

## ОЦЕНКА НАБЛЮДАЕМЫХ И ОЖИДАЕМЫХ К СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ВОДОСБОРАХ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ ГЭС РОССИИ

© 2014 г. Г.А. Тюсов

ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова», Санкт-Петербург

Ключевые слова: изменение климата, гидроэнергетика, сток, климатические модели.



Г.А. Тюсов

Представлена комплексная оценка тенденций изменения климатических и гидрологических условий в современный период и на перспективу 2041–2060 гг. в зоне водохранилищ крупных отечественных гидроэлектростанций (ГЭС) с целью уточнения режимов работы и предотвращения неблагоприятных последствий изменения климата для гидроэнергетики.

При разработке стратегии развития большой и малой гидроэнергетики необходимо учитывать вероятность уязвимости водных ресурсов вследствие изменения климата с точки зрения изменения общего количества воды и объема ее потребления в различных отраслях (коммунальное водоснабжение, сельское хозяйство и др.), а также режимов водных потоков в течение года.

Изменение выработки гидроэлектроэнергии на конкретных ГЭС в отдельные годы при постоянстве технических условий функционирования оборудования и стабильности экономической ситуации в основном зависит от изменения притока воды к водохранилищу [1]. При уменьшении притока можно ожидать отрицательного влияния на производство гидроэлектроэнергии, а при увеличении притока, если он правильно регулируется во времени, – положительного [2]. В данной работе основное внимание уделяется наблюдаемому и ожидаемому к середине XXI в. изменению климатических условий, формирующих приток воды в водохранилища ГЭС.

Для исследования были выбраны крупные ГЭС ООО «РусГидро»: Волжско-Камский каскад (ВКК), Саяно-Шушенская, Зейская и Бурейская ГЭС. Анализ климатических и гидрологических условий проводили

с использованием ансамбля из 25 моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) разрешением  $2,5 \times 2,5^\circ$  с учетом двух сценариев радиационного внешнего воздействия на глобальный климат: RCP 4.5 (вариант слабого потепления) и RCP 8.5 (вариант сильного потепления) [3, 4]. Мерой разброса результатов расчетов по моделям, входящим в ансамбль, являются межмодельные стандартные отклонения. В статье приведены их значения для температуры воздуха, сумм осадков и слоя стока.

Результаты ансамблевого моделирования уточнялись по региональной климатической модели с разрешением  $25 \times 25$  км, разработанной в отделе динамической метеорологии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ФГБУ ГГО) для территории России [5–7]. Осреднение величин изменений температуры воздуха, осадков и слоя стока производили по границам водосборов соответствующих водохранилищ.

### **Изменения климатического и гидрологического режима на водосборах ГЭС Волжско-Камского каскада**

*Современные изменения.* Анализ данных наблюдений за 1966–2010 гг. на расположенных в бассейне р. Волги метеорологических станциях показал, что начиная с 1970-х гг., отмечался значительный рост температуры воздуха в январе – марте (на  $1,5$ – $3,0$  °C). Кроме того, в эти месяцы существенно увеличилась сумма положительных температур и возросла частота оттепелей. Температура воздуха в весенний и летне-осенний периоды также имела тенденцию к росту на большей части бассейна. Следует отметить, что наибольшие климатические изменения произошли в течение относительно небольшого промежутка времени в конце 1970-х – начале 1980-х гг. [8].

Изменение сумм осадков на территории ВКК не столь заметны. Разнонаправленные тренды отмечаются на фоне интенсивных колебаний сумм осадков и объясняют менее 12 % суммарной межгодовой изменчивости. Прослеживается тенденция некоторого увеличения осадков на территории ВКК. Особенно выделяется рост в северной части водосбора р. Камы, при этом данный тренд можно считать статистически устойчивым [9].

Среди показателей экстремальности осадков наибольший интерес представляют два индекса, характеризующие противоположные по характеру явления: повторяемость интенсивных осадков (число дней в году с осадками не менее 10 мм) и максимальная за год продолжительность сухих периодов (максимальное число последовательных дней в году с осадками менее 1 мм), рассчитанные за период 1976 – 2006 гг. [10]. На большей части рассматриваемой территории наблюдается некоторое уменьшение повторяемости интенсивных осадков и увеличение продолжительности сухих периодов. Однако, учитывая большую межгодовую изменчивость годовых

экстремумов, трудно говорить о каких-то определенных тенденциях их изменения в последние десятилетия.

