погрешностей Δm_1 и ΔC_v находятся в пределах допустимой погрешности ($\Delta=15\%$) по данным модели *HadGEM2-ES*. Модель *MPI-ESM-LR* дает большие погрешности по некоторым из выбранных рек, вплоть до 55% отклонения по норме стока и 25% отклонения по коэффициенту вариации на р. Исса. Дисперсия нормы стока и коэффициента вариации совпадает при использовании обеих моделей, при увеличении одной величины увеличивается и другая. Результаты погрешностей ретроспективного прогноза представлены в виде гистограмм на рисунках 4.1–4.2. Данные гистограммы наглядно отображают дисперсию между рядами полученных данных.

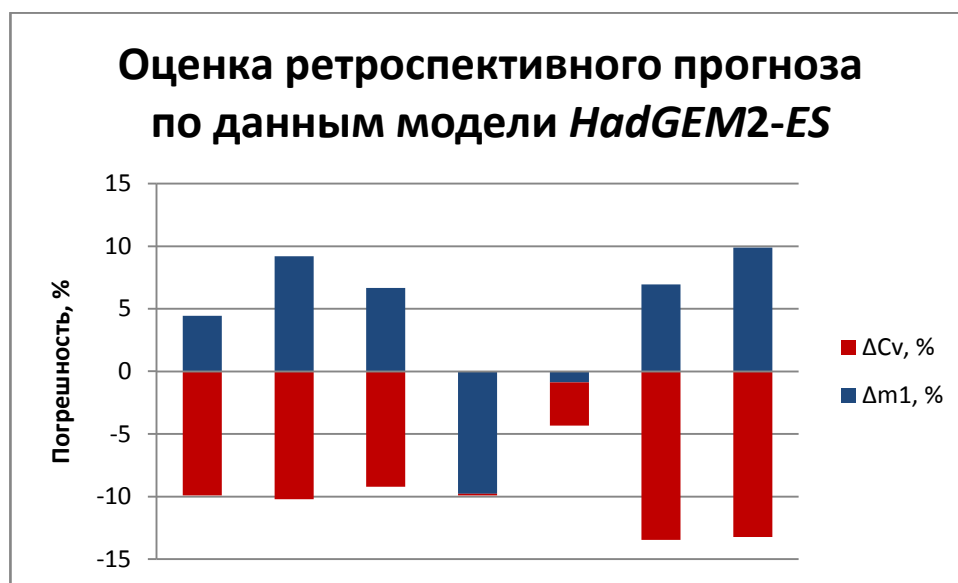


Рисунок 4.1 – Гистограмма оценки погрешности ретроспективного прогноза по данным модели *HadGEM2-ES*.

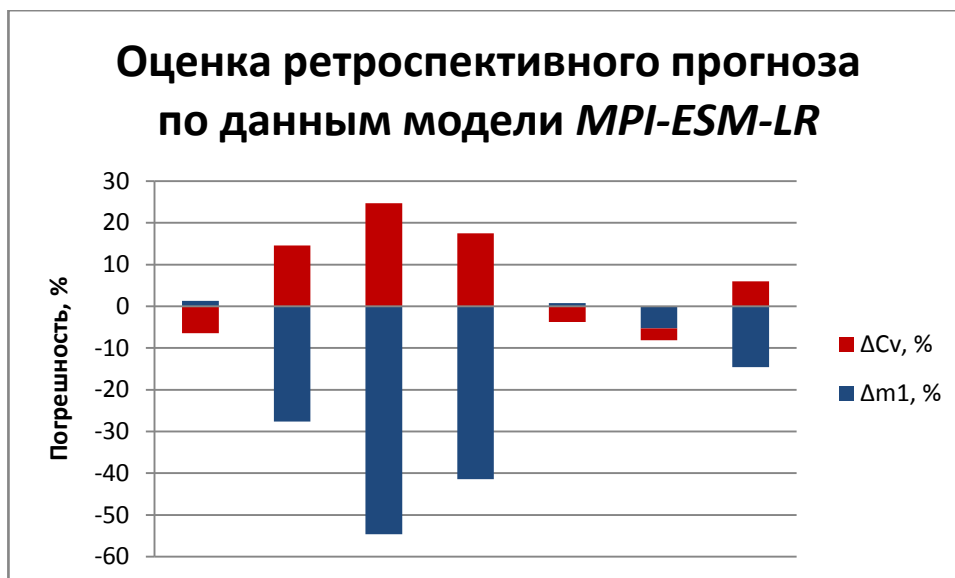


Рисунок 4.2 – Гистограмма оценки погрешности ретроспективного прогноза по данным модели *MPI-ESM-LR*.

4.3. Результаты сверхдолгосрочных прогнозов

Результаты сверхдолгосрочных прогнозов представлены в таблицах 4.2–4.3. Оценка нормы стока и коэффициента вариации проводилась по трем сценарным моделям за периоды 2016–2035 гг. и 2046–2065 гг.

Климатические данные по расчетным водосборам также представлены в приложении А, в виде графиков с различным периодом (месяцы (*a, z*) и годы (*б, в, д, e*)).

Таблица 4.2 – Долгосрочная оценка нормы стока и коэффициента вариации по сценарным моделям (на период 2016–2035 гг.)

Река – пункт	F , км ²	T , °C	X , мм	$T_{пр}$, °C	$X_{пр}$, мм	q , л/с*км ²	h , мм	C_v
<i>HadGEM2-ES 2016-2035</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	7,4	570	7,17	226	0,28
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	7,7	552	6,89	217	0,26
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	8,1	534	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	7,5	565	6,13	193	0,28
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	6,8	593	7,02	221	0,31
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	6,3	626	9,05	285	0,35
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	6,4	608	8,76	276	0,36
<i>MPI-ESM-LR 2016–2035</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	6,8	636	7,17	226	0,26
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	6,9	702	6,89	217	0,24
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	7,1	736	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	6,8	693	6,13	193	0,26
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	6,2	638	7,02	221	0,30

Продолжение таблицы 4.2

Река – пункт	$F, \text{ км}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$X, \text{ мм}$	$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$X_{\text{пр}}, \text{ мм}$	$q, \text{ л/с*км}^2$	$h, \text{ мм}$	C_v
<i>MPI-ESM-LR 2016-2035</i>								
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	5,7	722	9,05	285	0,37
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	5,8	730	8,76	276	0,35
<i>ensemble 2016-2035</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	6,0	607	7,17	226	0,27
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	6,5	619	6,89	217	0,25
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	6,9	638	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	6,2	602	6,13	193	0,25
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	5,3	604	7,02	221	0,29
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	4,8	592	9,05	285	0,35
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	4,9	585	8,76	276	0,33

Продолжение таблицы 4.2

Река – пункт	k	$k_{\text{пр}}$	c	$m_2,$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Gn,$ $\text{м}^6/\text{с}^3$	$c_{\text{пр}}$	$m1_{\text{пр}},$ мм	$m1_{\text{пр}},$ $\text{м}^3/\text{с}$	$m2_{\text{пр}},$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Cv_{\text{пр}}$	$\Delta m_1,$ %	$\Delta Cv,$ %
<i>HadGEM2-ES 2016-2035</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,29	2,91	55080	23317	3,43	166	6,8	31071	0,35	26	-25
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,27	2,81	50272	17896	3,73	148	13,9	24240	0,33	32	-27
р. Исса – д. Визги	0,33	0,24	3,06	41696	12822	4,12	130	5,8	18336	0,30	35	-32
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,28	3,22	40169	18823	3,51	161	11,0	28568	0,32	17	-15
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,33	2,76	53535	25953	3,07	193	8,0	41463	0,34	13	-9
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,36	2,54	91175	50623	2,75	227	9,6	60885	0,42	20	-20
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,35	2,45	86048	48432	2,88	211	11,7	53049	0,43	23	-21
<i>MPI-ESM-LR 2016-2035</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,36	2,91	54529	20105	2,80	227	9,2	55328	0,26	-1	-1
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,40	2,81	49801	15249	2,51	280	26,4	81163	0,20	-29	18
р. Исса – д. Визги	0,33	0,41	3,06	41696	12822	2,41	305	13,7	95699	0,17	-53	27
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,40	3,22	39767	16230	2,52	275	18,8	78728	0,21	-42	21
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,38	2,76	53237	24305	2,66	240	9,9	61961	0,28	-8	6

Продолжение таблицы 4.2

Река – пункт	k	$k_{\text{пр}}$	c	$m2,$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Gn,$ $\text{м}^6/\text{с}^3$	$c_{\text{пр}}$	$m1_{\text{пр}},$ мм	$m1_{\text{пр}},$ $\text{м}^3/\text{с}$	$m2_{\text{пр}},$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Cv_{\text{пр}}$	$\Delta m_1,$ %	$\Delta Cv,$ %
<i>MPI-ESM-LR 2016-2035</i>												
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,45	2,54	92345	56573	2,24	322	13,6	116477	0,35	-13	6
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,45	2,45	85508	45778	2,23	327	18,2	117333	0,31	-19	12
<i>ensemble 2016-2035</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,36	2,91	54799	21681	2,78	218	8,9	51577	0,29	3	-6
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,35	2,81	50032	16546	2,82	220	20,7	51119	0,25	-1	1
р. Исса – д. Визги	0,33	0,36	3,06	41696	12822	2,80	228	10,2	54070	0,21	-14	9
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,35	3,22	39577	15005	2,85	211	14,4	47282	0,24	-9	3
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,38	2,76	52949	22712	2,65	228	9,4	56142	0,29	-3	1
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,39	2,54	91175	50623	2,60	228	9,6	61701	0,43	20	-24
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,37	2,45	84472	40696	2,67	219	12,2	55741	0,40	21	-21

Таблица 4.3–Долгосрочная оценка нормы стока и коэффициента вариации по сценарным моделям (на период 2046-2065 гг.)

Река – пункт	F , км ²	T , °C	X , мм	$T_{пр}$, °C	$X_{пр}$, мм	q , л/с*км ²	h , мм	C_v
<i>HadGEM2-ES 2046-2065</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	9,0	539	7,17	226	0,28
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	9,4	525	6,89	217	0,26
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	9,7	513	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	9,1	537	6,13	193	0,28
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	8,4	561	7,02	221	0,31
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	7,9	590	9,05	285	0,35
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	7,9	579	8,76	276	0,36
<i>MPI-ESM-LR2046-2065</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	6,9	650	7,17	226	0,26
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	7,1	721	6,89	217	0,24
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	7,3	754	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	6,9	722	6,13	193	0,26
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	6,3	639	7,02	221	0,30

Продолжение таблицы 4.3

Река – пункт	F , км ²	T , °C	X , мм	$T_{\text{пр}}$, °C	$X_{\text{пр}}$, мм	q , л/с*км ²	h , мм	C_v
<i>MPI-ESM-LR2046-2065</i>								
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	5,7	744	9,05	285	0,37
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	5,8	764	8,76	276	0,35
<i>ensemble2046-2065</i>								
р. Саба – д. Райково	1280	3,7	658	6,9	651	7,17	226	0,27
р. Сороть – д. Большая Губа	2970	4,3	610	7,4	664	6,89	217	0,25
р. Исса – д. Визги	1410	4,6	609	7,8	674	6,32	199	0,23
р. Полисть – д. Подтополье	2150	4,1	622	7,1	661	6,13	193	0,25
р. Тосна – г. Тосно	1300	3,3	611	6,3	637	7,02	221	0,29
р. Воложба – д. Воложба	1330	2,9	725	5,8	650	9,05	285	0,35
р. Уверь – д. Меглецы	1750	2,9	677	5,9	672	8,76	276	0,33

Продолжение таблицы 4.3

Река – пункт	k	$k_{\text{пр}}$	c	$m_2,$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Gn,$ $\text{м}^6/\text{с}^3$	$c_{\text{пр}}$	$m1_{\text{пр}},$ мм	$m1_{\text{пр}},$ $\text{м}^3/\text{с}$	$m2_{\text{пр}},$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$C_{v_{\text{пр}}}$	$\Delta m1,$ %	$\Delta C_v,$ %
<i>HadGEM2-ES2046-2065</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,22	2,91	55080	23317	4,52	119	4,8	16792	0,43	47	-52
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,20	2,81	50272	17896	4,99	105	10,0	12866	0,40	52	-55
р. Исса – д. Визги	0,33	0,18	3,06	41696	12822	5,47	94	4,2	9978	0,36	53	-59
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,22	3,22	40169	18823	4,61	116	7,9	15580	0,39	40	-39
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,25	2,76	53535	25953	3,94	143	5,9	23605	0,40	36	-30
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,29	2,54	91175	50623	3,42	173	7,3	37193	0,50	39	-42
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,28	2,45	86048	48432	3,54	163	9,1	33540	0,51	41	-41
<i>MPI-ESM-LR 2046-2065</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,36	2,91	54529	20105	2,75	236	9,6	59494	0,26	-5	2
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,41	2,81	49801	15249	2,47	292	27,5	88377	0,19	-35	21
р. Исса – д. Визги	0,33	0,42	3,06	41696	12822	2,39	316	14,1	102356	0,16	-59	29
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,41	3,22	39767	16230	2,43	297	20,3	91473	0,19	-54	25
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,37	2,76	53237	24305	2,68	238	9,8	61335	0,28	-8	6

Продолжение таблицы 4.3

Река – пункт	k	$k_{\text{пр}}$	c	$m_2,$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Gn,$ $\text{м}^6/\text{с}^3$	$c_{\text{пр}}$	$m1_{\text{пр}},$ мм	$m1_{\text{пр}},$ $\text{м}^3/\text{с}$	$m2_{\text{пр}},$ $\text{м}^6/\text{с}^2$	$Cv_{\text{пр}}$	$\Delta m1,$ %	$\Delta Cv,$ %
<i>MPI-ESM-LR 2046-2065</i>												
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,46	2,54	92345	56574	2,18	341	14,4	128984	0,33	-20	10
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,47	2,45	85508	45779	2,14	356	19,8	137620	0,29	-29	17
<i>ensemble 2046-2065</i>												
р. Саба – д. Райково	0,34	0,36	2,91	54799	21682	2,75	236	9,6	59797	0,27	-5	2
р. Сороть – д. Большая Губа	0,36	0,36	2,81	50032	16546	2,79	238	22,4	59589	0,23	-10	8
р. Исса – д. Визги	0,33	0,35	3,06	41696	12822	2,82	239	10,7	59351	0,20	-20	13
р. Полисть – д. Подтополье	0,31	0,37	3,22	39577	15006	2,74	241	16,5	61003	0,22	-25	13
р. Тосна – г. Тосно	0,36	0,37	2,76	52949	22712	2,69	237	9,8	60335	0,27	-7	5
р. Воложба – д. Воложба	0,39	0,40	2,54	91175	50623	2,52	258	10,9	76761	0,39	9	-11
р. Уверь – д. Меглецы	0,41	0,41	2,45	84472	40696	2,45	274	15,2	83244	0,33	1	-1

По результатам произведенных расчетов видно, что наименьшее отклонение, как по норме стока, так и по коэффициенту вариации дал ансамбль моделей 5-го оценочного доклада *ensemble*. Практически по всем расчетным рекам отклонение, рассчитанное по ансамблю моделей, удовлетворительна ($\Delta < 15\%$), как за период 2016–2035 гг. (исключая р. Воложба и р. Уверь по обеим расчетным характеристикам), так и за период 2046–2065 гг. (исключая р. Исса и р. Полисть по норме стока).

Модель *HadGEM2-ES* дала результаты, выходящие за пределы допустимых отклонений, за оба расчетных периода. Это может быть связано с низкими прогнозными значениями коэффициента стока, повлекшими за собой уменьшенные значения нормы стока, а так же с увеличенными значениями прогнозных коэффициентов вариации для расчетных водосборов.

Модель *MPI-ESM-LR* также дала похожие результаты, лишь примерно в половине случаев выйдя за пределы допустимого отклонения по искомым значениям коэффициента вариации и нормы стока. В данном случае прогнозные коэффициенты стока, в отличие от модели *HadGEM2-ES*, наоборот, были увеличены, что повлекло за собой увеличение значений нормы стока.

На рисунках 4.3–4.8 изображены гистограммы оценки отклонений прогноза нормы стока и коэффициента вариации, наглядно иллюстрирующие полученные результаты в графическом виде. Гистограммы наглядно показывают дисперсию между рядами полученных данных.

По полученным данным погрешностей норм стока и коэффициентов вариации за периоды 2016–2035 гг. и 2046–2065 гг. также были построены карты-схемы (Приложение Б).

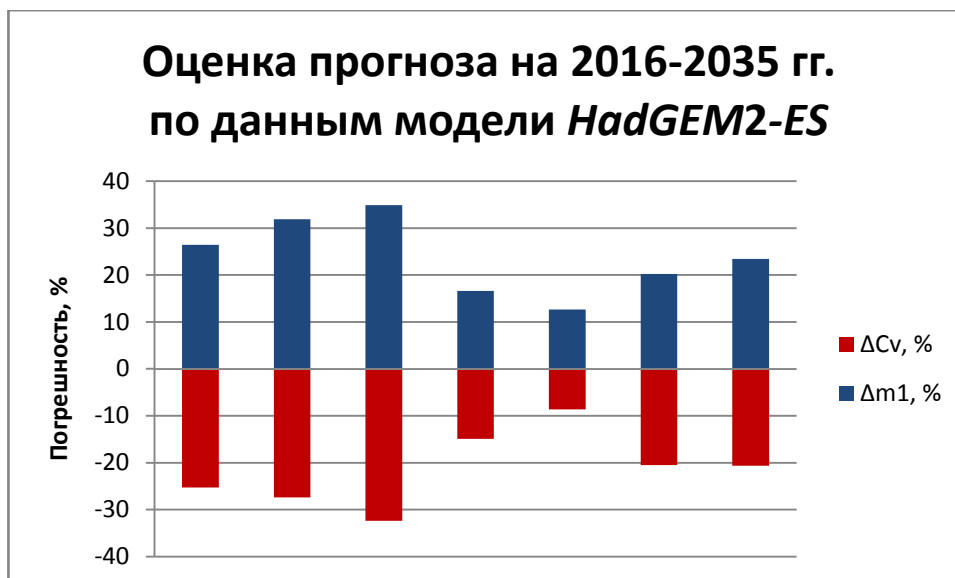


Рисунок 4.3 – Гистограмма оценки отклонения прогнозанормы стока и коэффициента вариации на 2016–2035 гг. по данным модели *HadGEM2-ES*.

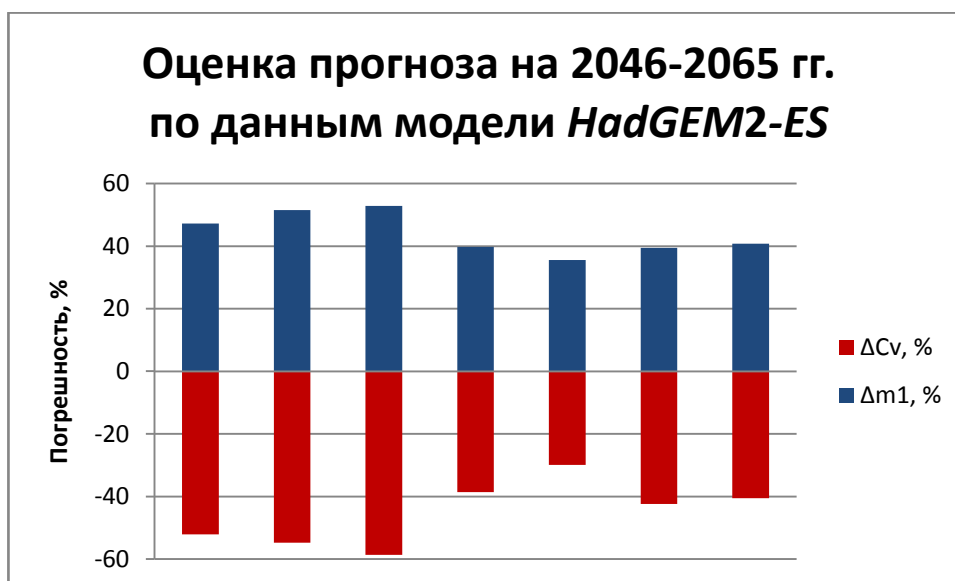


Рисунок 4.4 – Гистограмма оценки отклонения прогноза нормы стока и коэффициента вариации на 2046–2065 гг. по данным модели *HadGEM2-ES*.

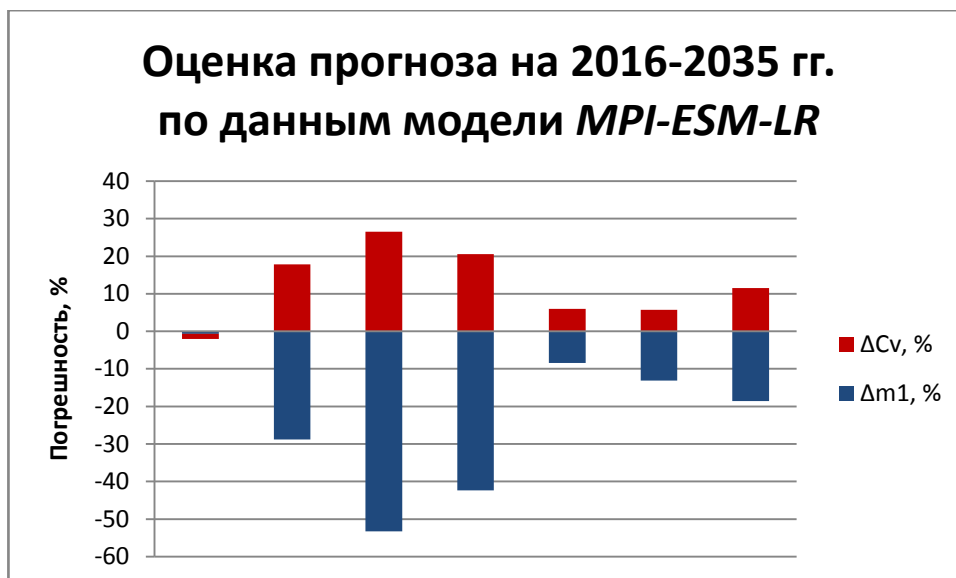


Рисунок 4.5 – Гистограмма оценки отклонения прогноза нормы стока и коэффициента вариации на 2016–2035 гг. по данным модели *MPI-ESM-LR*.

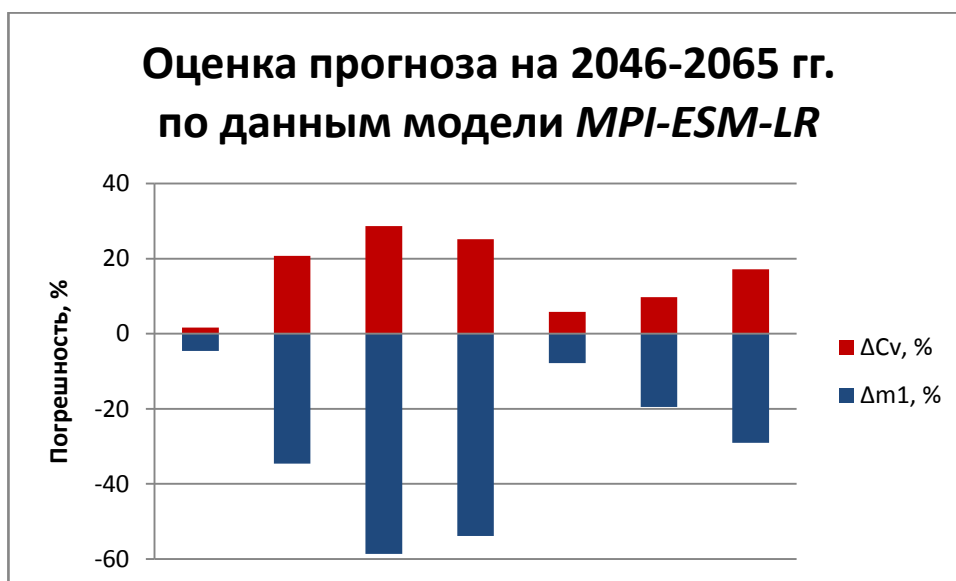


Рисунок 4.6 – Гистограмма оценки отклонения прогноза нормы стока и коэффициента вариации на 2046–2065 гг. по данным модели *MPI-ESM-LR*.