Изменения температуры и характера увлажнения на территории ВКК в последние десятилетия повлекли за собой трансформацию водного режима. Сток весеннего половодья уменьшился по объему и максимальному расходу, половодье стало более сглаженным и растянутым по времени. Существенно увеличился как зимний, так и летне-осенний меженный сток. Таким образом, на преобладающей части бассейна Волги в последние 30 лет произошло значимое увеличение зимнего стока по отношению к предыдущему периоду, в связи с этим его многолетнюю динамику нельзя рассматривать в рамках гипотезы стационарности межгодовых колебаний стока [8, 11].

*Ожидаемые изменения.* Результаты моделирования показали, что наибольший рост средней температуры воздуха к середине XXI в. ожидается в зимний период (декабрь–март) и может составить около 3–4 °С. Увеличение средней температуры в весенний (апрель–июнь) и летне-осенний (июль–ноябрь) периоды несколько меньше: 2,5–3 °С.

Межмодельные стандартные отклонения изменений температуры воздуха на территории ВКК составляют около 1 °С. Так как ожидаемое увеличение температуры в бассейне Волги превосходит эту величину, их значения можно считать значимыми.

Прогнозные оценки изменений количества осадков имеют бóльшую неопределенность, нежели изменения температуры. Межмодельные стандартные отклонения изменения сумм осадков составляют от 5–6 % в зимний и весенний периоды до 8–9 % летом и осенью. Значительная неопределенность изменений осадков на водосборе Волги обусловлена тем, что северная часть рассматриваемой территории находится в зоне относительного увеличения осадков, а южная – в зоне уменьшения.

По расчетным данным наибольший рост осадков ожидается зимой. К середине XXI в. по сценарию сильного потепления он достигнет 13 % на Верхней Волге и 17 % на Каме. Весной эти значения составят 6 – 7 и 8–9 % соответственно, а в летне-осенний период 1–2 и 4 – 6 %. На Нижней Волге ожидается уменьшение осадков в летне-осенний период на 2–4 %. Итоговое увеличение осадков на водосборе Волги к середине XXI в. в летне-осенний период составит около 2 %.

В теплый период года на фоне повышения количества осадков высока вероятность возрастания доли конвективных осадков. Это будет способствовать увеличению повторяемости гроз и ливней. Необходимо отметить, что большой межмодельный разброс снижает значимость оценок изменения осадков в теплый период года. Наибольшую значимость в этой ситуации заслуживают характеристики за зимний период.

**Таблица 1.** Изменение слоя стока на водосборах водохранилищ ГЭС Волжско-Камского каскада к 2041–2060 гг. по отношению к 1980–1999 гг., %

Водосборы водохранилищ ГЭС Волжско-Камского каскада	Зима (декабрь–март)		Весна (апрель–июнь)		Лето–осень (июль–ноябрь)		Год	
	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)
Иваньковская ГЭС	32	34	–18	–17	–8	–7	1	0
Угличская ГЭС	36	39	–19	–18	–8	–7	1	0
Рыбинская ГЭС	43	48	–21	–19	–8	–7	2	2
Нижегородская ГЭС	51	58	–21	–21	–7	–6	2	2
Чебоксарская ГЭС	43	48	–19	–18	–5	–5	1	0
Жигулевская ГЭС	59	70	–18	–19	–4	–3	2	2
Саратовская ГЭС	58	68	–18	–20	–4	–3	2	1
Волгоградская ГЭС	55	64	–18	–19	–4	–3	1	0
Камская ГЭС	85	110	–9	–13	2	2	8	7
Воткинская ГЭС	87	111	–11	–15	1	1	7	6
Нижекамская ГЭС	84	105	–16	–20	–2	–2	4	3

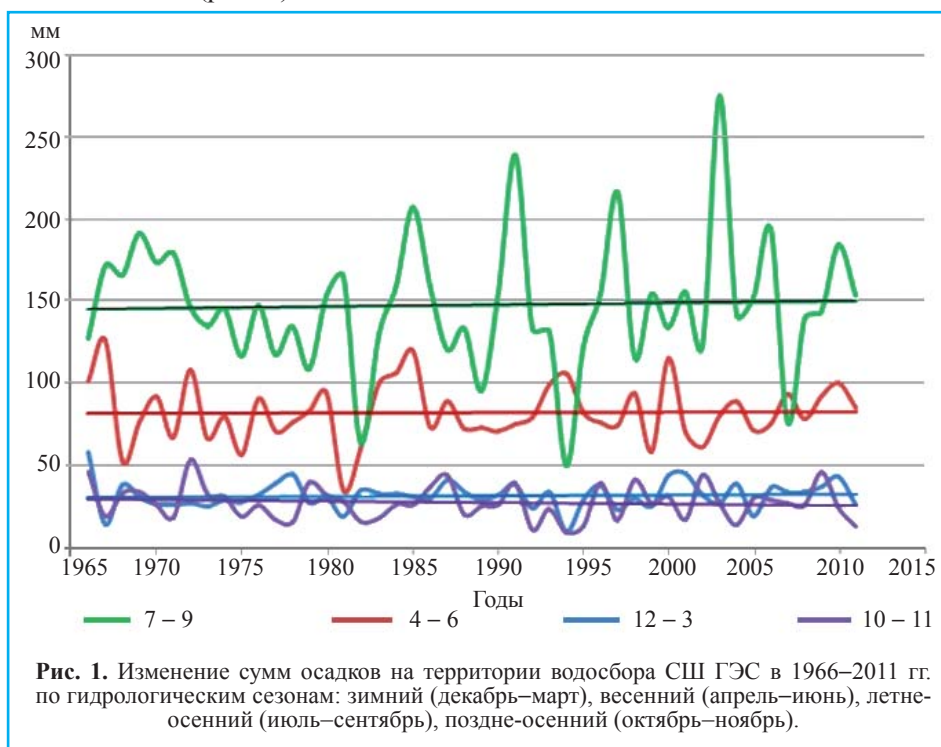
Прогнозные оценки изменений слоя стока, как и оценки изменений сумм осадков, характеризуются значительной неопределенностью. Межмодельные стандартные отклонения годового слоя стока к 2041–2060 гг. составляют около 10 %. Прогнозируемое по всем климатическим сценариям дальнейшее повышение зимних температур воздуха позволяет считать, что увеличенный зимний приток в водохранилища ВКК, наблюдающийся со второй половины 1970-х гг., сохранится, по крайней мере, до середины XXI в. По данным табл. 1, эта тенденция особенно выражена на водосборе р. Камы, где увеличение стока в зимний период может достигать 100 %.

Уменьшение слоя стока в период весеннего половодья к середине XXI в. может достигнуть 10–20 %. Изменение слоя стока в летне-осенний период, как и изменения сумм осадков, обладает наибольшей неопределенностью. Они колеблются от увеличения слоя стока на 1–2 % на водосборе Камы до уменьшения на 6–8 % на верхней Волге. Ожидаемые годовые изменения слоя стока, осредненные по площади водосборов водохранилищ ГЭС ВКК, в основном положительны.

### Изменения климатического и гидрологического режима на водосборах крупных ГЭС Азиатской территории России

*Современные изменения. Саяно-Шушенская ГЭС.* Анализ данных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных в бассейне р. Енисей в пределах водосбора водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС) за период 1960 – 2012 гг., показал рост средней годовой температуры воздуха на 1–3 °С. Температура воздуха, осредненная по гидрологическим сезонам, также демонстрировала положительный тренд во все сезоны. Однако потепление в период с октября по март имело более выраженный характер, чем с апреля по сентябрь, и составило 3–5 и 1–2 °С соответственно. Такое изменение температурного режима привело к увеличению доли жидких осадков в годовой сумме и уменьшению периода снегонакопления. В свою очередь, эти факторы вызвали изменения характеристик гидрологического режима.