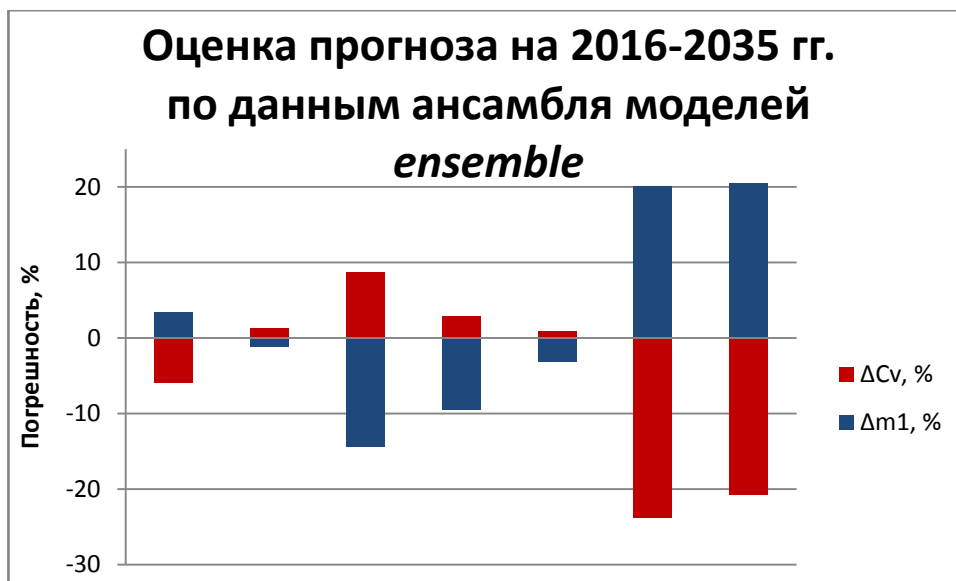


Рисунок 4.7 – Гистограмма оценки отклонения прогноза нормы стока и коэффициента вариации на 2016–2035 гг. по данным ансамбля моделей *ensemble*.

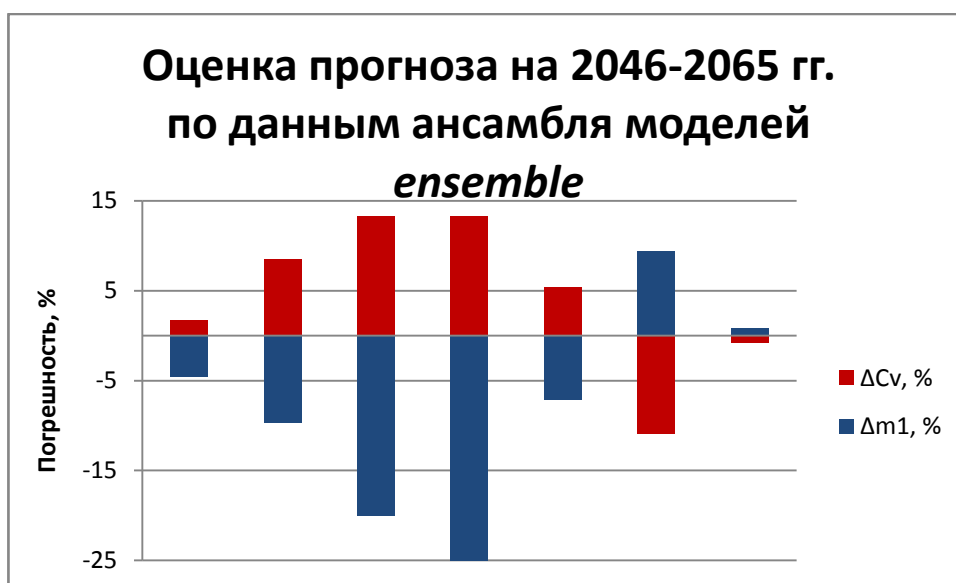


Рисунок 4.8 – Гистограмма оценки отклонения прогноза нормы стока и коэффициента вариации на 2046–2065 гг. по данным ансамбля моделей *ensemble*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования были получены следующие результаты:

- разобраны климатические сценарии и сценарные модели Пятого оценочного доклада МГЭИК, выбран возможный сценарий развития изменений климата;

- выбраны наиболее подходящие модели для сценарной оценки водных ресурсов на территории Северо-Западного региона, адекватно описывающие как естественные, так и антропогенные факторы изменения климата в будущем;

- произведен ретроспективный прогноз гидрометеозаэлементов по выбранным моделям, показывающий, насколько модельные данные соответствуют фактическим данным за тот же период;

- произведена сценарная оценка характеристик стока с бассейнов рек Северо-Западного региона, в частности, выбрана подходящая методология сценарной оценки, сформирована база данных;

- построены гистограммы и карты-схемы оценки отклонений рассчитанных характеристик стока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Изменение климата, 2013 г. Резюме для политиков. [Электронный ресурс] / T.F.Stocker, S.K.Allen//*Intergovernmental Panel of Climate Change*, 2013. – Режим доступа: [http://www. climatechange.kg/](http://www.climatechange.kg/). – (Дата обращения 14.03.2016.).
- 2 Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. [Электронный ресурс] / В.П. Мелешко, С.М. Семенов // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2014. – Режим доступа:<http://climate2008.igce.ru/>. – (Дата обращения 17.03.2016.).
- 3 Прогнозы изменения климата для России и стран Центральной Азии. [Электронный ресурс] / В.В. Катцов, В.Л. Говоркова, В.П. Мелешко // *NorthEurasiaClimateCentre*, 2008. – Режим доступа:<http://neacc.meteoinfo.ru/>. – (Дата обращения 17.03.2016.).
- 4 Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана *INMCM 4.0*. [Электронный ресурс] / Е.М.Володин// «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», 2014. – Режим доступа: <http://www.maik.ru/>. – (Дата обращения 18.03.2016.).
- 5 Оценка климатических моделей *CMIP5* и прогнозируемые изменения температуры на территории Северной Евразии. [Электронный ресурс] / C.Miao, Q.Duan, Y.Huang // *IOP Publishing*, 2014. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/>. – (Дата обращения 24.03.2016).
- 6 *Comparison of CMIP5 and CMIP3 climate model precipitation projections*. [Электронный ресурс] / J. Wang, H. Yin, F. Chung // *Bay-Delta Office, Department of Water Resources, California*, 2013. – Режим доступа: <http://www.cwemf.org/>. – (Дата обращения 29.03.2016).

- 7 Лобанов, В.А. Методические указания по выполнению лабораторной работы: «Сценарные оценки будущего климата на основе моделей общей циркуляции атмосферы и океана и данных проекта *CMIP5*».[Текст] / В.А.Лобанов, А.Л.Кандове, О.А.А.Шукри. – СПб.:изд. РГГМУ, 2014. – 31 с.
- 8 Коваленко, В. В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. [Текст] / В.В. Коваленко.– СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 99 с.
- 9 Коваленко, В. В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. [Текст] / В.В.Коваленко, Н.В. Викторова, Е.В. Гайдукова и др.– СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – 50с.
- 10 Сикан, А.В. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. [Текст] / А. В. Сикан, Н. Г. Малышева, И. О. Винокуров. – СПб.: изд. РГГМУ, 2014. – 408 с.
- 11 Коваленко, В.В. Моделирование гидрологических процессов.[Текст] / В.В.Коваленко, Н.В. Викторова, Е.В. Гайдукова. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.

Приложение А – Климатические характеристики по сценарным моделям с различным разрешением

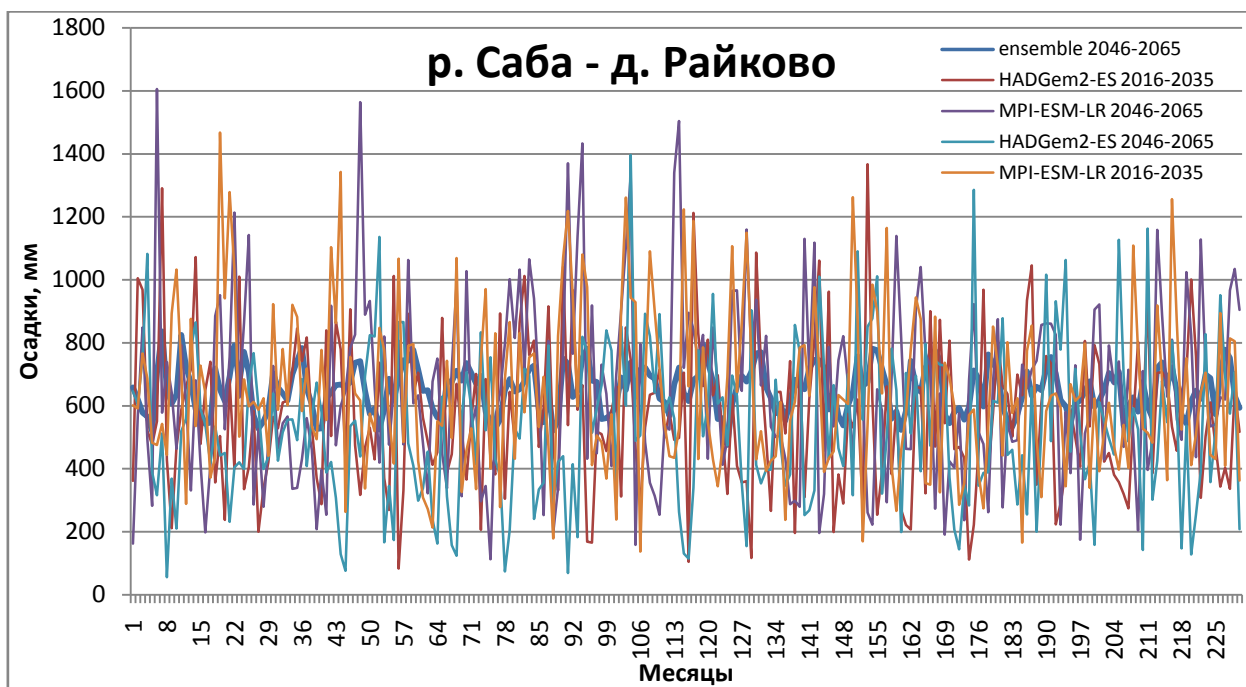


Рисунок А.1 – Месячные осадки (а), р. Саба – д. Райково.

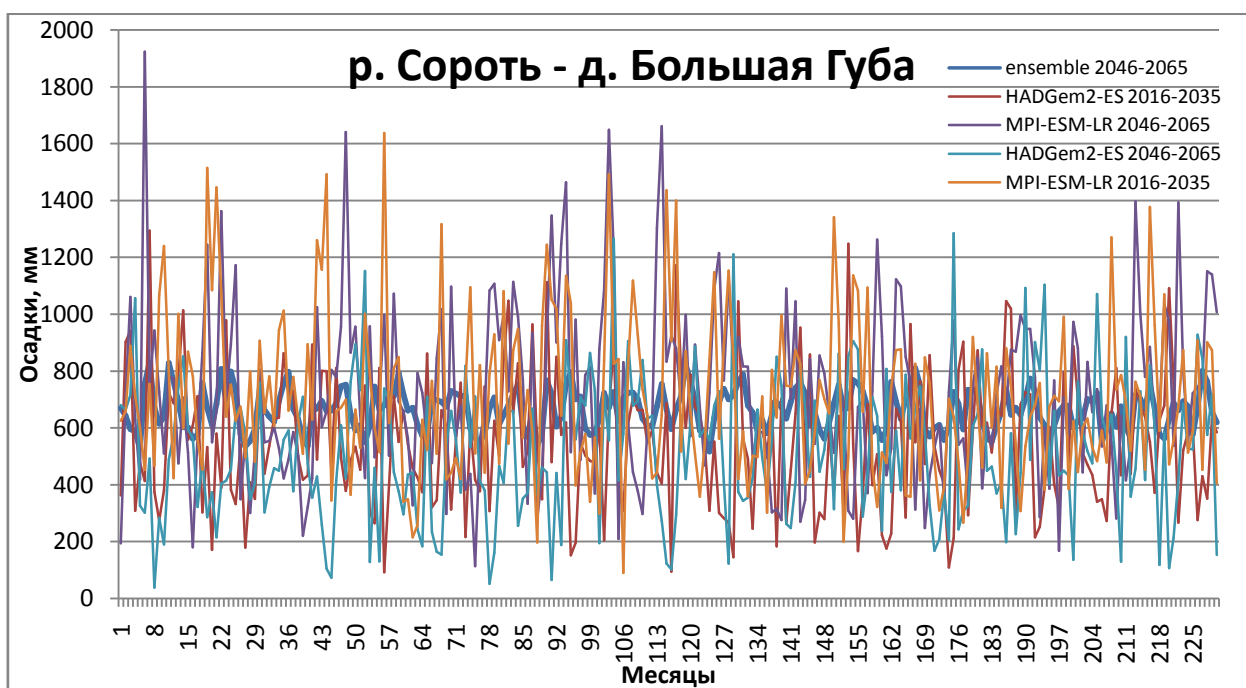


Рисунок А.2 – Месячные осадки (а), р. Сороть – д. Большая Губа.

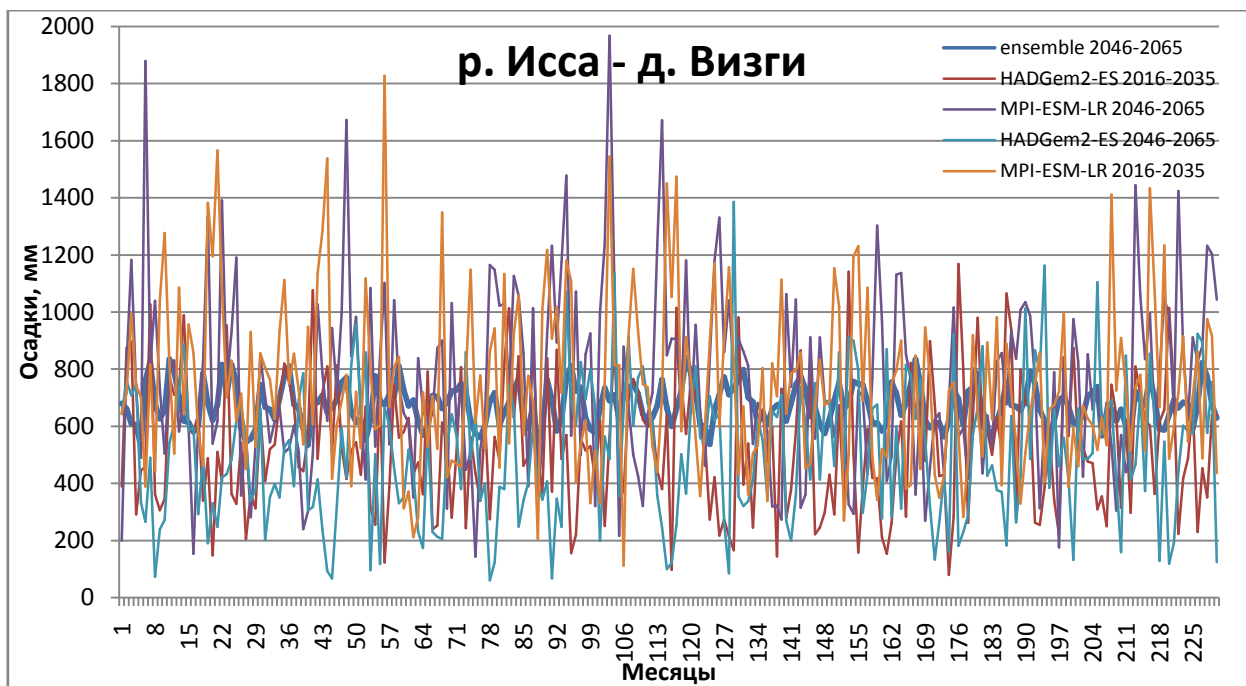


Рисунок А.3 – Месячные осадки (а), р. Исса – д. Визги.

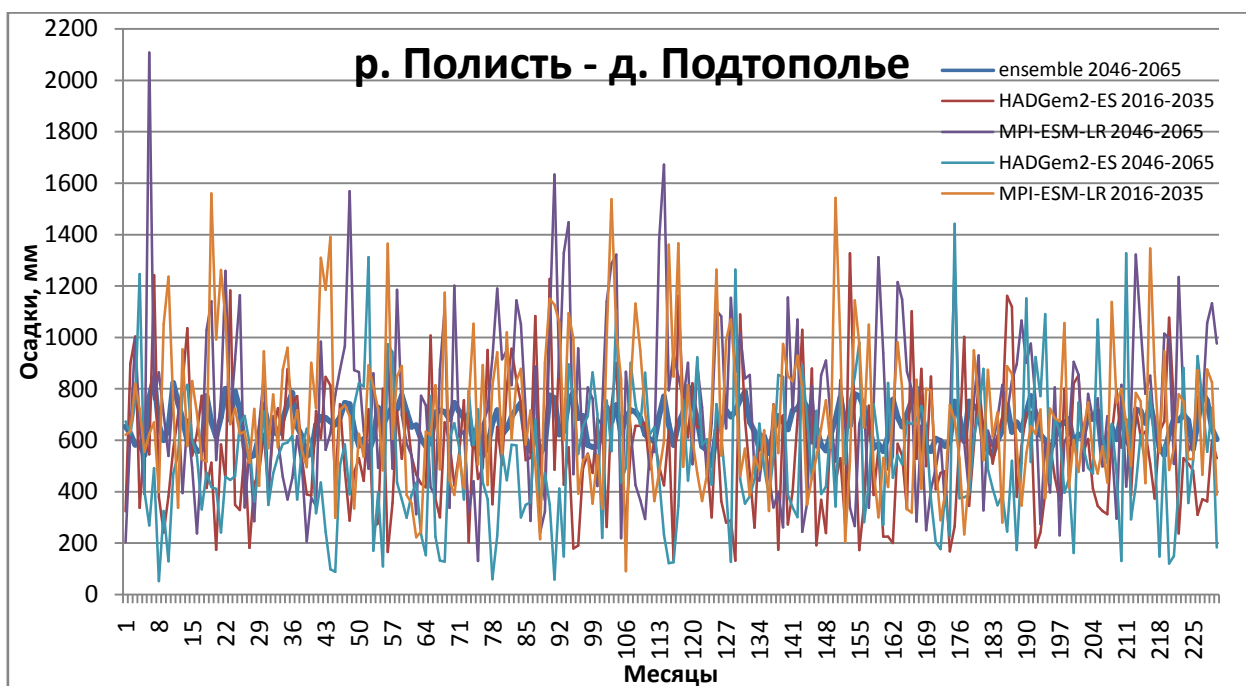


Рисунок А.4 – Месячные осадки (а), р. Полисть – д. Подтополье.

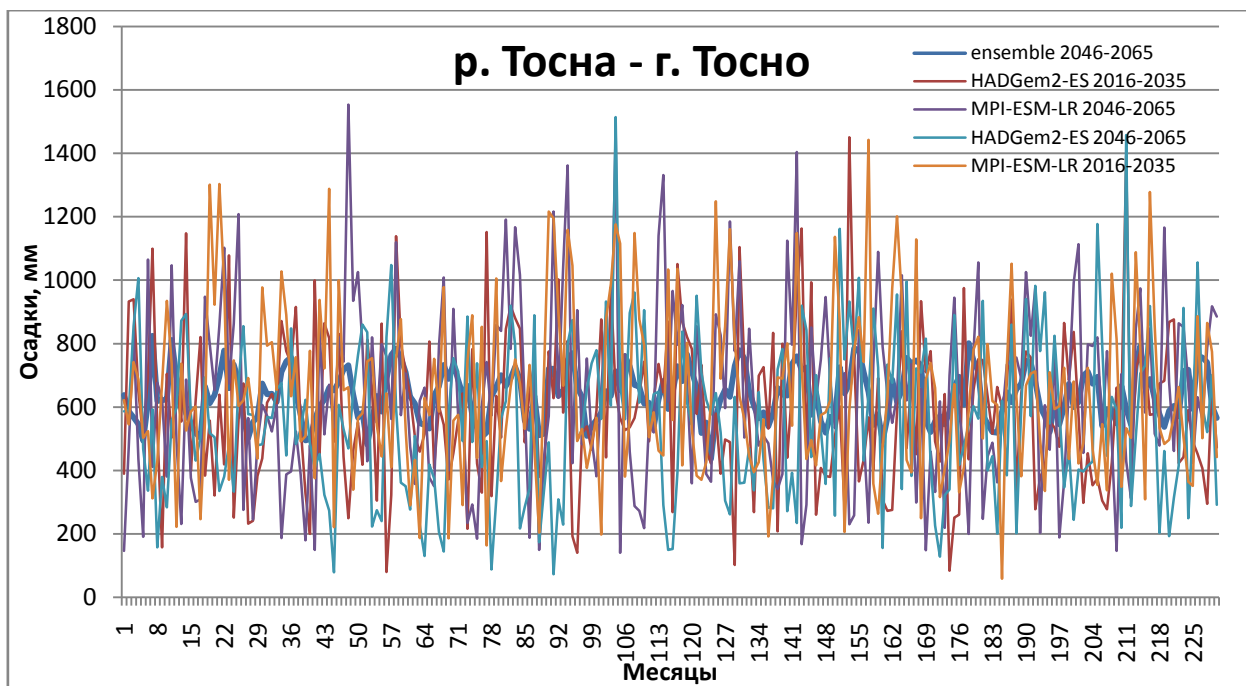


Рисунок А.5 – Месячные осадки (а), р. Тосна – г. Тосно.

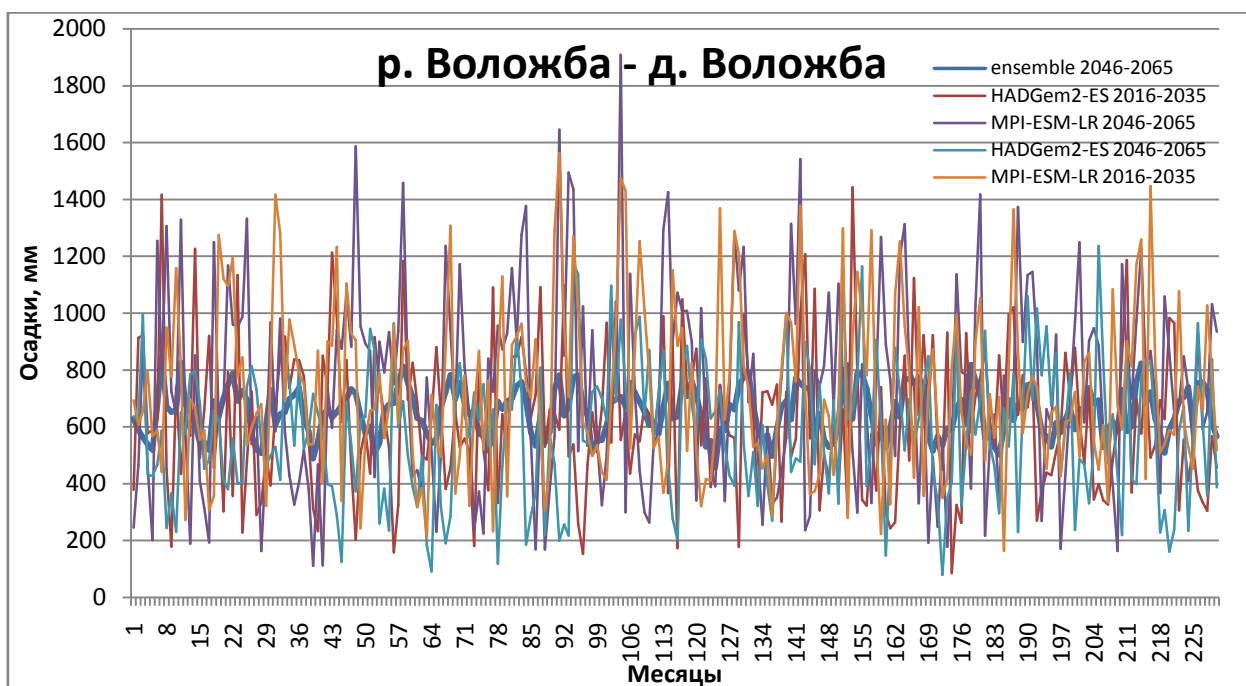


Рисунок А.6 – Месячные осадки (а), р. Воложба – д. Воложба.

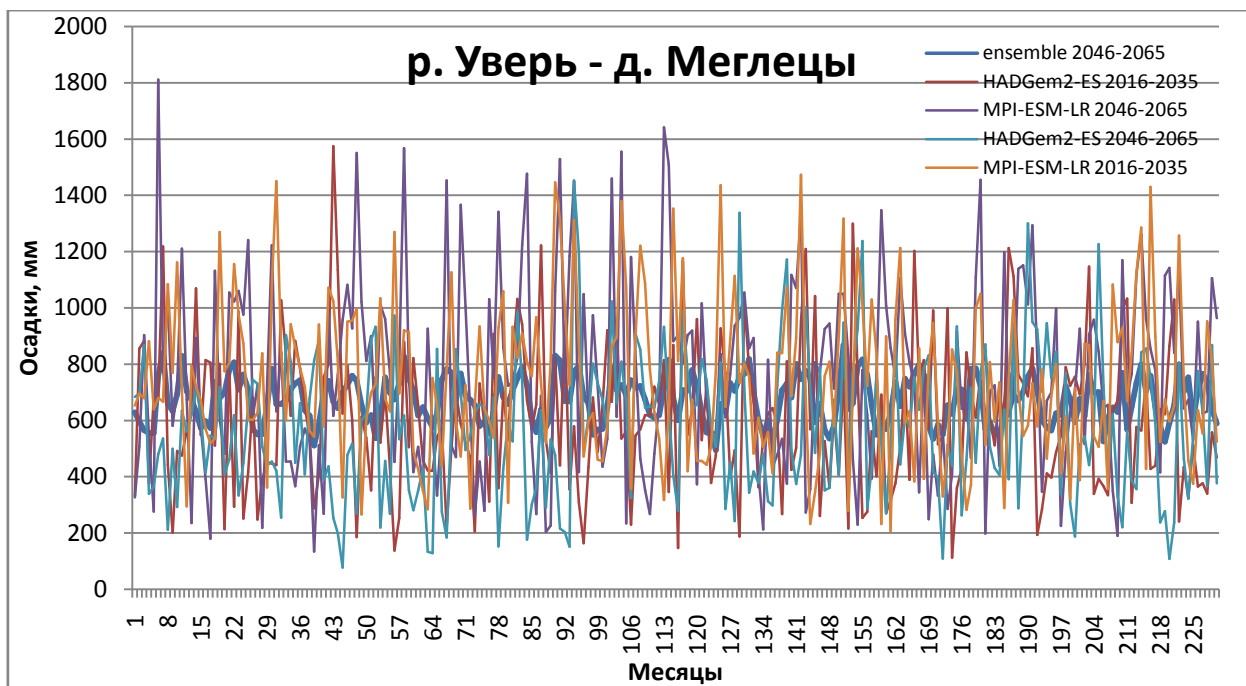


Рисунок А.7 – Месячные осадки (а), р. Уверь – д. Меглецы.

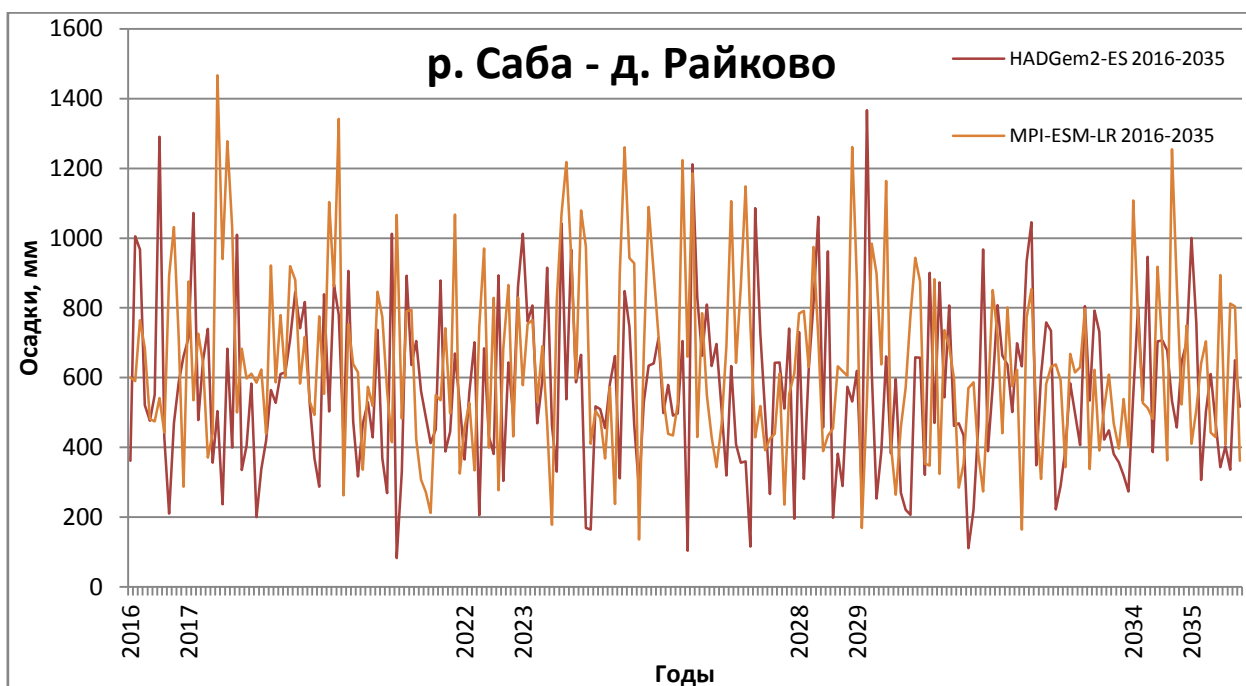


Рисунок А.8 – Годовые осадки за период 2016–2035 гг. (б), р. Саба – д. Райково.

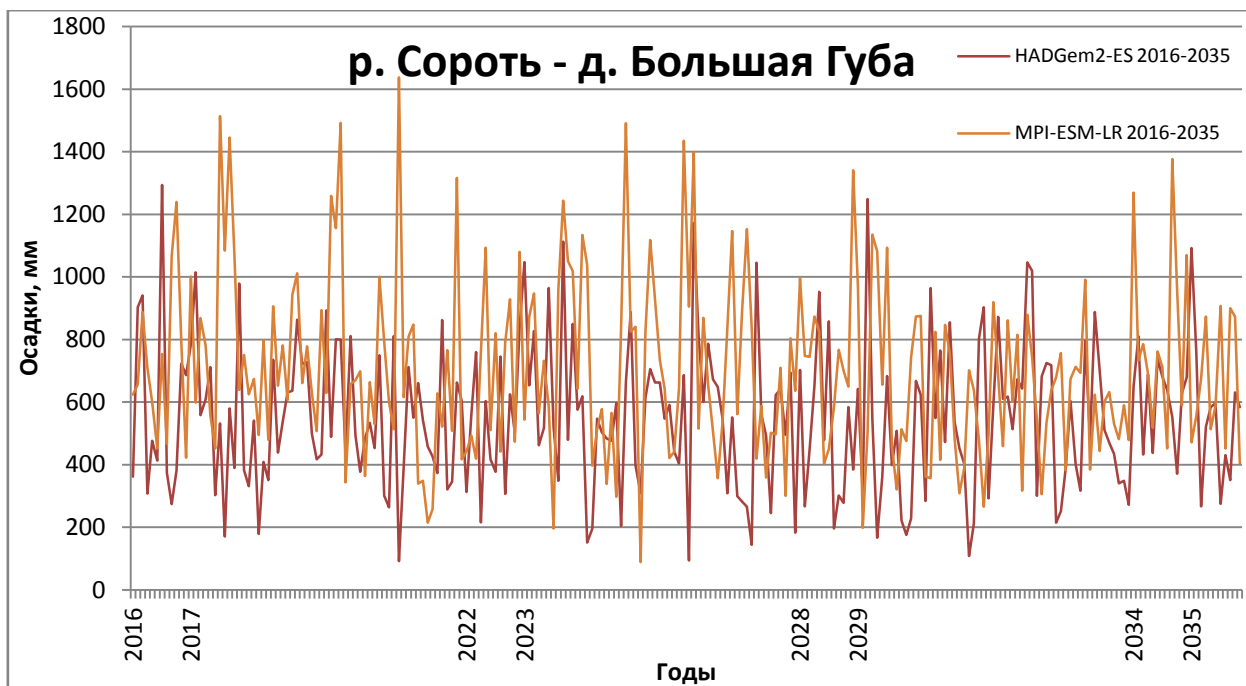


Рисунок А.9 – Годовые осадки за период 2016–2035 гг. (б), р. Сороть – д. Большая Губа.

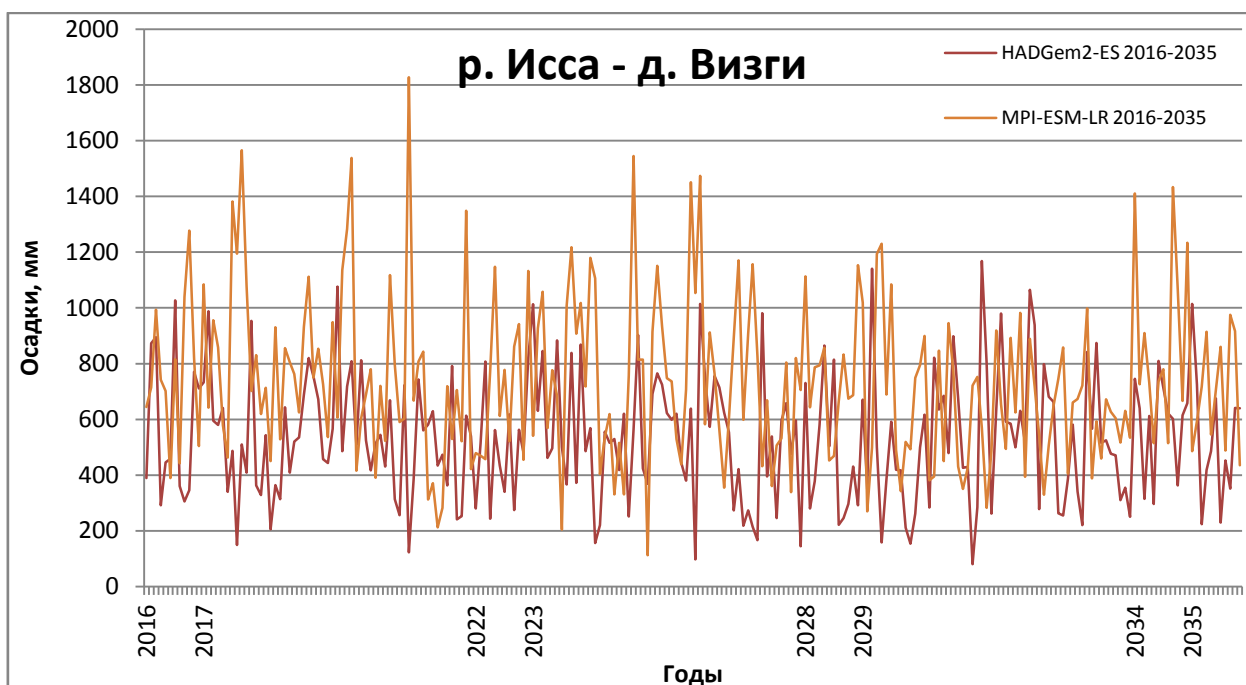


Рисунок А.10 – Годовые осадки за период 2016–2035 гг. (б), р. Исса – д. Визги.

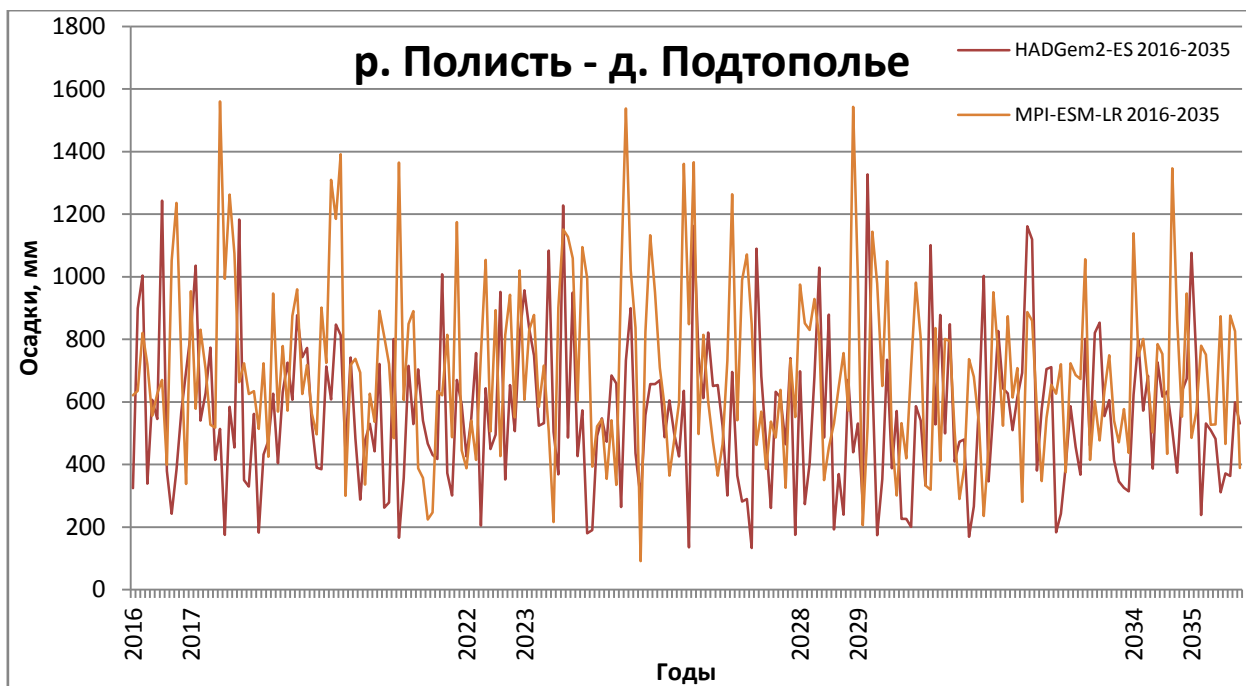


Рисунок А.11 – Годовые осадки за период 2016–2035 гг. (б), р. Полисть – д. Подтополье.

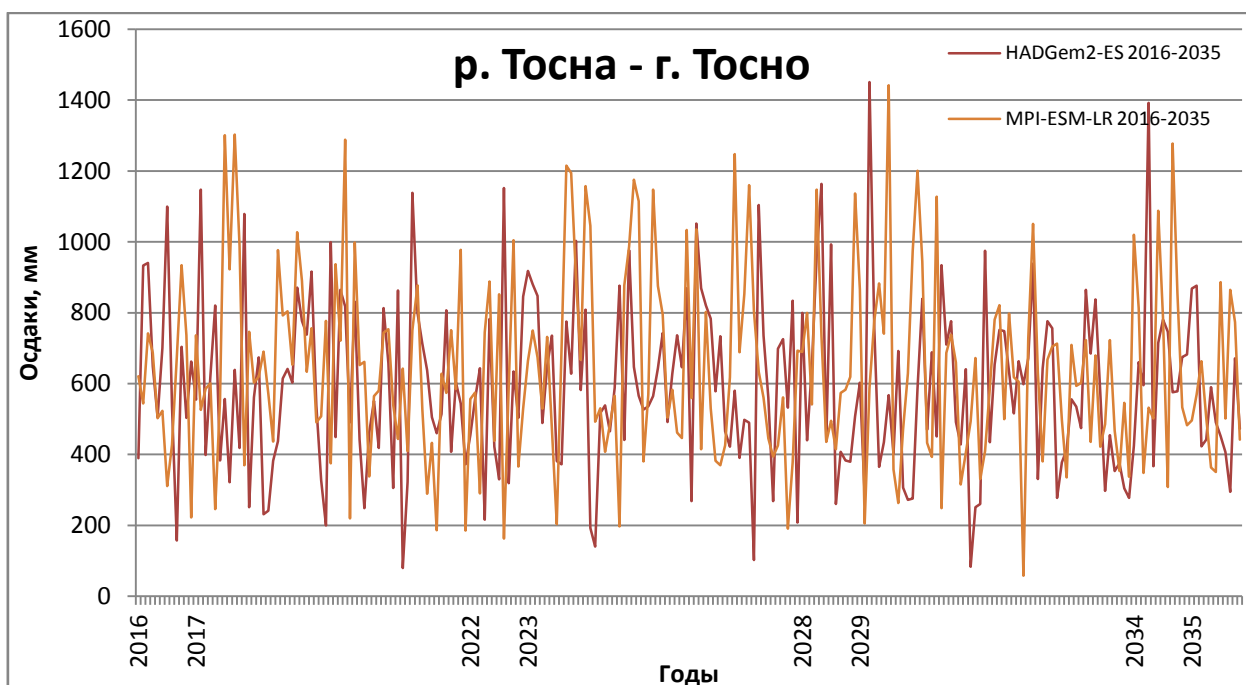


Рисунок А.12 – Годовые осадки за период 2016–2035 гг. (б), р. Тосна – г. Тосно.

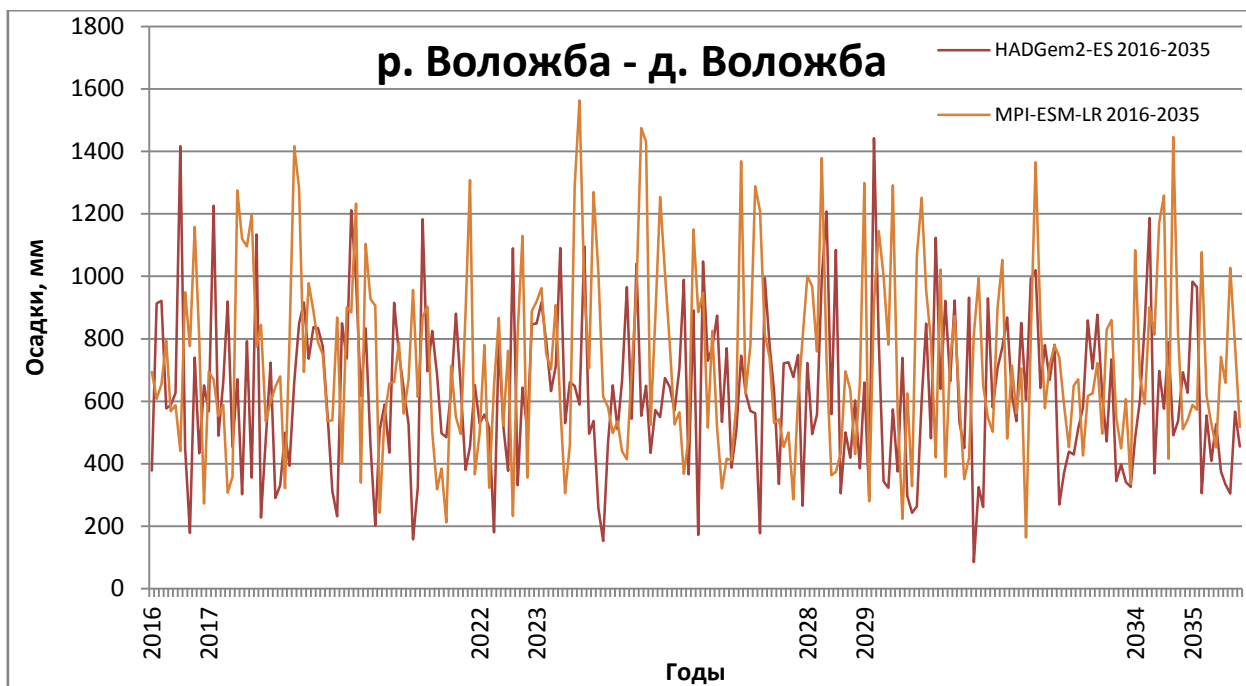


Рисунок А.13 – Годовые осадки за период 2016–2035 гг. (б), р. Воложба – д. Воложба.

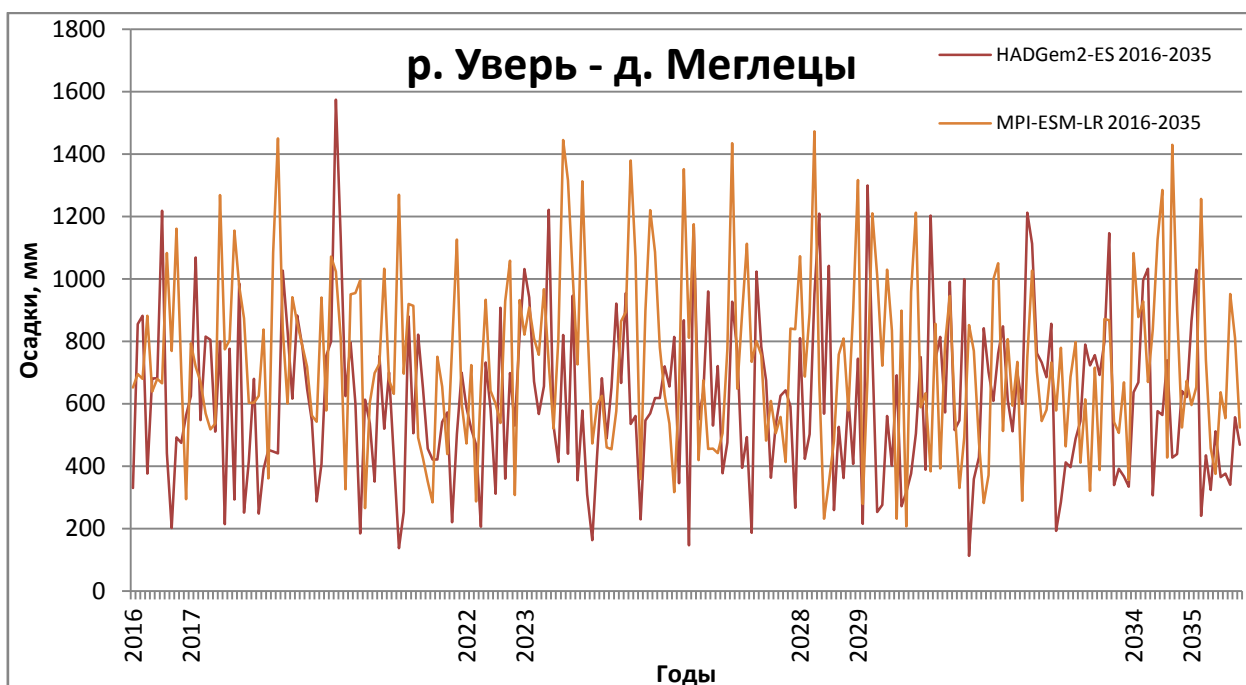


Рисунок А.14 – Годовые осадки за период 2016–2035 гг. (б), р. Уверь – д. Меглецы.