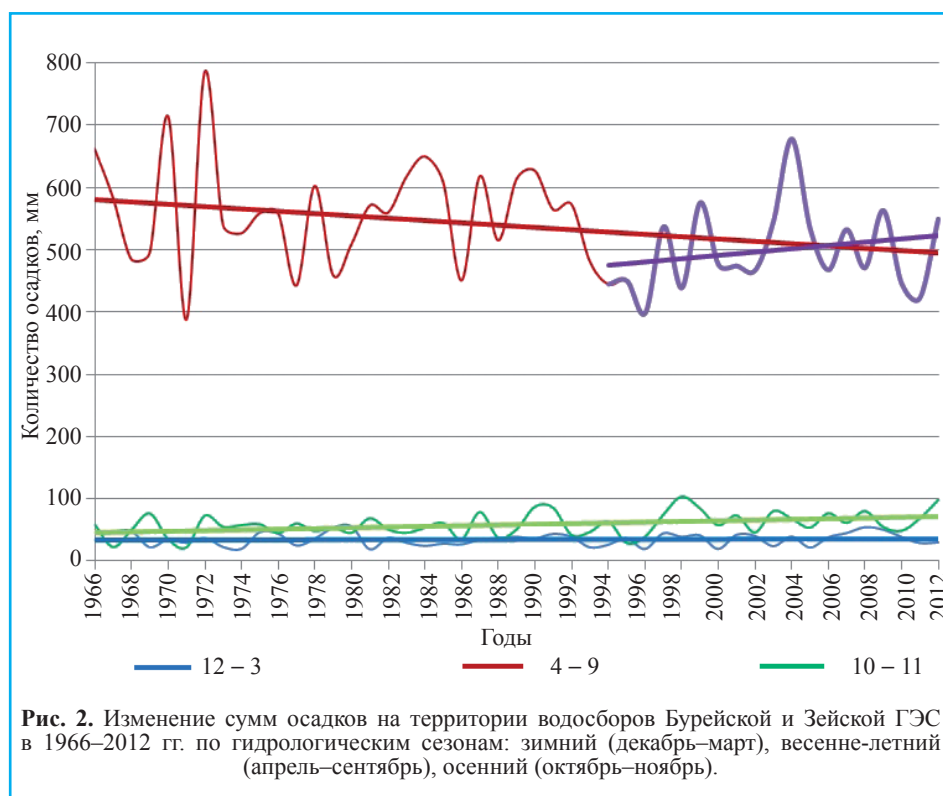
При анализе изменения сумм осадков за последнее 50-летие значимые тренды на исследуемой территории не отмечаются. Отчетливо выделяется лишь их высокая межгодовая изменчивость в теплый период года, когда в регионе выпадает наибольшее количество осадков. Особенно заметно увеличение межгодовых флуктуаций сумм осадков летне-осеннего сезона с начала 1980-х гг. (рис. 1).



По данным наблюдений, в бассейне Верхнего Енисея в течение последних 50 лет отмечалось незначительное (–5 %) уменьшение годового стока. Весенний сток уменьшился примерно на 5 %, при этом увеличение стока в зимний период составило 10–20 %. Следует отметить, что в последнее 20-летие не наблюдалось значимого изменения годового стока на рассматриваемой территории.

*Бурейская и Зейская ГЭС.* За период 1966–2012 гг. в бассейнах рек Зеи и Буреи увеличение среднегодовой температуры воздуха составило около 2 °С и имело положительный тренд во все сезоны. Однако наиболее значимый тренд отмечался в период с декабря по март – около 4 °С за 50 лет, в октябре–ноябре он составил 2 °С, а в теплый период года значимый тренд отсутствовал.