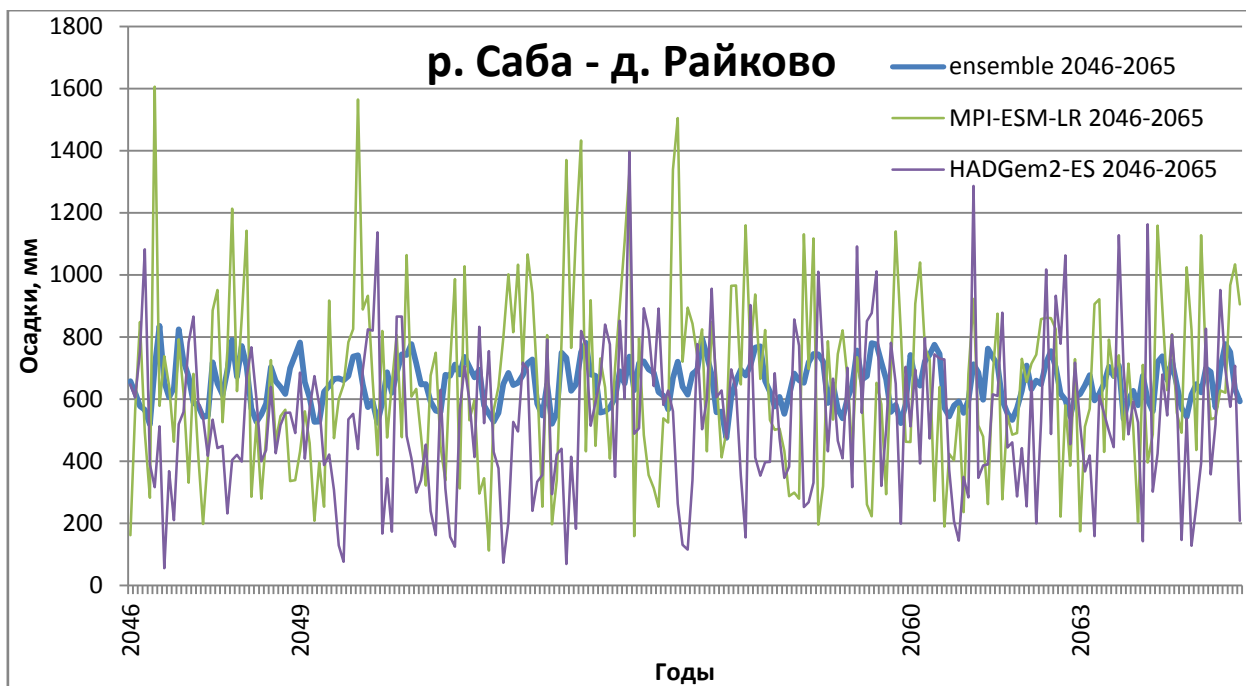


Рисунок А.15 – Годовые осадки за период 2046–2065 гг. (в), р. Саба – д. Райково.

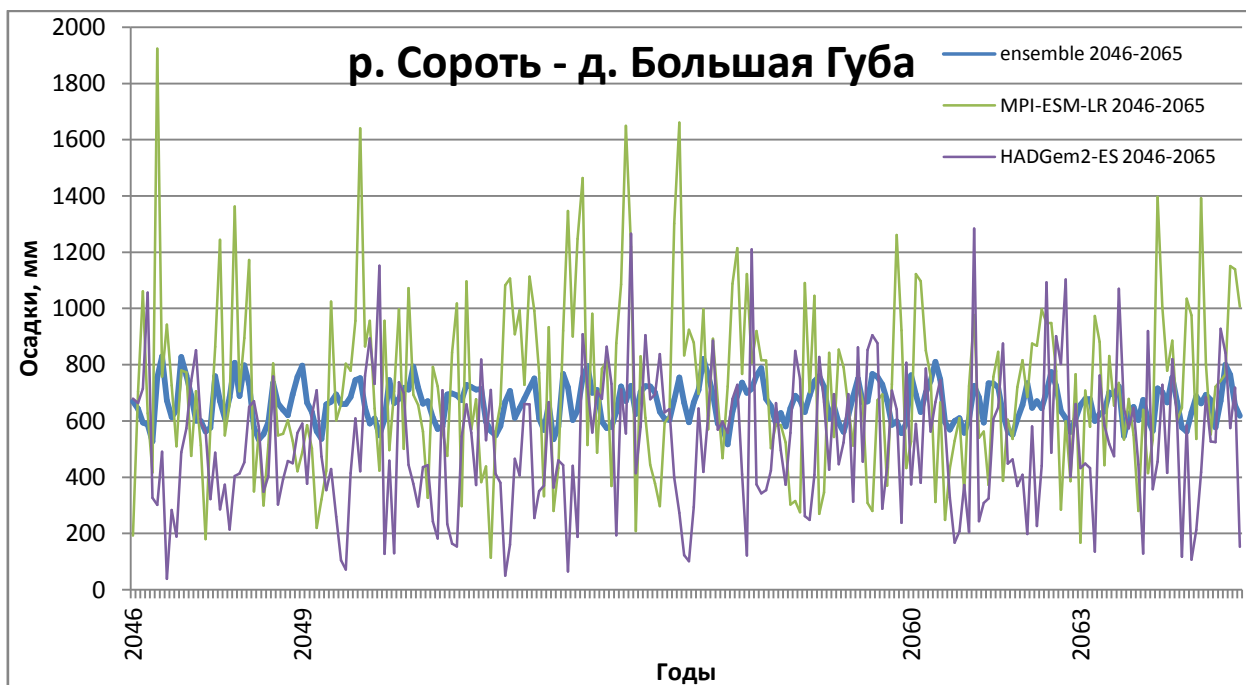


Рисунок А.16 – Годовые осадки за период 2046–2065 гг. (в), р. Сороть – д. Большая Губа.

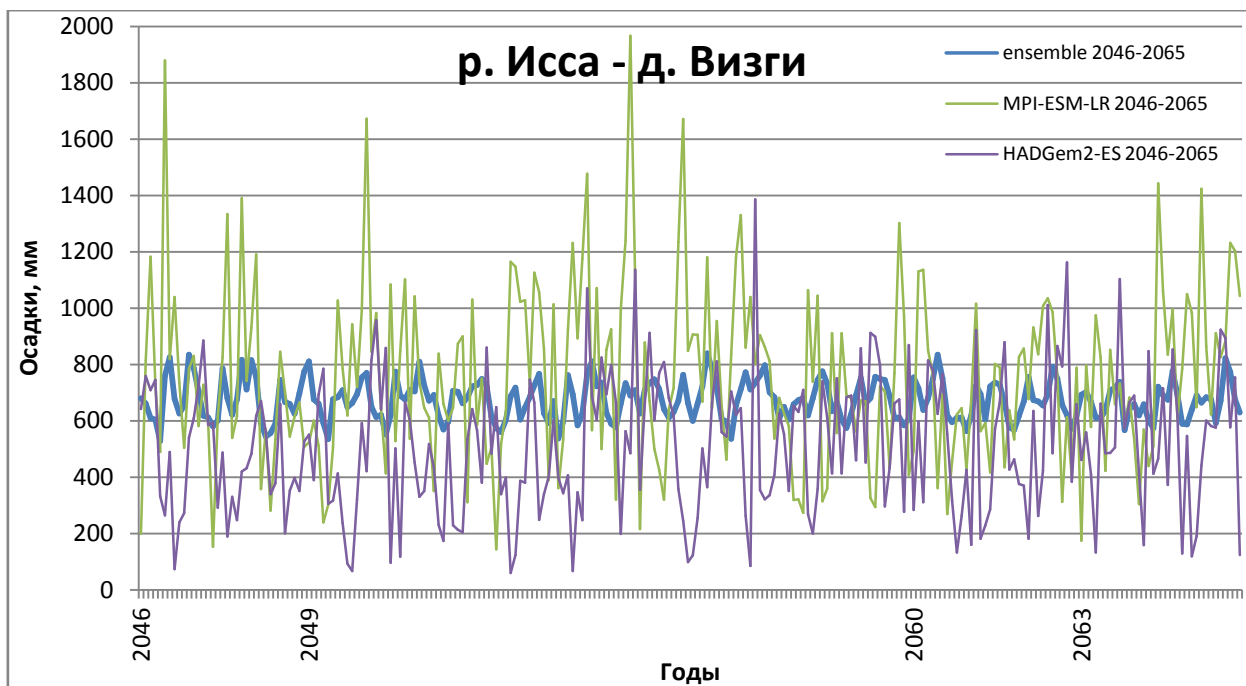


Рисунок А.17 – Годовые осадки за период 2046–2065 гг. (в), р. Исса – д. Визги.

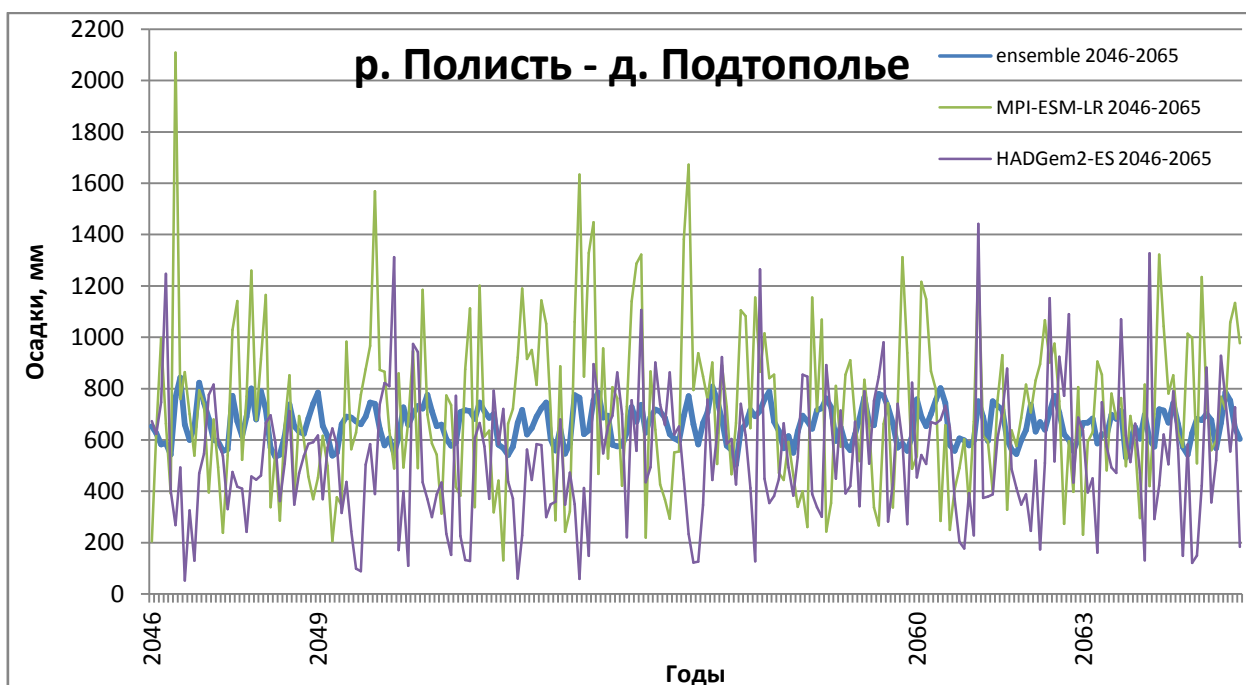


Рисунок А.18 – Годовые осадки за период 2046–2065 гг. (в), р. Полисть – д. Подтополье.

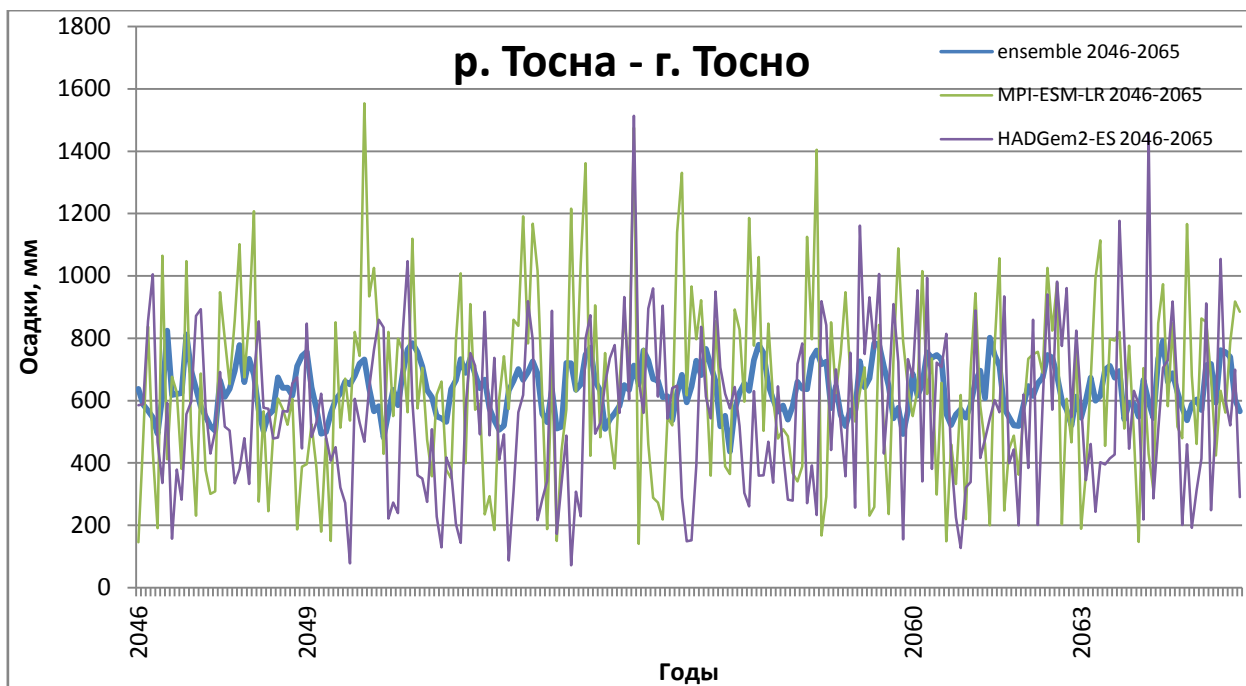


Рисунок А.19 – Годовые осадки за период 2046–2065 гг. (в), р. Тосна – г. Тосно.

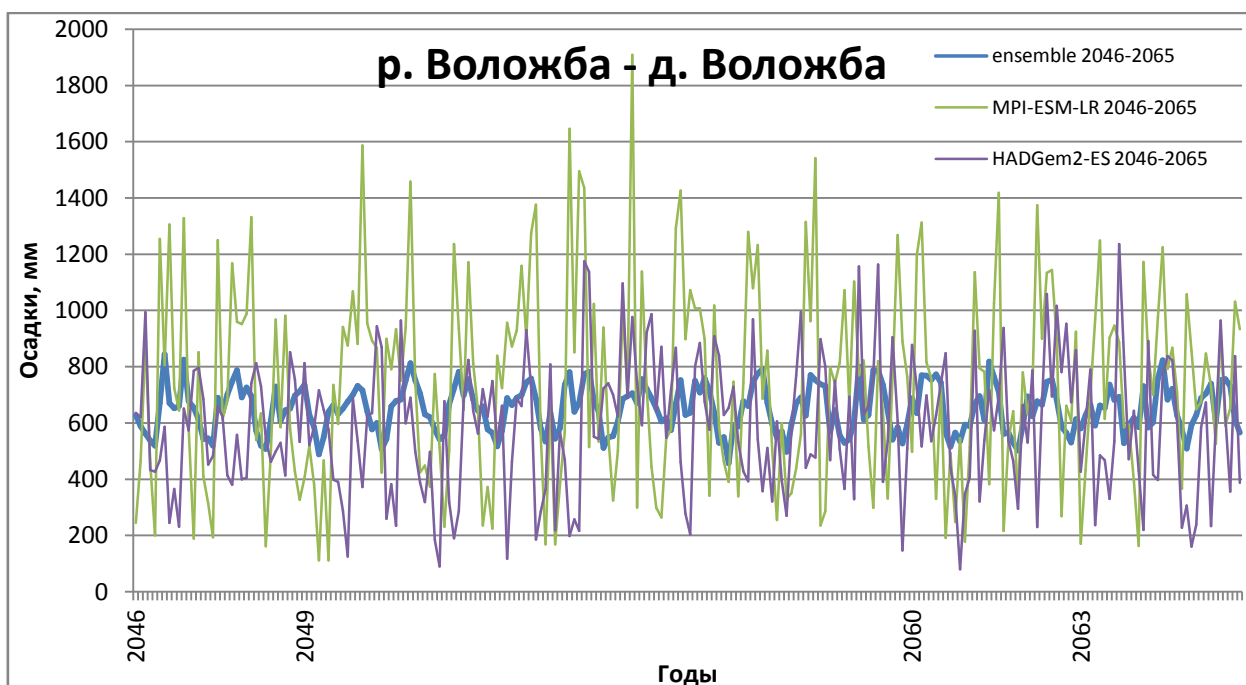


Рисунок А.20 – Годовые осадки за период 2046–2065 гг. (в), р. Воложба – д. Воложба.

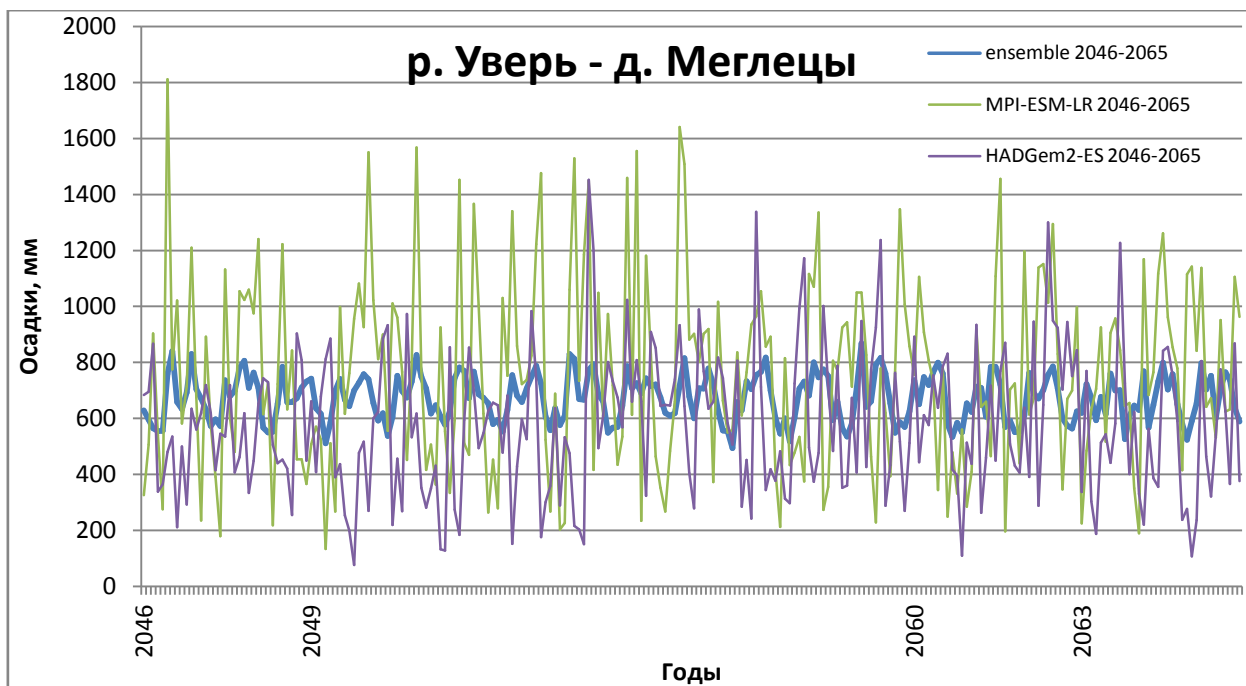


Рисунок А.21 – Годовые осадки за период 2046–2065 гг. (в), р. Уверь – д. Меглецы.

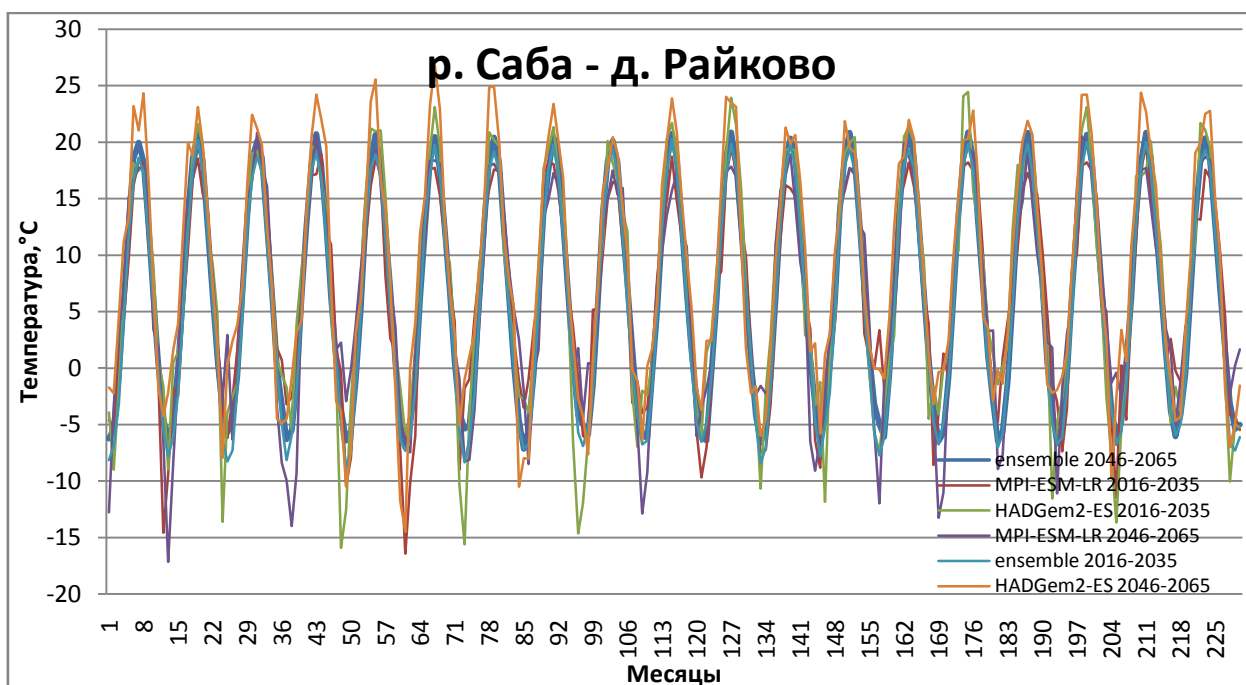


Рисунок А.22 – Месячная температура (з), р. Саба – д. Райково.

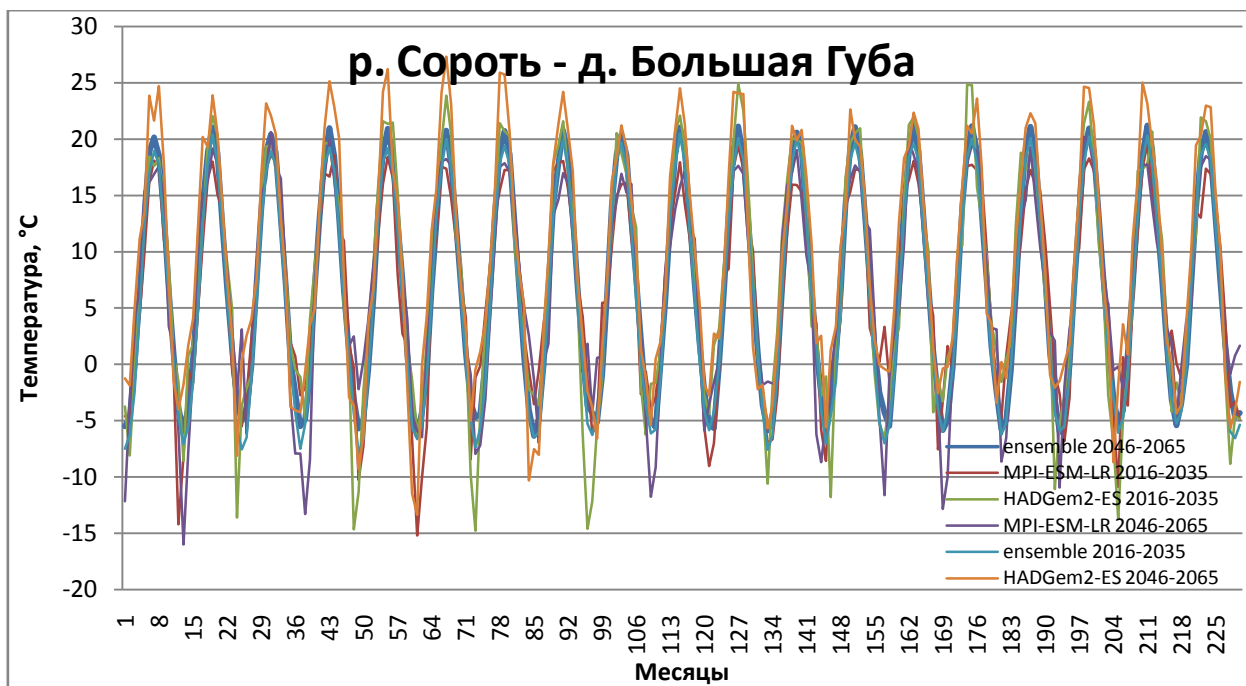


Рисунок А.23 – Месячная температура (°C), р. Сорочь – д. Большая Губа.

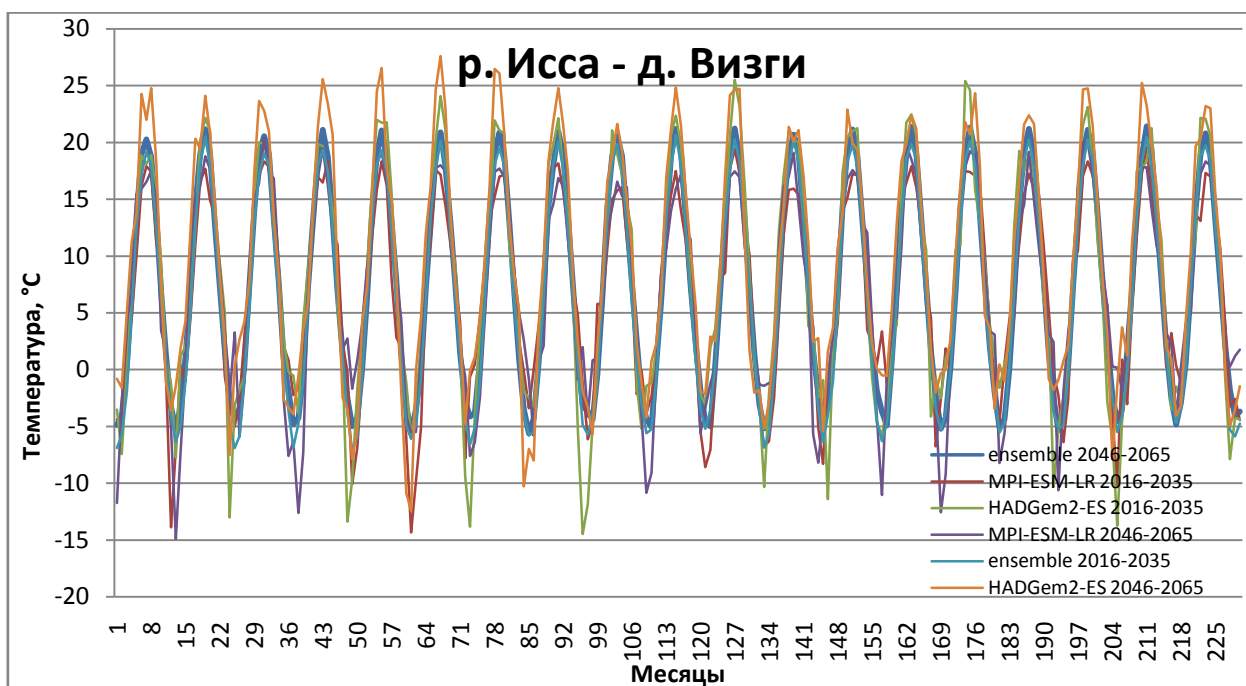


Рисунок А.24 – Месячная температура (°C), р. Исса – д. Визги.

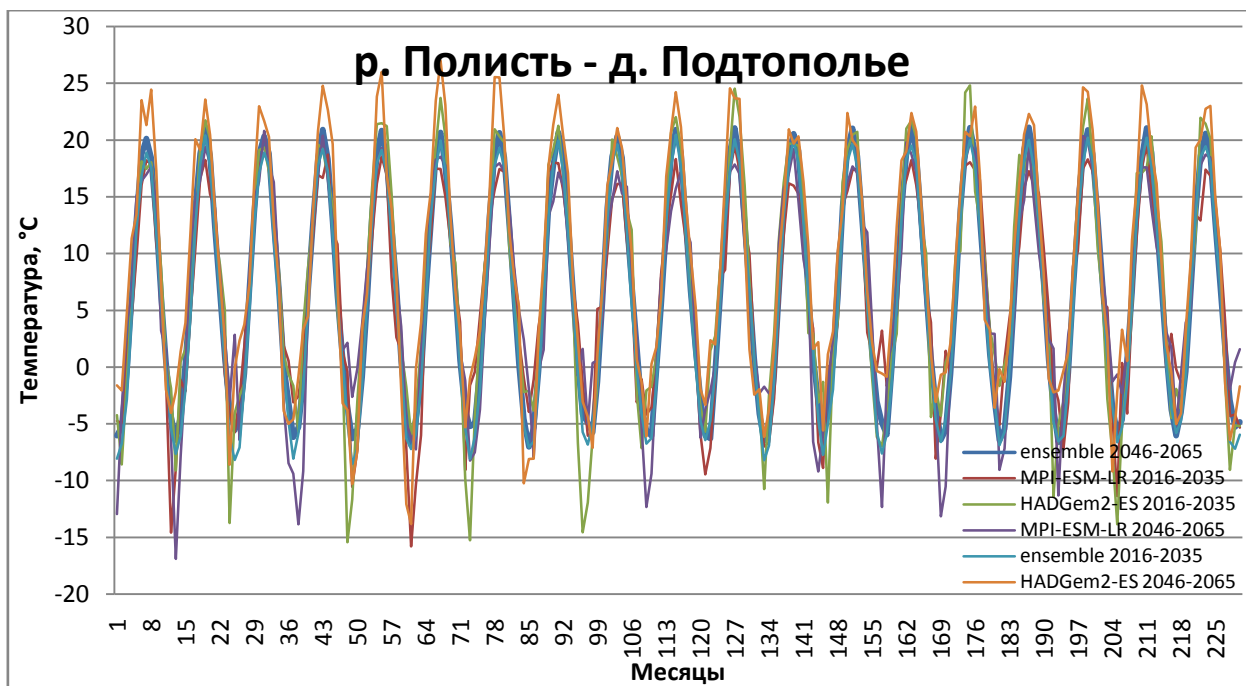


Рисунок А.25 – Месячная температура (°C), р. Полисть – д. Подтополье.

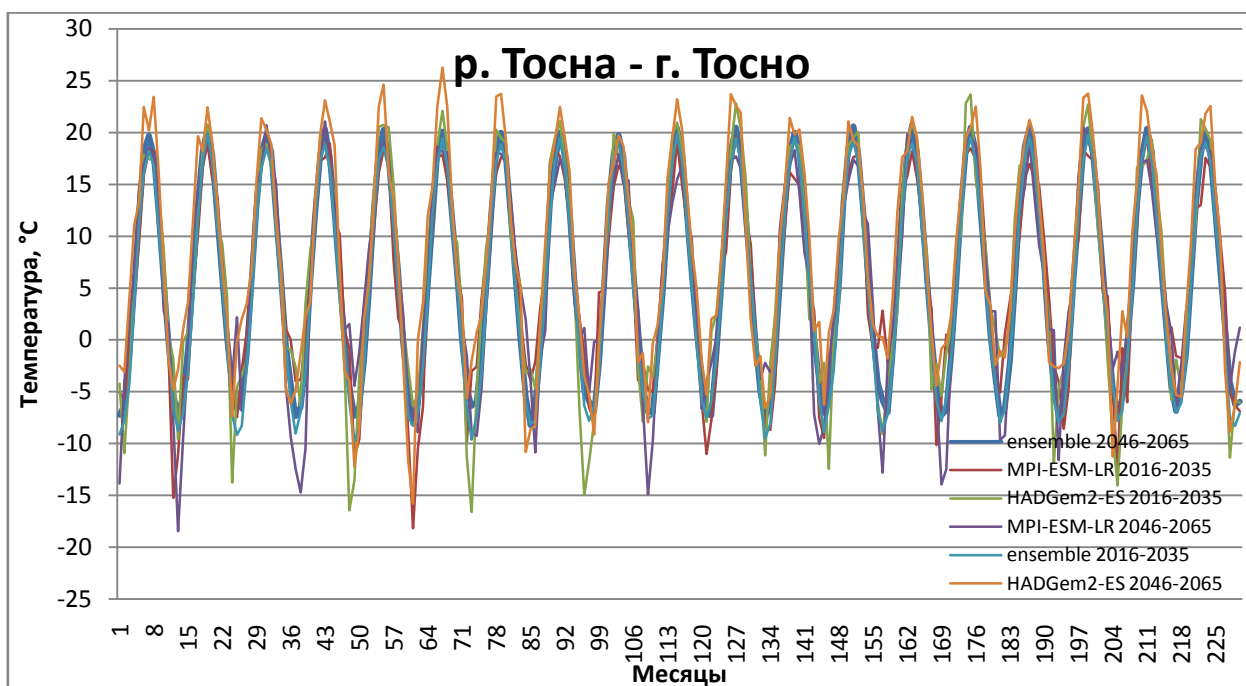


Рисунок А.26 – Месячная температура (°C), р. Тосна – г. Тосно.

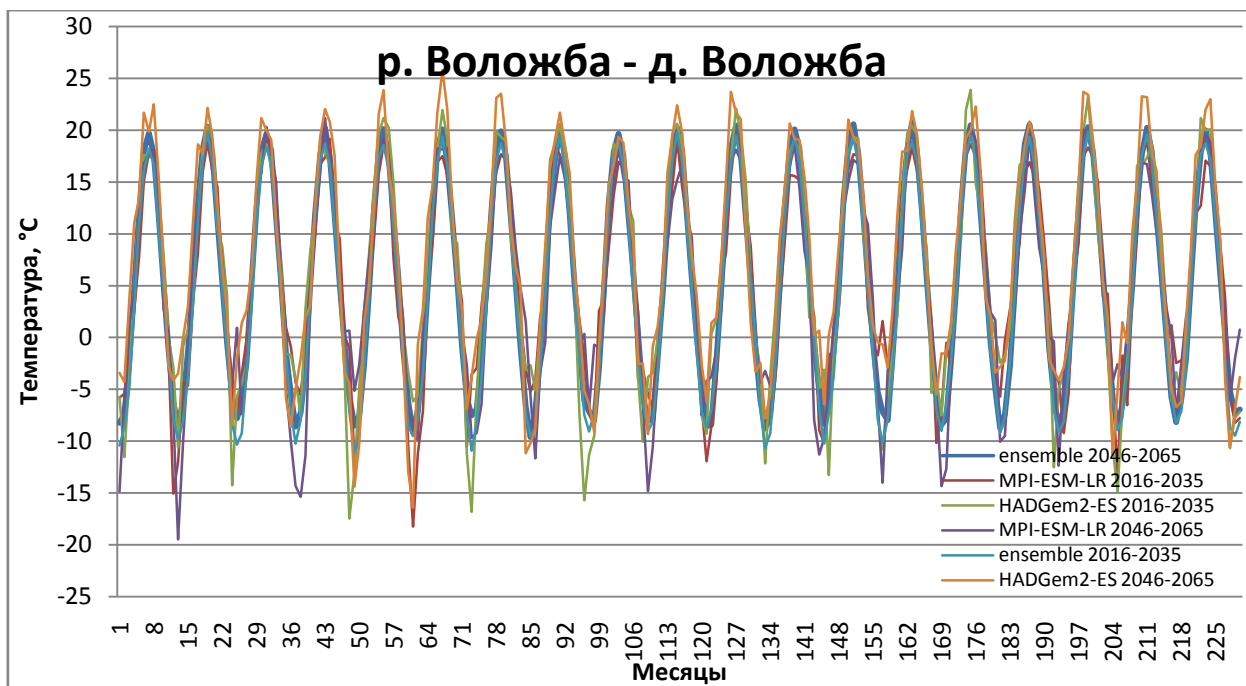


Рисунок А.27 – Месячная температура (°C), р. Воложба – д. Воложба.

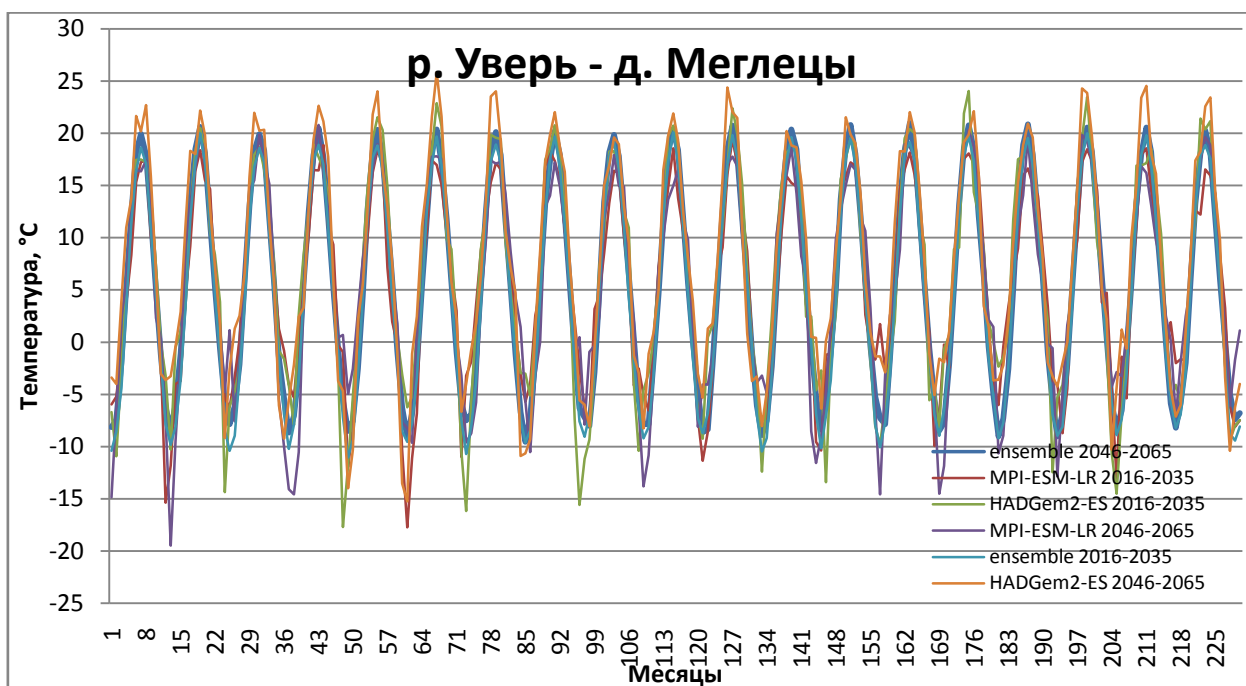


Рисунок А.28 – Месячная температура (°C), р. Уверь – д. Меглецы.

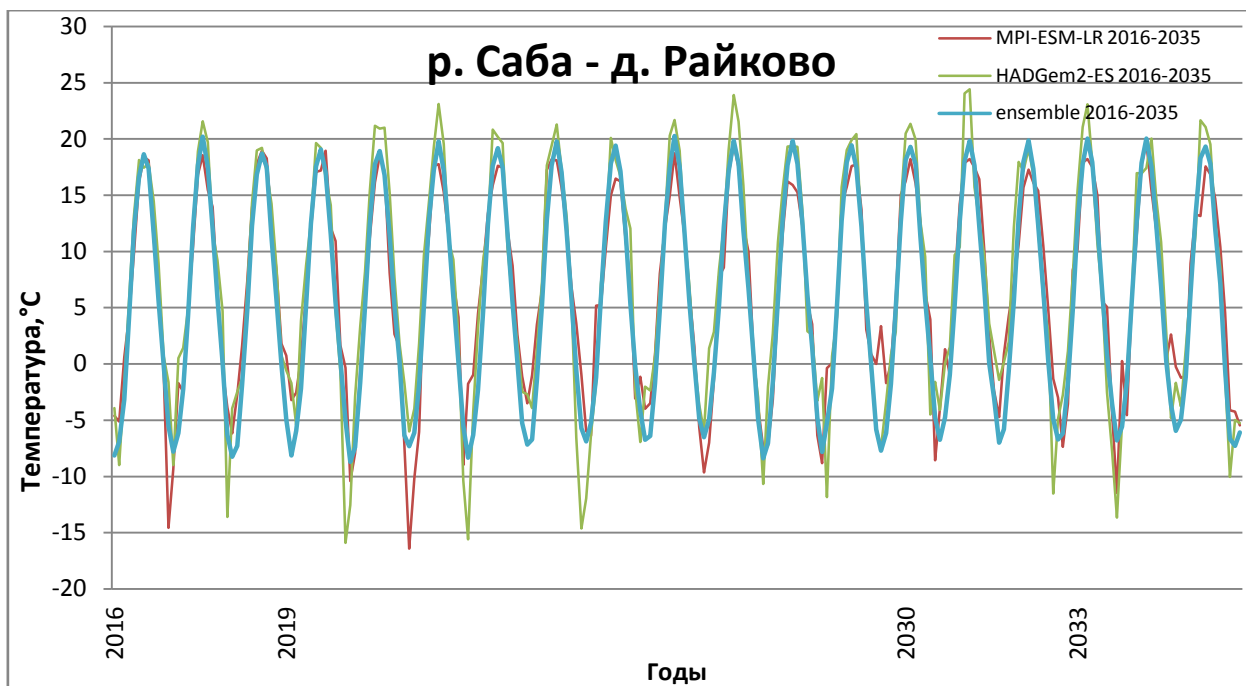


Рисунок А.29 – Годовая температура за период 2016–2035 гг. (°), р. Саба – д. Райково.

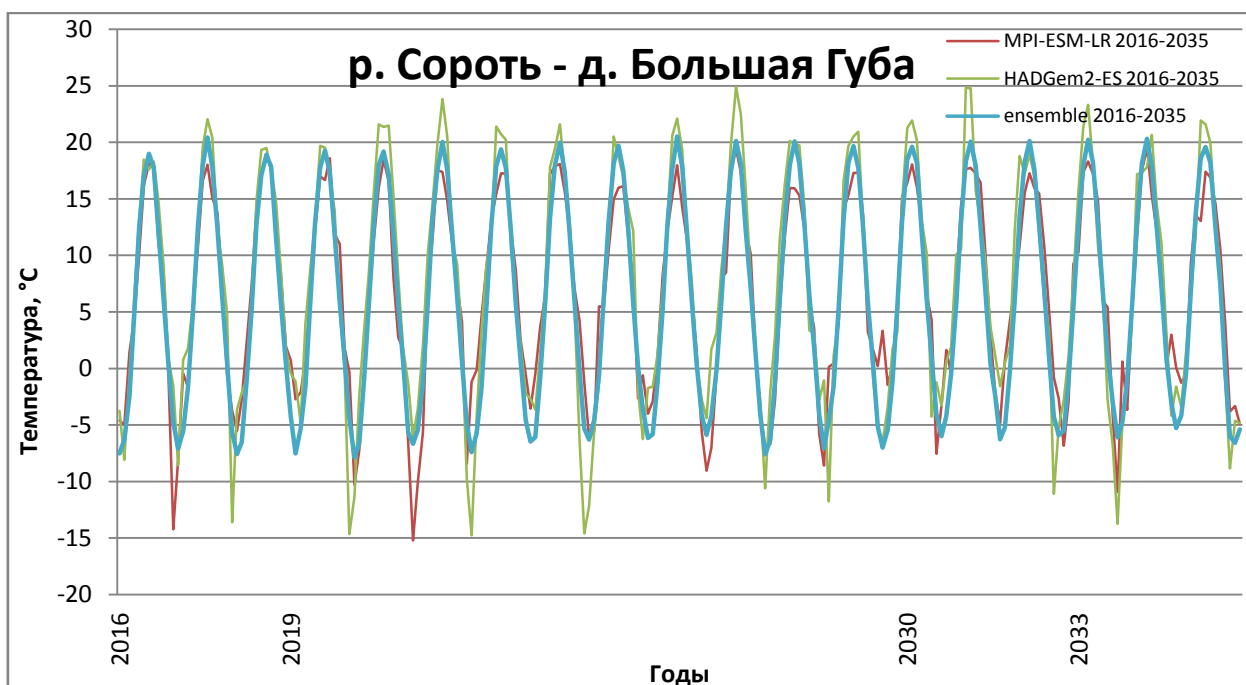


Рисунок А.30 – Годовая температура за период 2016–2035 гг. (°), р. Сороть – д. Большая Губа.

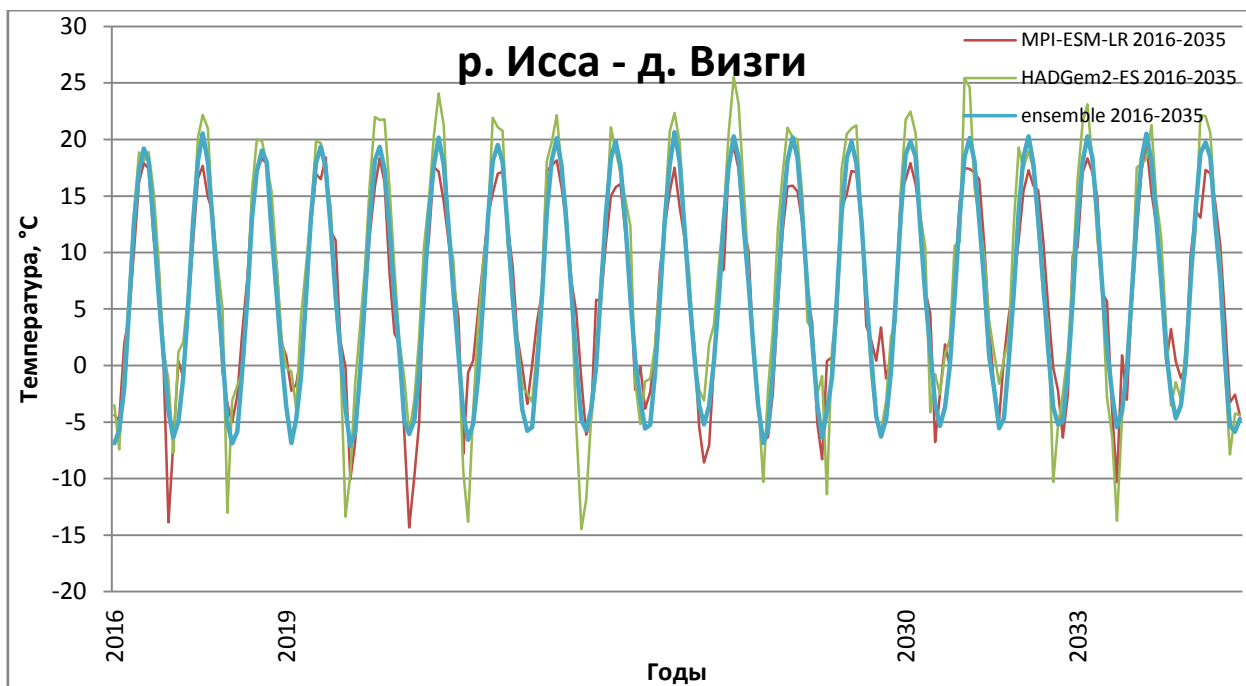


Рисунок А.31 – Годовая температура за период 2016–2035 гг. (°), р. Исса – д. Визги.