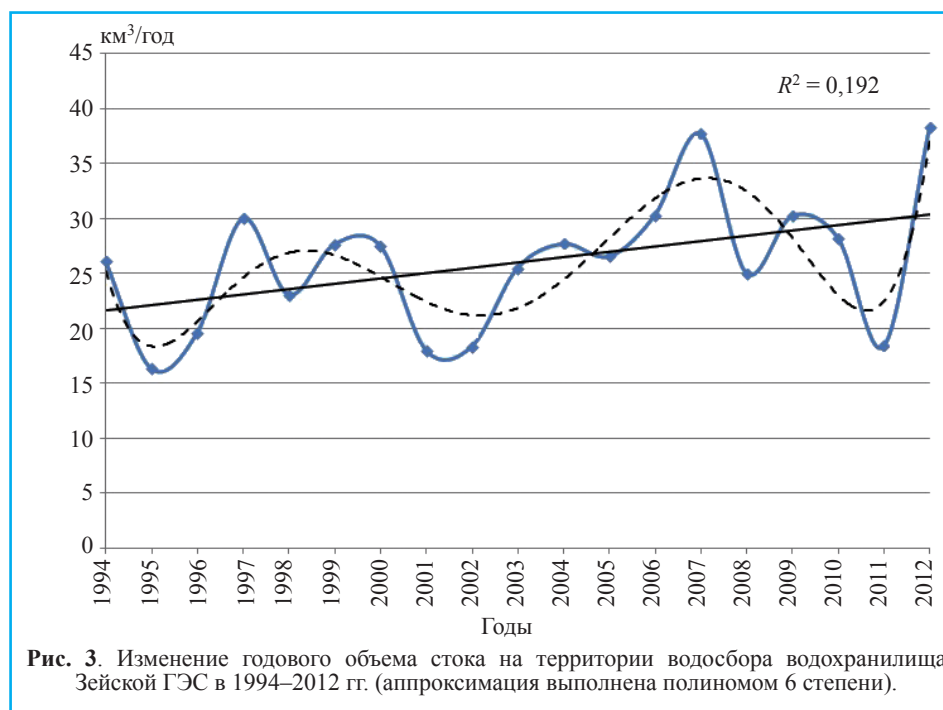
Анализ изменения годовых сумм осадков, обобщенный по территории рассматриваемого района, выявил отрицательный тренд за последние 50 лет. Однако учитывая большую межгодовую изменчивость количества осадков, значимость этого тренда невелика. Основное уменьшение количества осадков происходило в период с положительными температурами. В период отрицательных температур с октября по март, когда суммы осадков малы, их изменение выраженного тренда не имело (рис. 2).



Однако на рис. 2 показано, что в последнее двадцатилетие наблюдается положительный тренд сумм осадков в весенне-летний период. В этот период на территории водосбора водохранилища Зейской ГЭС отмечалась тенденция к увеличению годового объема стока. Такое увеличение можно считать значимым, т. к. на трендовую составляющую в этом регионе приходится около 20 % межгодовой изменчивости. Кроме того, изменение стока в этом районе, как и изменение сумм осадков, подвержено циклическим колебаниям с периодом около 11 лет (рис. 3). Положительный тренд объема стока был обусловлен в основном увеличением стока в весенне-летний период (рис. 4), когда формируется основная часть годового стока.

*Ожидаемые изменения. Саяно-Шушенская ГЭС.* По данным ансамбля климатических моделей в бассейне Верхнего Енисея ожидается увеличение температуры практически во все сезоны года. К середине XXI в. оно может составить в среднем 2,5–3,0 °С по отношению к 1980–1999 гг. Наибольшее увеличение сумм осадков ожидается в зимний и поздне-осенний сезоны и может достигнуть 17–20 %, весной 9–12 %, а в летне-осенний период значимых изменений не ожидается.

Расчетные данные, полученные по стоку, говорят о возможном значительном (до 100 %) увеличении слоя стока в зимний период на Верхнем Енисее к середине XXI в. (табл. 2). При этом весной эта характеристика прак-