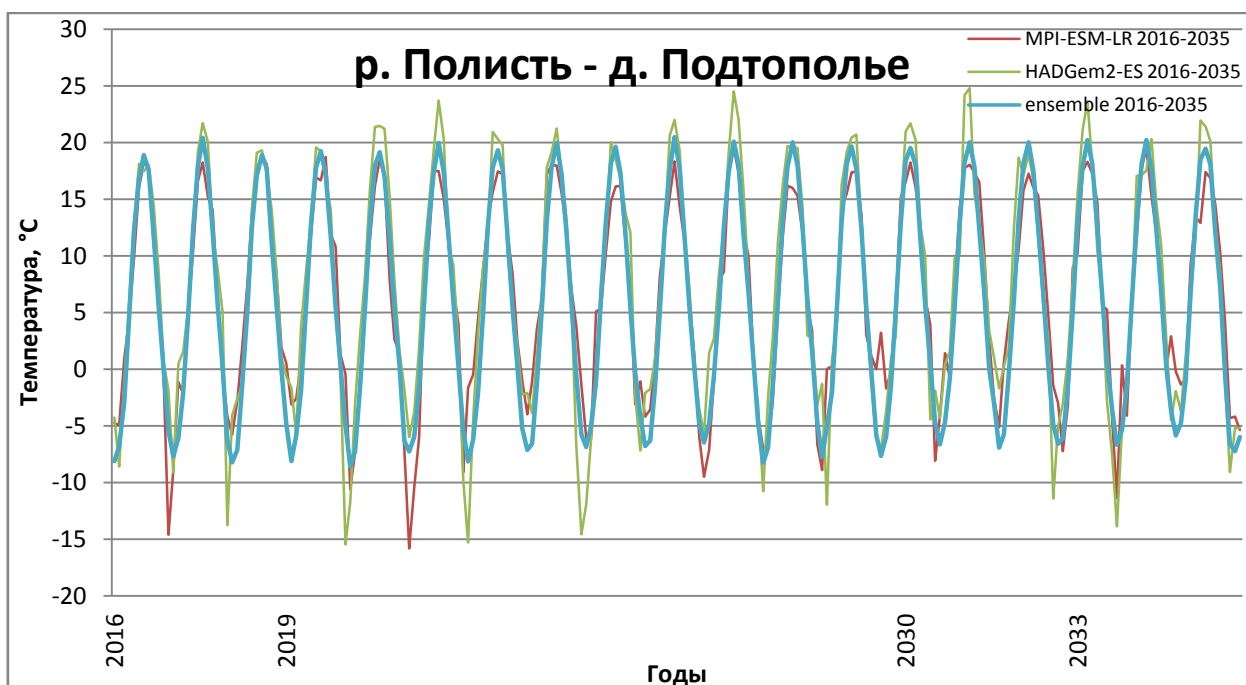


Рисунок А.32 – Годовая температура за период 2016–2035 гг. (°), р. Полисть – д. Подтополье.

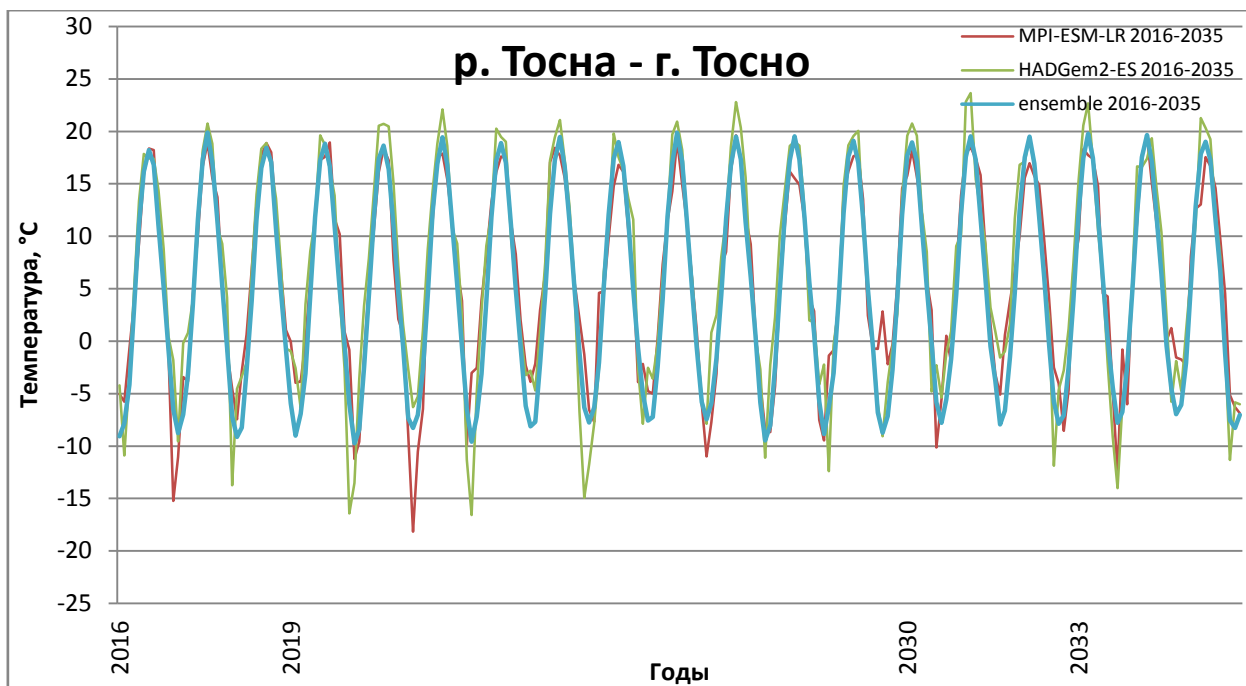


Рисунок А.33 – Годовая температура за период 2016–2035 гг. (о), р.
Тосна – г. Тосно.

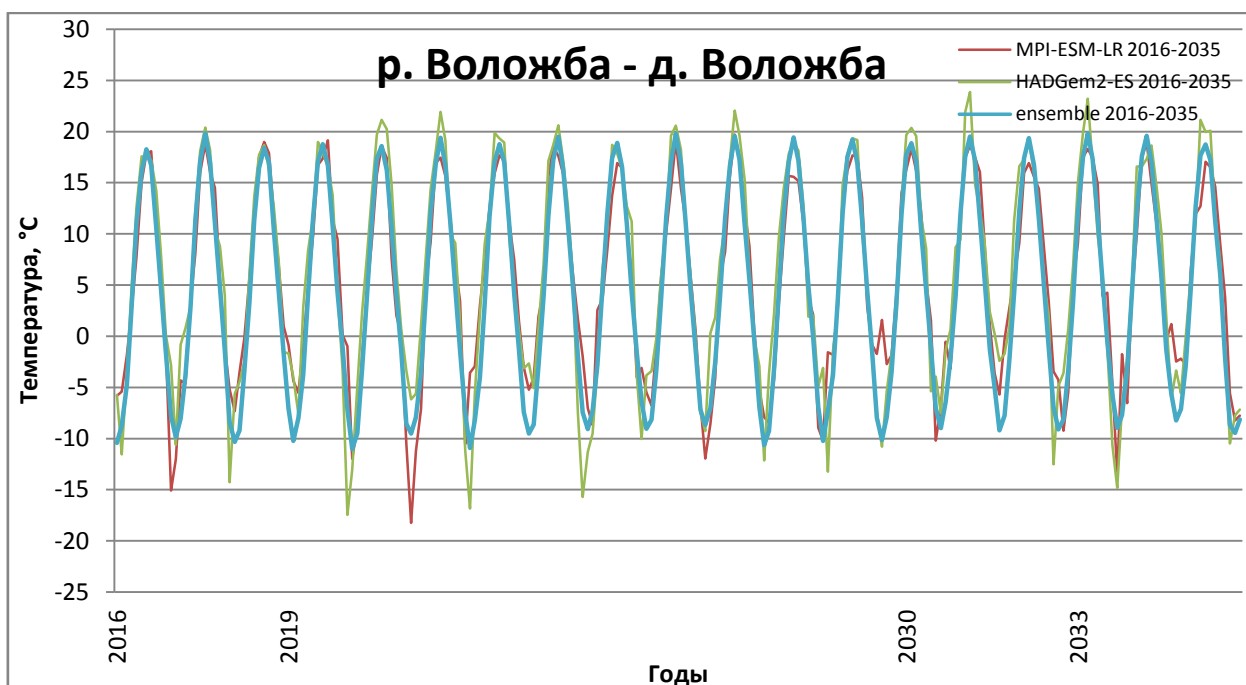


Рисунок А.34 – Годовая температура за период 2016–2035 гг. (о), р.
Воложба – д. Воложба.

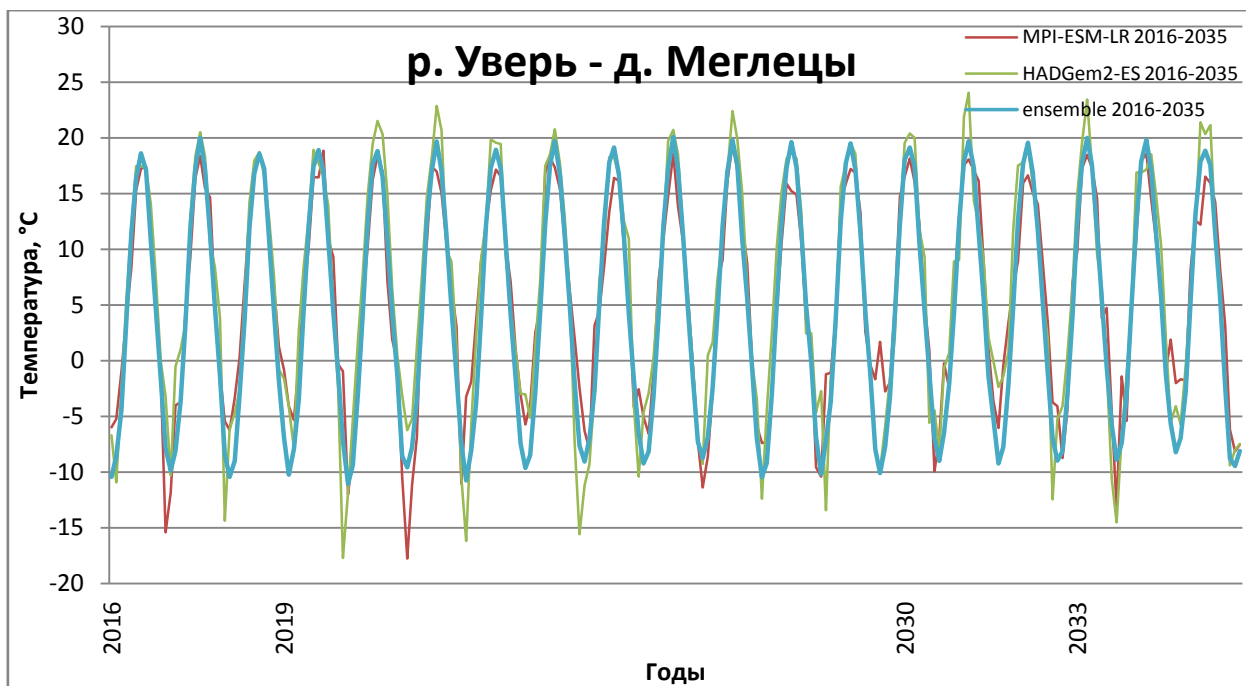


Рисунок А.35 – Годовая температура за период 2016–2035 гг. (д), р. Уверь – д. Меглецы.

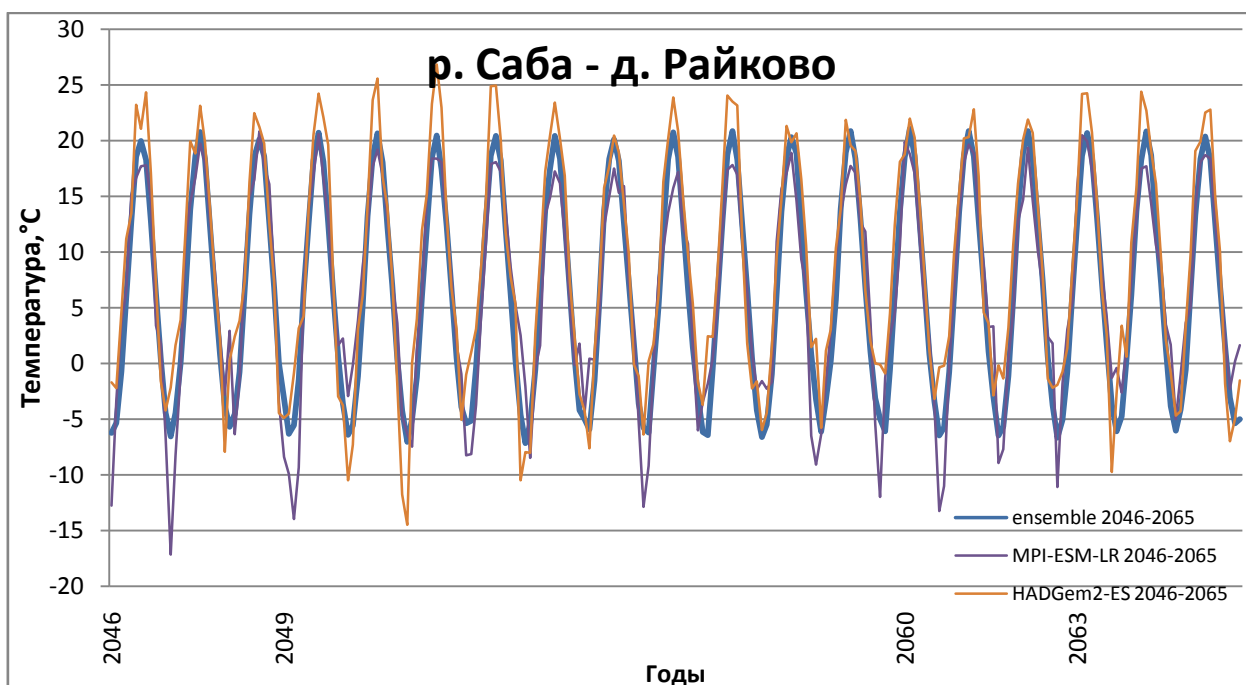


Рисунок А.36 – Годовая температура за период 2046–2065 гг. (е), р. Саба – д. Райково.

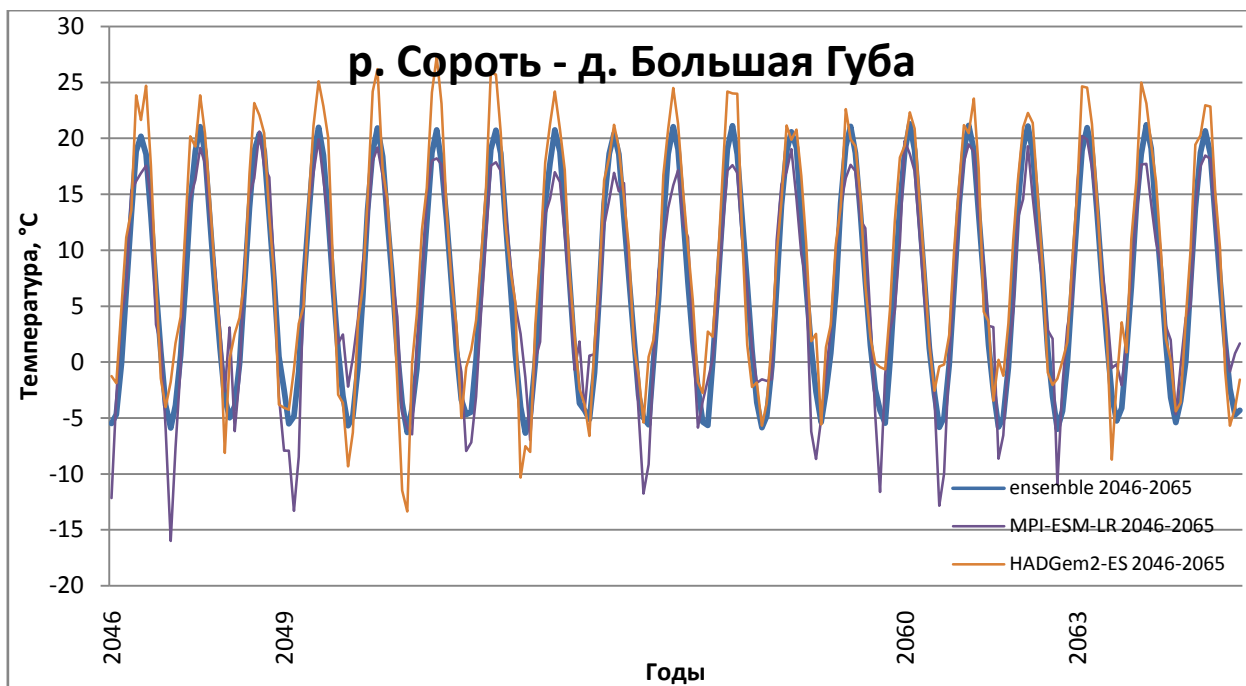


Рисунок А.37 – Годовая температура за период 2046–2065 гг. (е), р. Сороть – д. Большая Губа.

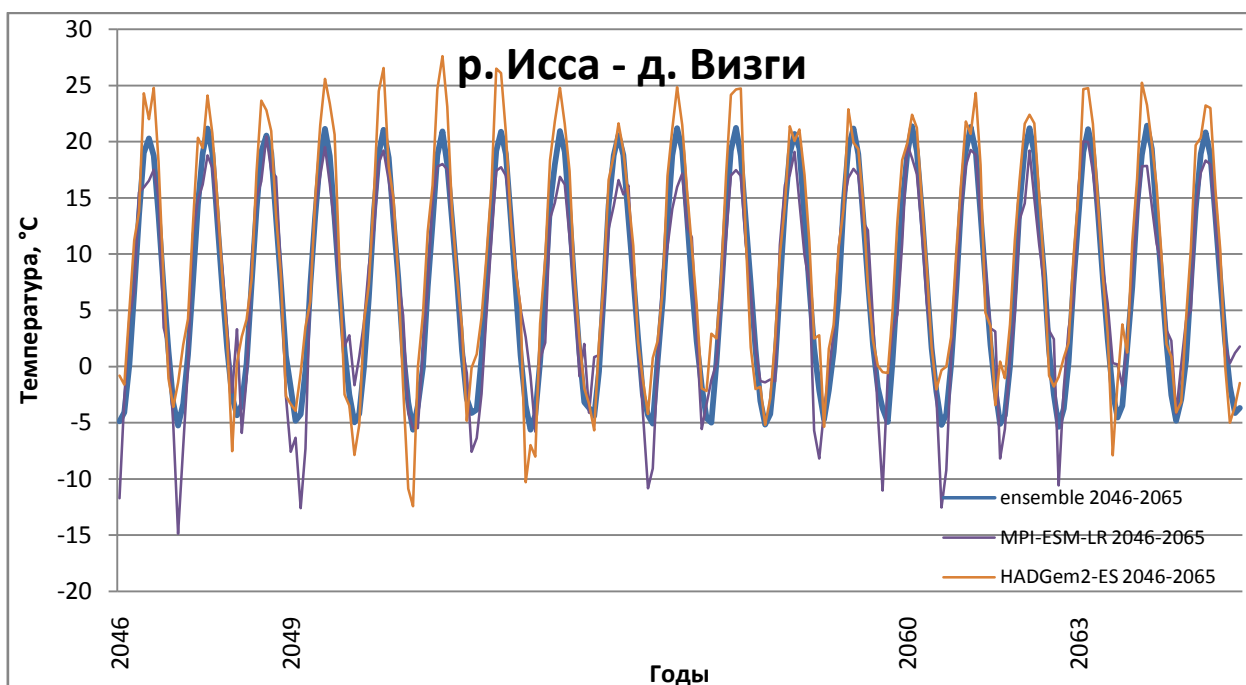


Рисунок А.38 – Годовая температура за период 2046–2065 гг. (е), р. Исса – д. Визги.

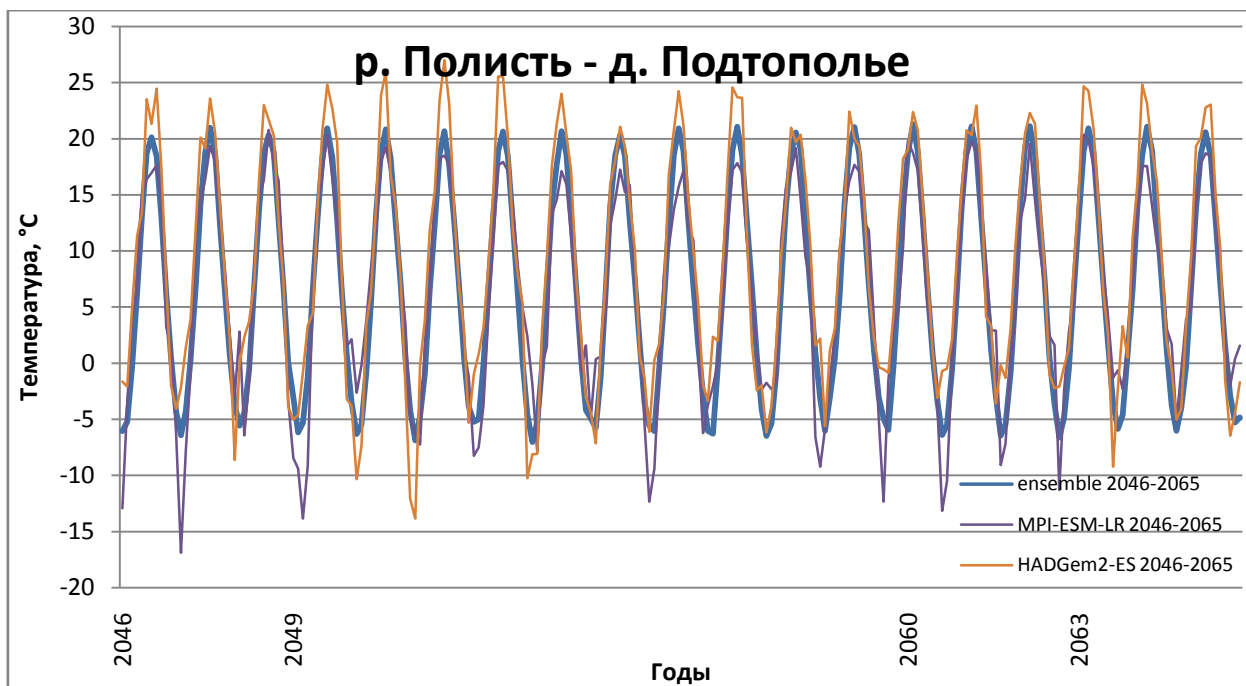


Рисунок А.39 – Годовая температура за период 2046–2065 гг. (е), р. Полисть – д. Подтополье.