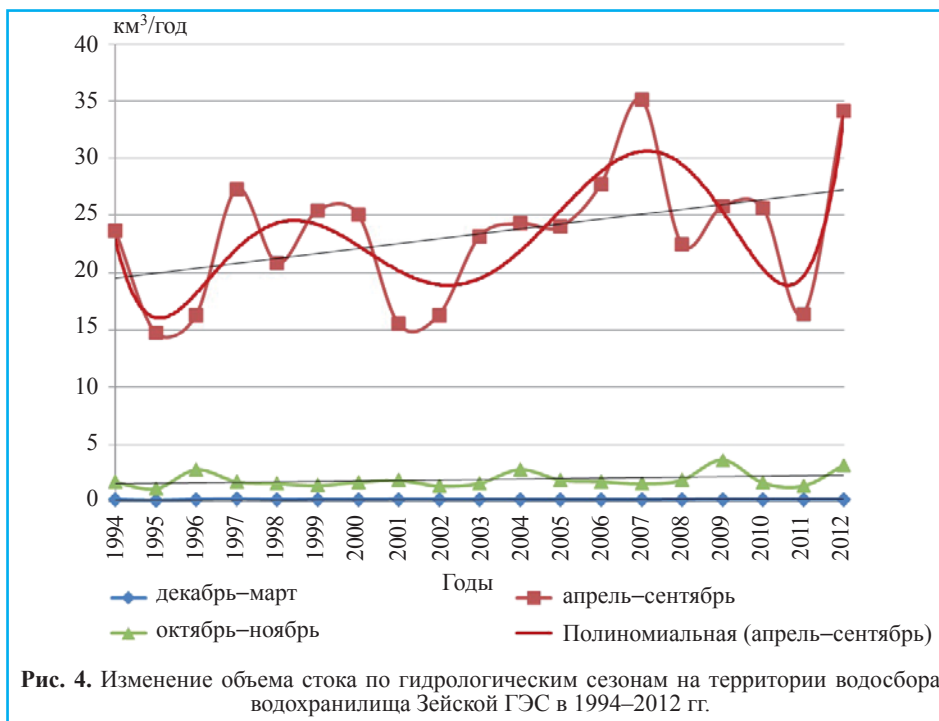


Рис. 4. Изменение объема стока по гидрологическим сезонам на территории водосбора водохранилища Зейской ГЭС в 1994–2012 гг.

тически не изменится, а летом ожидается ее некоторое уменьшение (–8 %). Суммарно за год вероятно возрастание слоя стока на 5–8 %.

*Бурейская и Зейская ГЭС.* Наибольший рост средней температуры в бассейне Амура к середине XXI в. ожидается в зимний и осенний периоды, он может составить около 3–4 °С. Увеличение средней температуры в весенне-летний период несколько меньше: 2–3 °С. Прогнозные оценки изменения количества осадков имеют большую неопределенность, чем изменения температуры. Модельные стандартные отклонения изменения сумм осадков

Таблица 2. Изменение слоя стока на водосборе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС по гидрологическим сезонам к 2041–2060 гг. по отношению к 1980–1999 гг., %

Горизонты прогнозирования	Зимний сезон (декабрь–март)		Весенний сезон (апрель–июнь)		Летне-осенний сезон (июль–сентябрь)		Поздне-осенний сезон (октябрь–ноябрь)		Год	
	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)
2041–2060 гг.	74	115	–1	0	–8	–8	32	47	5	8



в этом регионе составляют от 5–6 % в зимний и весенний периоды до 8–9 % летом и осенью. По расчетным данным, наибольший рост осадков ожидается зимой и осенью. К середине XXI в. по сценарию сильного потепления он может достигнуть 18 % на водосборе Буреи и 25 % на водосборе Зеи. В весенний и летний период эти значения составят 9 и 11 % соответственно. В теплый период года на фоне возрастания количества осадков будет расти доля конвективных осадков. Это означает, что вероятно увеличение повторяемости гроз и ливней.