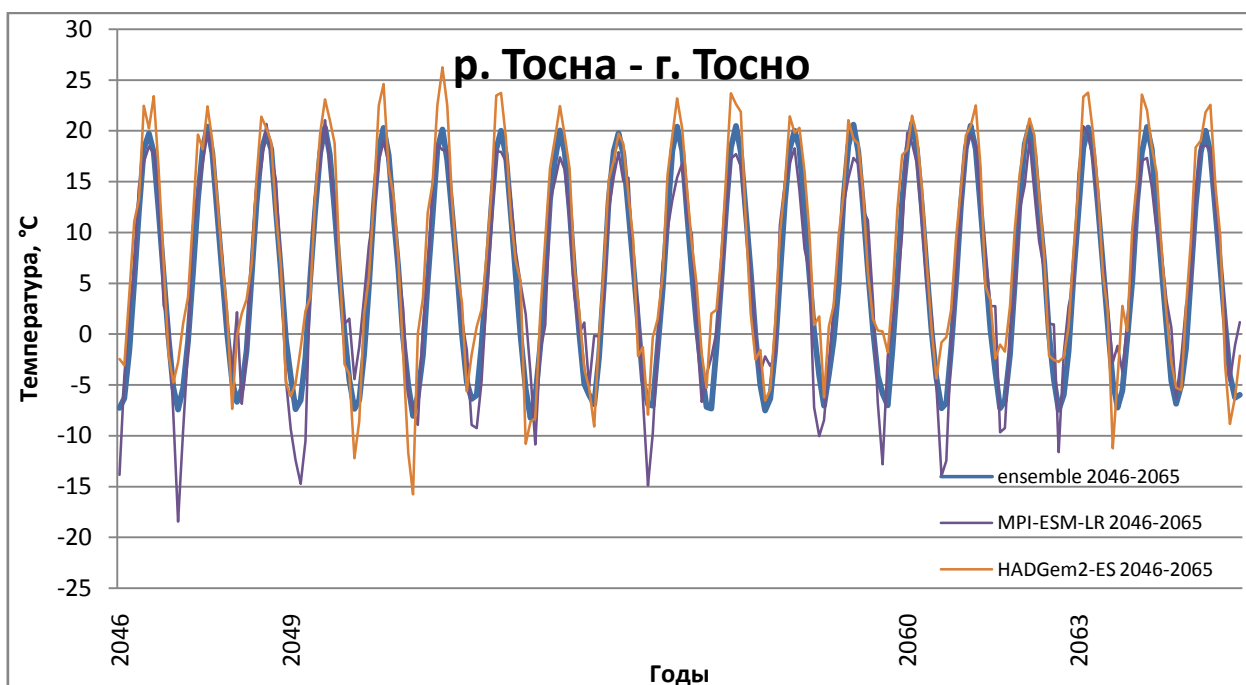


Рисунок А.40 – Годовая температура за период 2046–2065 гг. (е), р. Тосна – г. Тосно.

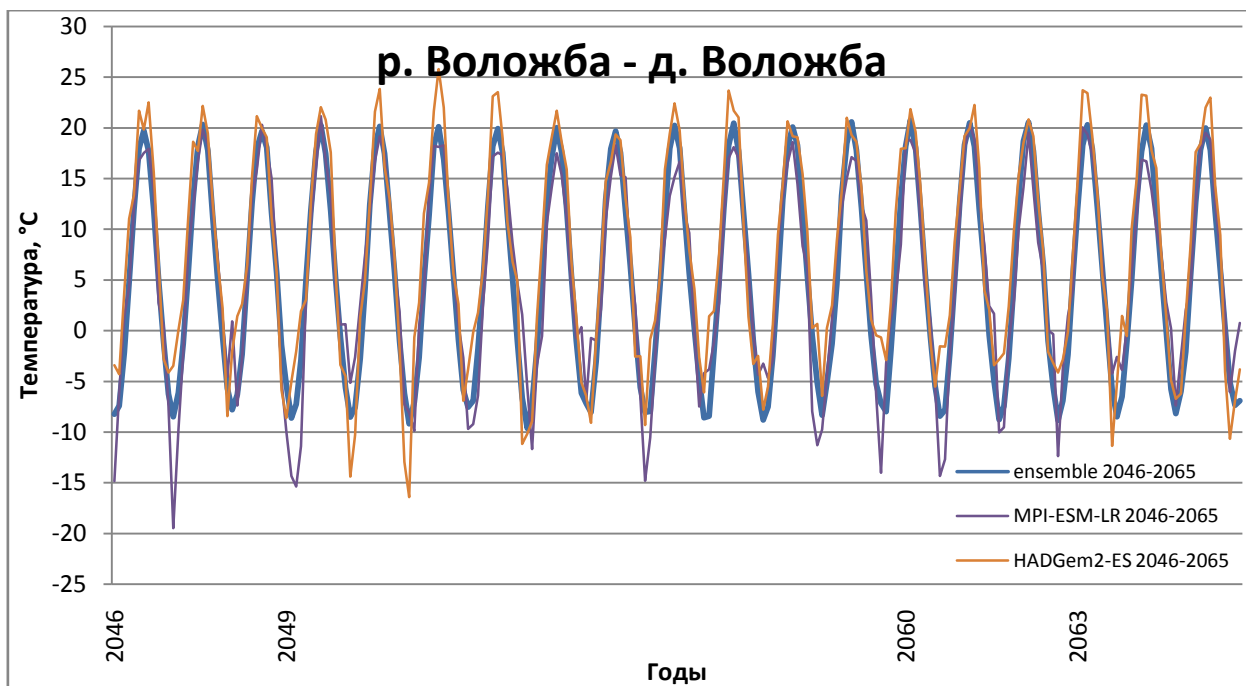


Рисунок А.41 – Годовая температура за период 2046–2065 гг. (е), р. Воложба – д. Воложба.

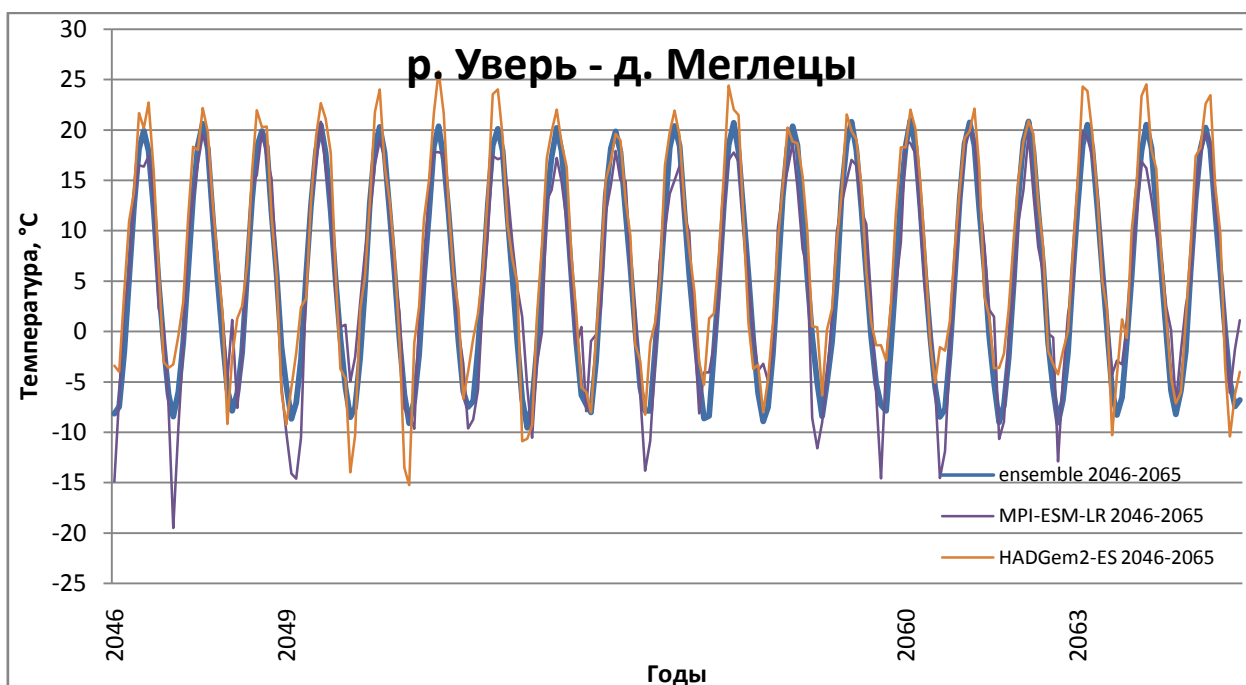


Рисунок А.42 – Годовая температура за период 2046–2065 гг. (е), р. Уверь – д. Меглецы.

Приложение Б – Карты-схемы погрешностей норм стока и коэффициентов вариации по различным моделям за периоды 2016–2035 гг. и 2046–2065 гг.

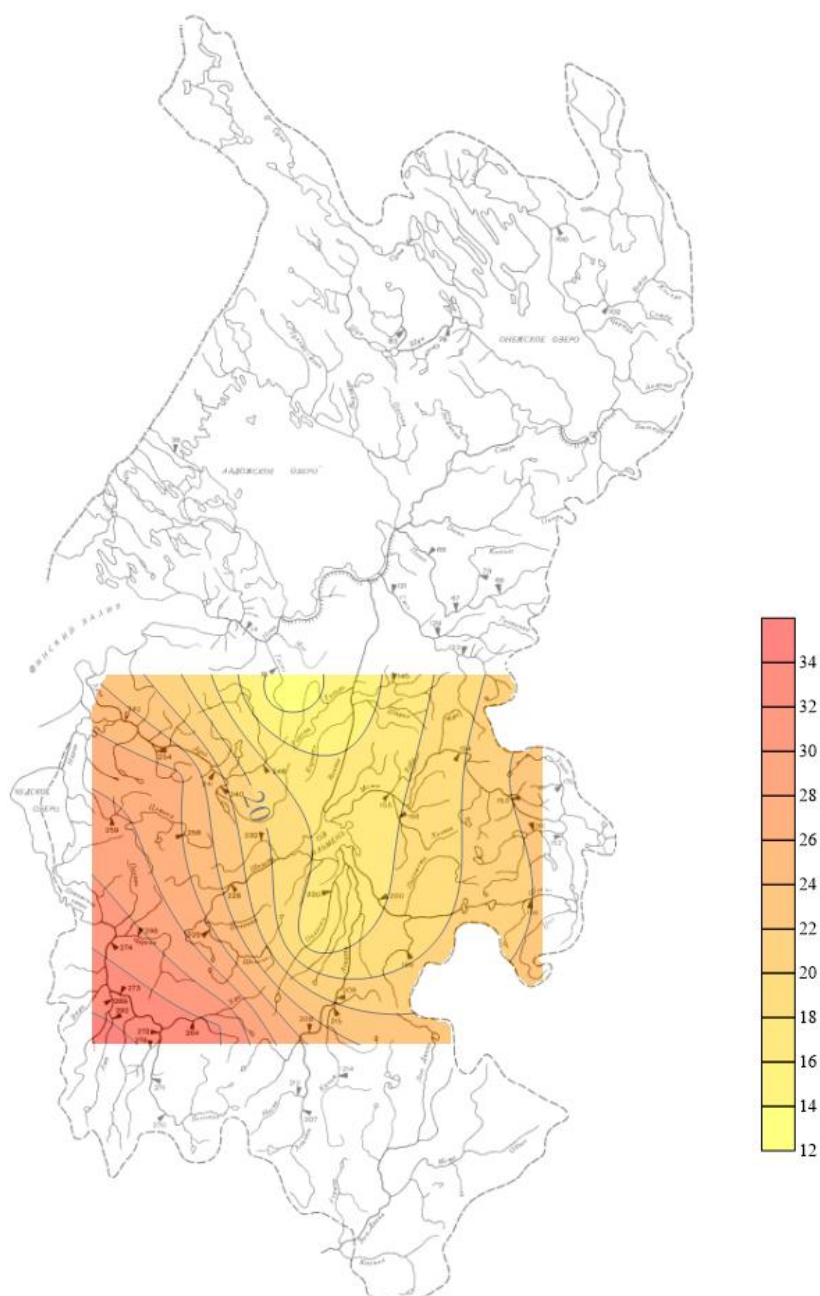


Рисунок Б.1 – Карта-схема погрешности нормы стока за период 2016–2035 гг. по данным модели *HadGEM2-ES*.

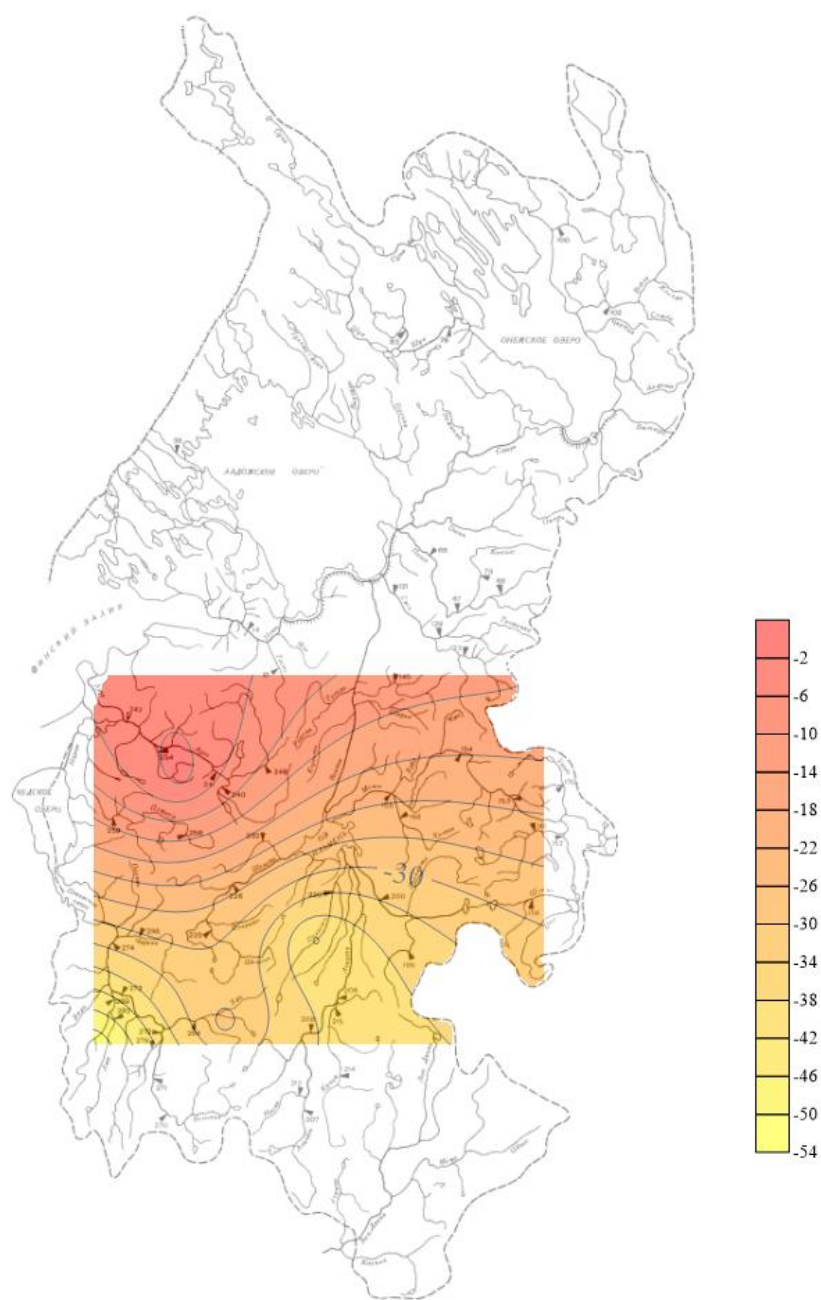


Рисунок Б.2 – Карта-схема погрешности нормы стока за период 2016–2035 гг. по данным модели *MPI-ESM-LR*.

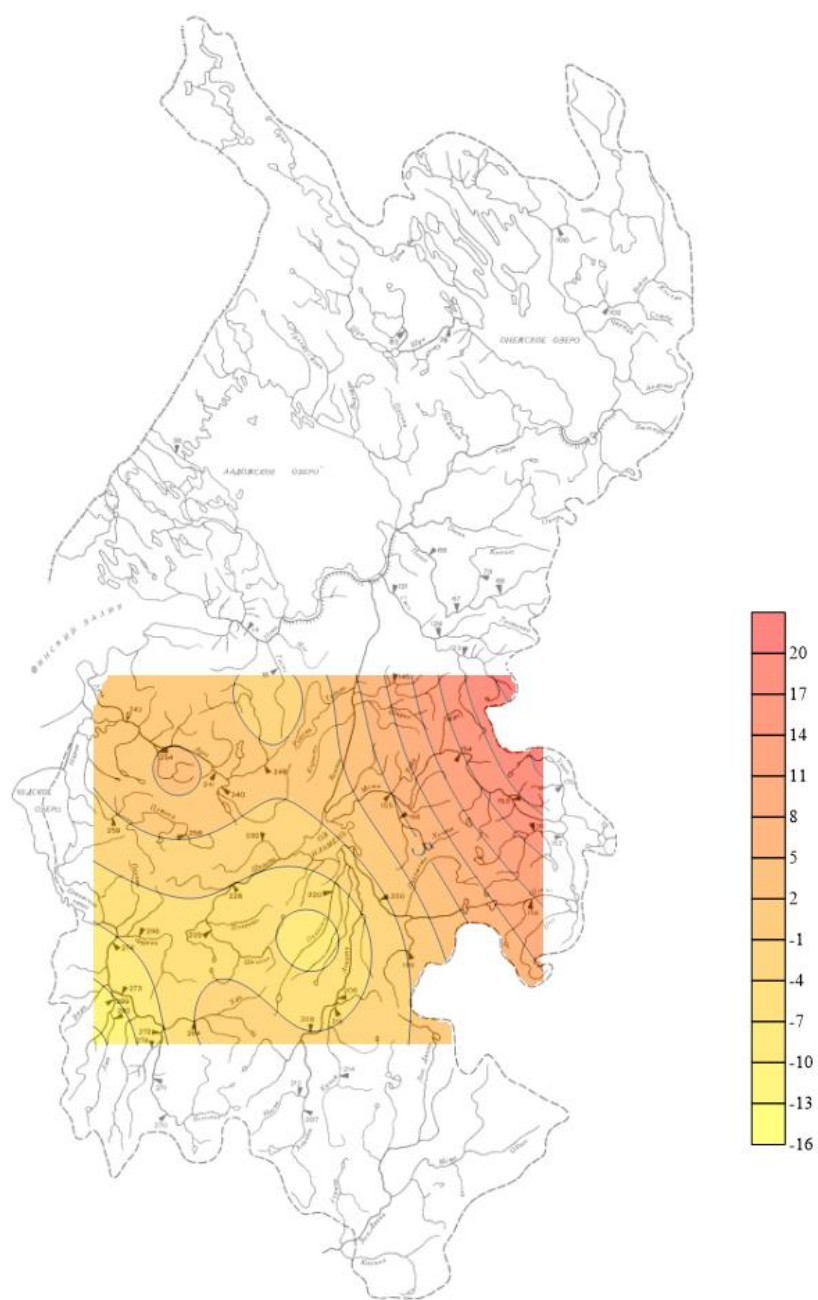


Рисунок Б.3 – Карта-схема погрешности нормы стока за период 2016–2035 гг. по данным ансамбля моделей *ensemble*.

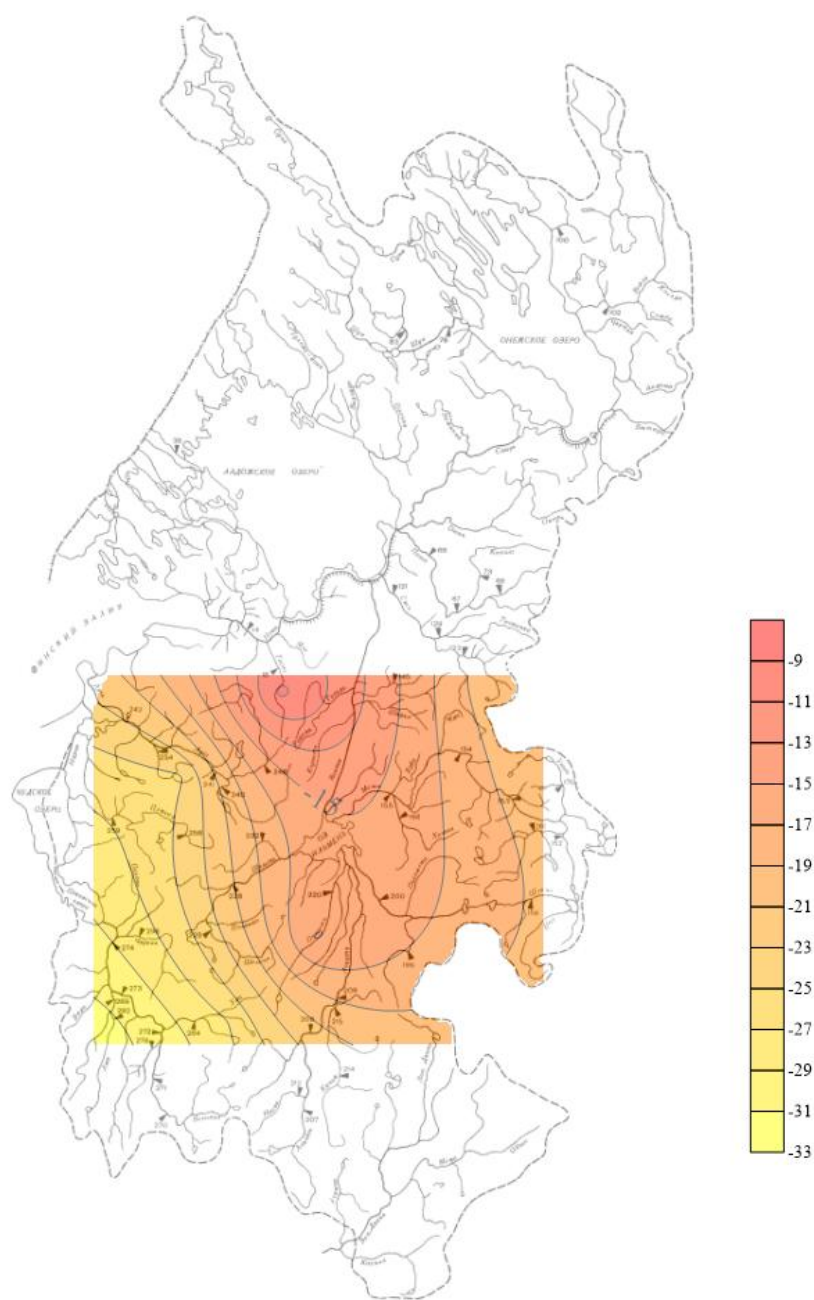


Рисунок Б.4 – Карта-схема погрешности коэффициента вариации за период 2016–2035 гг. по данным модели *HadGEM2-ES*.