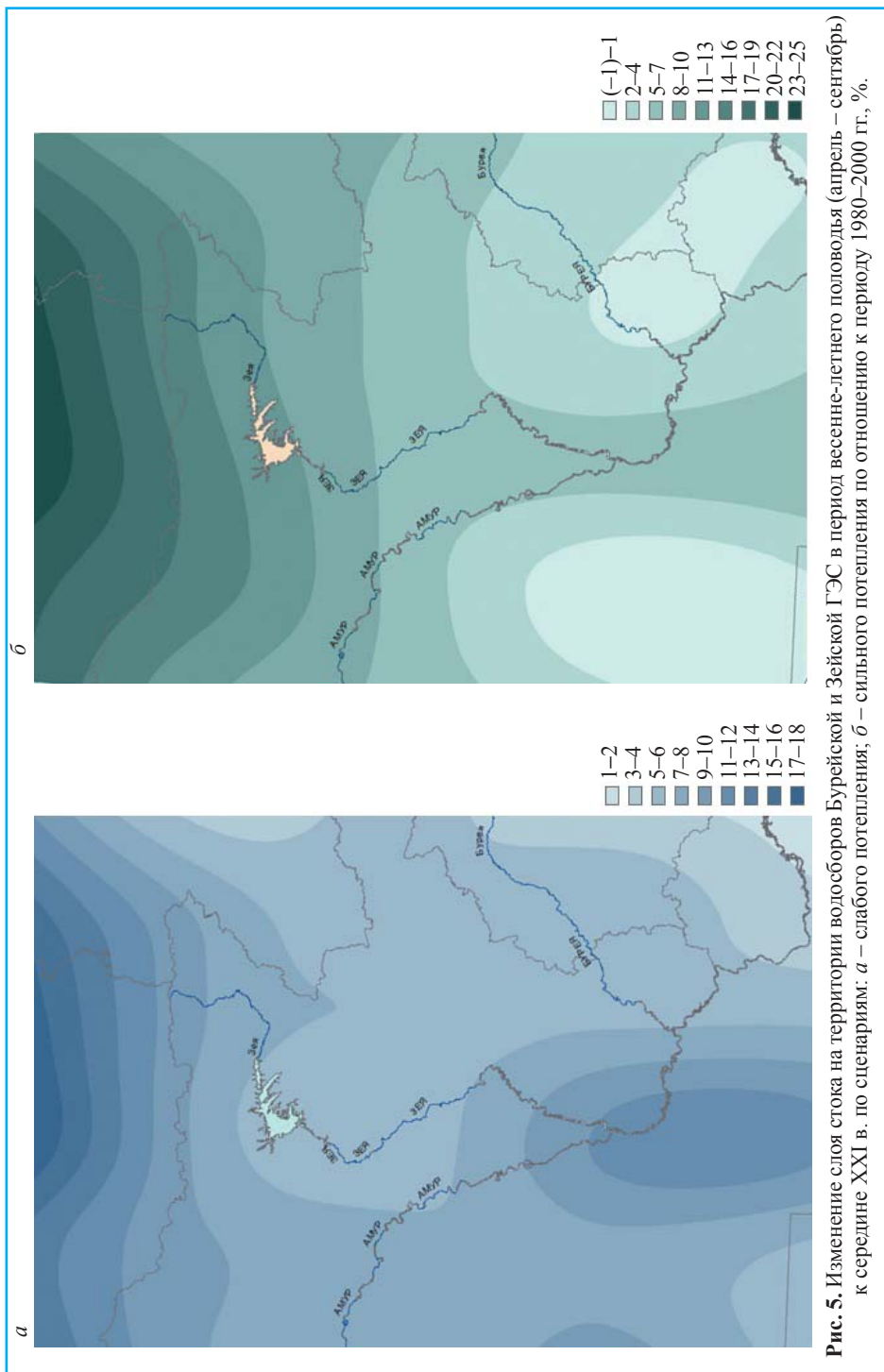
Прогнозные оценки изменений слоя стока также характеризуются значительной неопределенностью. Межмодельные стандартные отклонения годового слоя стока в этом районе к 2041–2060 гг. составят 10–12 %.

Прогнозируемое по всем климатическим сценариям дальнейшее повышение зимних температур воздуха, вероятно, обеспечит увеличение зимнего притока в водохранилища Бурейской и Зейской ГЭС. Как следует из данных табл. 3, увеличение стока в зимний и особенно осенний периоды к середине XXI в. может достигнуть на водосборе Буреи 40 %, а на водосборе Зеи – свыше 50 %. В весенне-летний период увеличение стока не столь значительно: 3–5 и 11–15 % соответственно. Годовое увеличение слоя стока к середине XXI в., вероятно, составит 9–10 % на водосборе Буреи, 9–13 % на водосборе Зеи.

Так как для практического использования наибольший интерес в бассейне р. Амур представляют оценки изменений слоя стока в многоводный период года, были построены картосхемы изменений среднего слоя стока в период весенне-летнего половодья (с апреля по сентябрь) на середину XXI в. по сценариям слабого и сильного потепления по данным ансамбля климатических моделей в узлах регулярной сетки 2,5×2,5° методом кригинга (рис. 5).