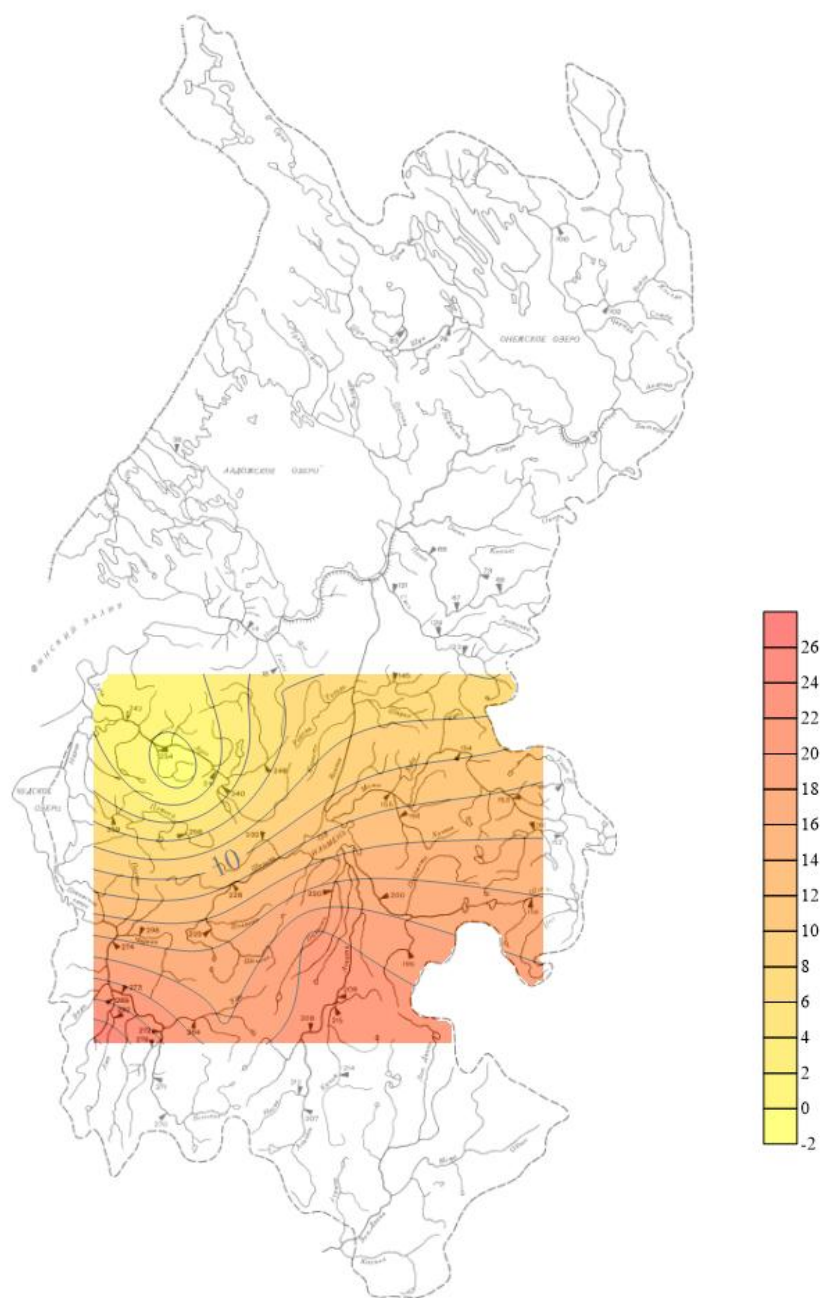


Рисунок Б.5 – Карта-схема погрешности коэффициента вариации за период 2016–2035 гг. по данным модели *MPI-ESM-LR*.

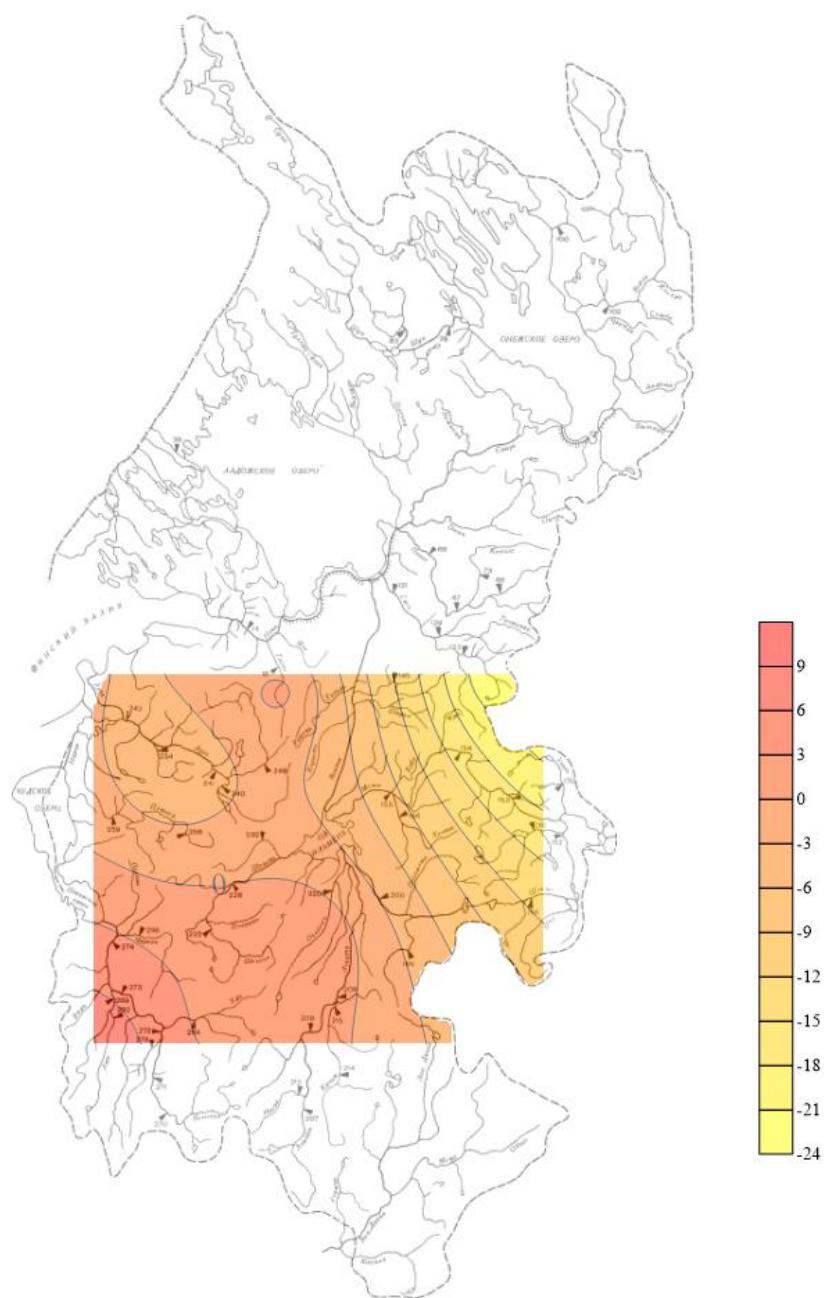


Рисунок Б.6 – Карта-схема погрешности коэффициента вариации за период 2016–2035 гг. по данным ансамбля моделей *ensemble*.

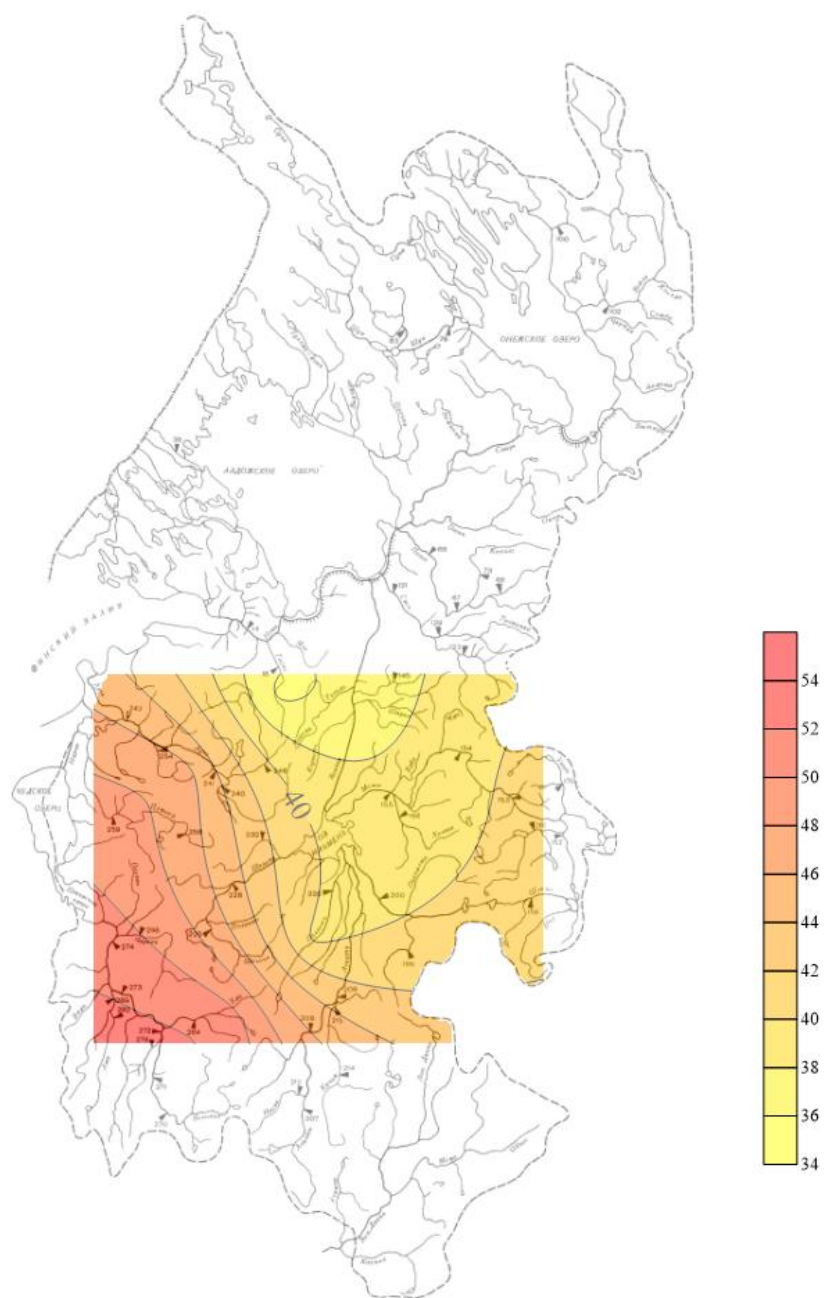


Рисунок Б.7 – Карта-схема погрешности нормы стока за период 2046–2065 гг. по данным модели *HadGEM2-ES*.

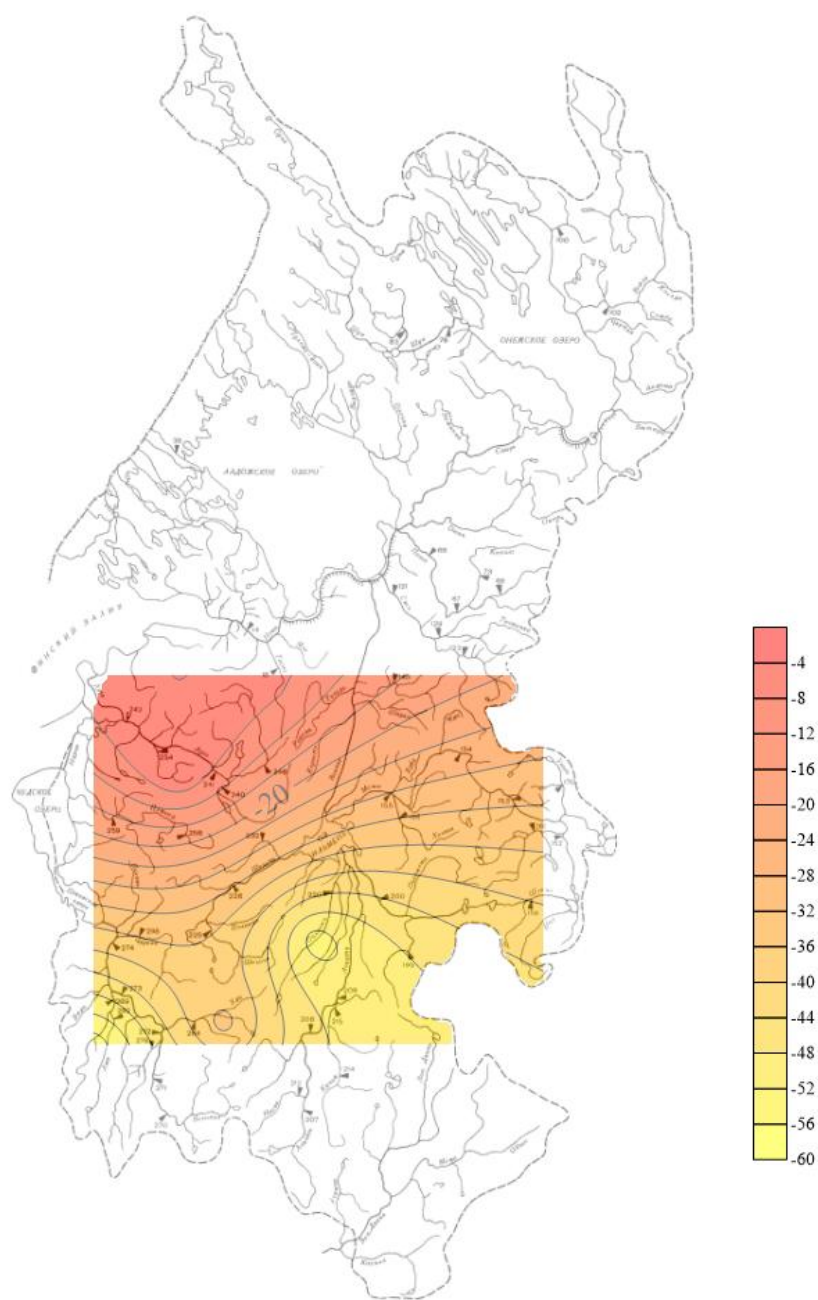


Рисунок Б.8 – Карта-схема погрешности нормы стока за период 2046–2065 гг. по данным модели *MPI-ESM-LR*.

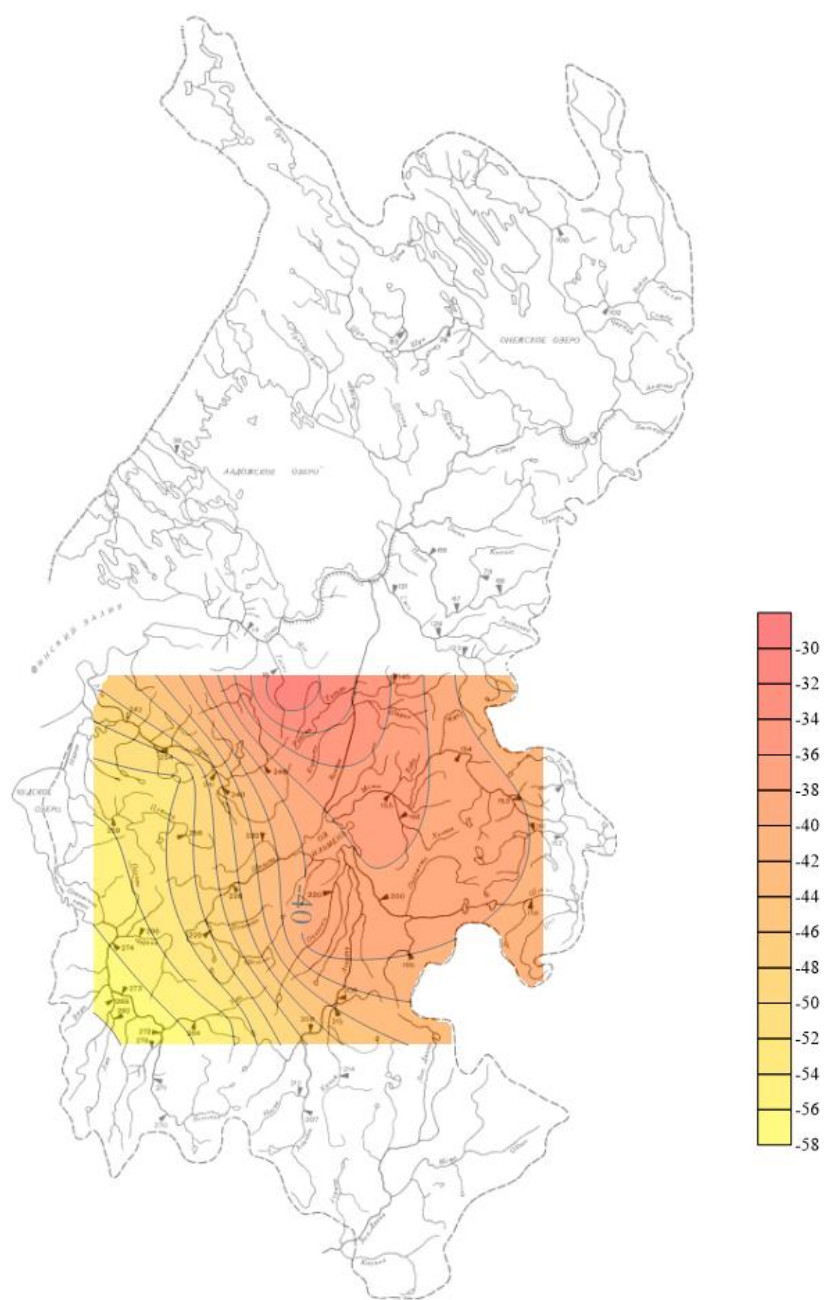


Рисунок Б.10 – Карта-схема погрешности коэффициента вариации за период 2046–2065 гг. по данным модели *HadGEM2-ES*.

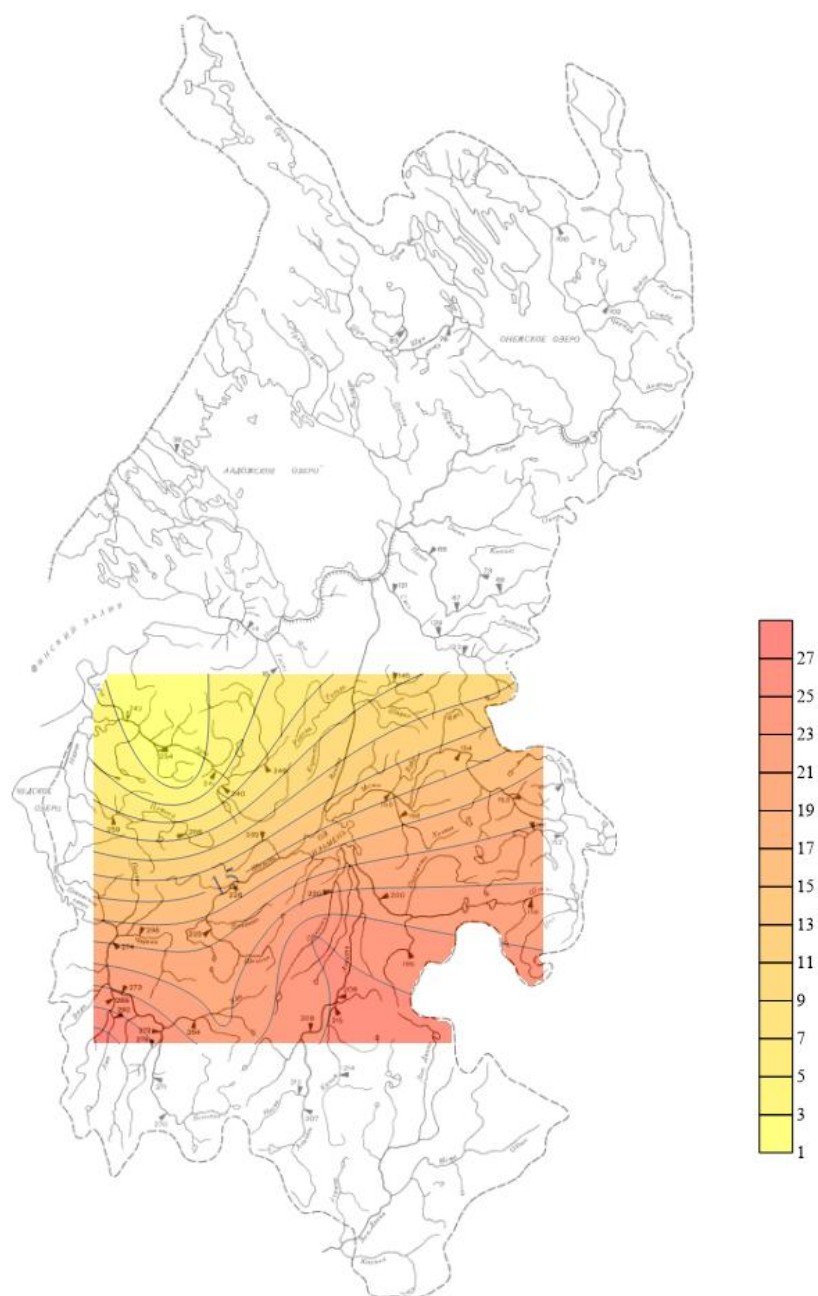


Рисунок Б.11 – Карта-схема погрешности коэффициента вариации за период 2046–2065 гг. по данным модели *MPI-ESM-LR*.

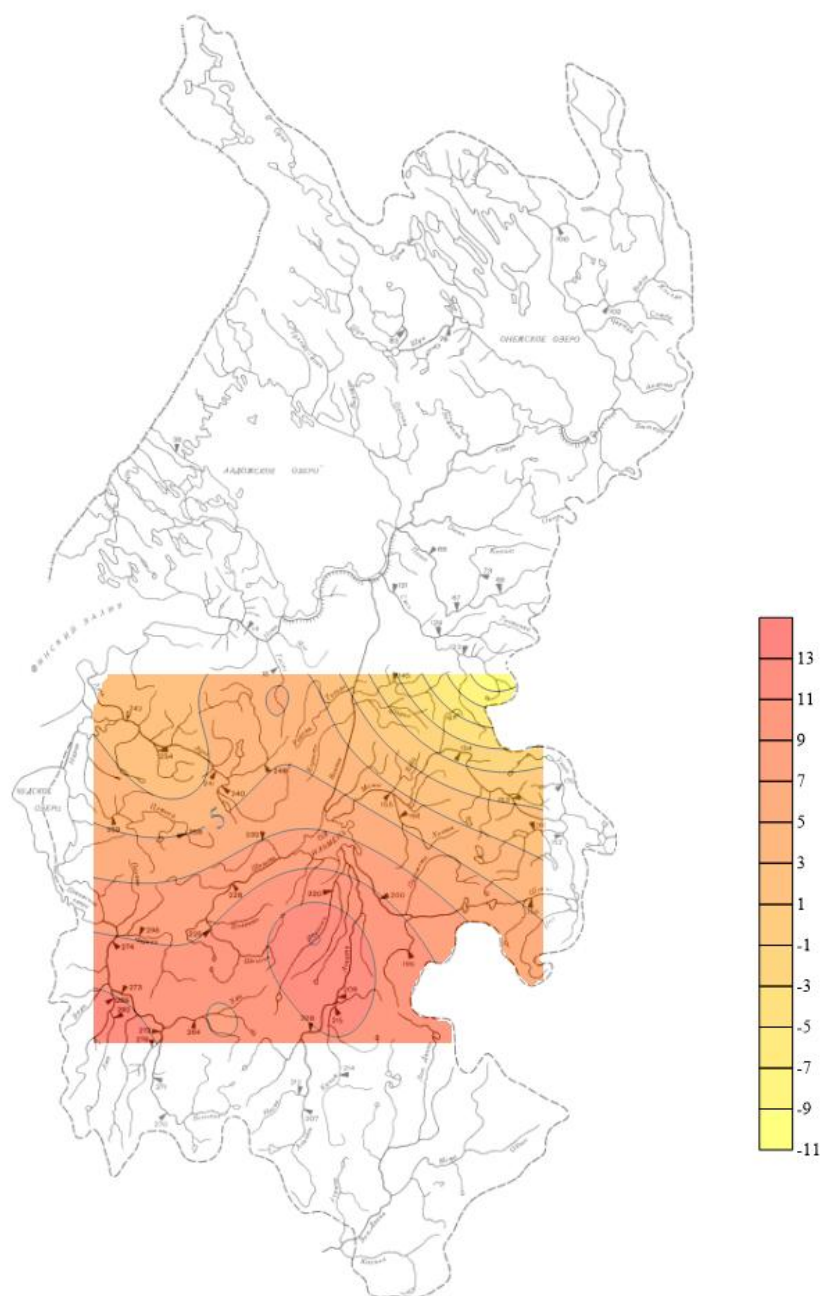


Рисунок Б.12 – Карта-схема погрешности коэффициента вариации за период 2046–2065 гг. по данным ансамбля моделей *ensemble*.