**Таблица 3.** Изменение слоя стока, осредненные по площади водосборов водохранилищ Бурейской и Зейской ГЭС, по гидрологическим сезонам 2041–2060 гг. по отношению к 1980–1999 гг., %

Зимний сезон (декабрь–март)		Весенне-летний сезон (апрель–сентябрь)		Осенний сезон (октябрь–ноябрь)		Год	
Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)
Бурейская ГЭС							
37	37	5	3	36	42	6	8
Зейская ГЭС							
16	19	11	15	43	57	9	12



Следует отметить, что на рис. 5 представлены осредненные за 20-летний период 2041–2060 гг. ожидаемые значения изменений слоя стока в многогодный период года. Однако, учитывая наблюдаемое уже сейчас возрастание межгодовой изменчивости метеорологических и гидрологических параметров в этом регионе, можно предположить, что величина слоя стока редкой обеспеченности (1 и 0,01 %), наиболее важная для гидротехнических расчетов, возрастет еще более значительно. Это объясняется увеличением общей нестабильности атмосферной циркуляции в регионах с муссонным типом климата (включая и бассейн Амура) в связи с климатическими изменениями.

Выполненный анализ наблюдаемых и ожидаемых к середине XXI в. климатических изменений на водосборах водохранилищ крупных ГЭС России показал, что практически для всех рассматриваемых ГЭС ожидается увеличение притока воды к водохранилищам в XXI в., что теоретически может способствовать увеличению выработки электроэнергии. Кроме того, наблюдаемая тенденция к увеличению стока в холодный период года, обусловленная возрастанием доли жидких осадков и частоты оттепелей в связи с ростом температуры воздуха, ведет к выравниванию годового хода слоя стока. Этот фактор также способствует оптимизации режима работы ГЭС.

К негативным последствиям климатических изменений для гидроэнергетики можно отнести рост межгодовой изменчивости гидрологических характеристик. Следовательно, вероятно значительное увеличение слоя стока редкой обеспеченности, особенно в Дальневосточном регионе. Уточнение таких оценок требует привлечения информации высокого пространственного и временного разрешения, которое может быть обеспечено следующими поколениями глобальных и региональных климатических моделей.

Работа выполнена в рамках договора «Оценка и прогнозы изменений климата на отдаленную перспективу в зоне водохранилищ ГЭС ОАО «РусГидро» с целью уточнения режимов работы». Автор выражает благодарность своему научному руководителю Е.М. Акентьевой за консультации при подготовке статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / под ред. В.В. Елистратова. СПб.: Наука, 2010. С. 148–163.
2. Акентьева Е.М., Иванова Е.В. Оценка влияния ожидаемого к середине XXI века изменения климата на потенциал малой гидроэнергетики (на примере Ленинградской области) // Труды ГГО. 2010. Вып. 561. С. 115–123.
3. Катцов В.М., Мелешко В.П. Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, предназначенных для оценки будущих изменений климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 6. С. 647–658.

4. Taylor K.E., Stouffer R.J. and Meehl G.A. (2007). A summary of CMIP5 Experiment design. Режим доступа: [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment\\_design.html](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment_design.html). Taylor\_CMIP5\_design.pdf.
5. Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Региональная климатическая модель ГГО для территории Сибири // Метеорология и Гидрология. 2007. № 6. С. 5–17.
6. Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Возможные изменения климата на европейской части России к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО // Метеорология и Гидрология. 2006. № 3. С. 5–16.
7. Shkolnik I.M., Nadyozhina E.D., Pavlova T.V., Molkentin E.K., Semioshina A.A. Snow cover and permafrost evolution in Siberia as simulated by the MGO regional climate model in the 20th and 21st centuries // Environmental Research Letters, 2010. Vol. 5. № 1. P. 1–8.
8. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы / Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
9. Лепихин А.П. Структура временной изменчивости годового стока рек бассейна р. Камы // Водное хозяйство России. 2005. Т. 7. № 3. С. 277–295.
10. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2008. Т. 1–2.
11. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л., Георгиевский М.В., Голованов О.Ф., Шикломанов А.И. Прогнозные оценки изменений стока на основе климатических сценариев // Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. С. 442–464.

**Сведения об авторе:**

Тюсов Григорий Анатольевич, аспирант, ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ФГБУ ГГО), 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7; e-mail: tyusov.spo@gmail.com