

УДК 556.06

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Ушаков М. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения РАН, Магадан, Российская Федерация
E-mail: mvilorich@narod.ru*

В работе выполнен краткий обзор исследований Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило ДВО РАН в области климатических изменений гидрологического режима рек Северо-Востока России за 2013–2022 гг. Исходные ряды наблюдений за элементами гидрологического режима исследовались на наличие тренда с использованием критерия Стьюдента и Херста. Ряды гидрометеорологических характеристик подвергались низкочастотной фильтрации методом скользящей 30-летней средней. Зафиксировано увеличение стока большинства рек. Изменился термический режим рек Верхней Колымы. Уменьшилась продолжительность ледового сезона на реках Северного Приоохономья. Результаты работы будут полезны гидрологам, занимающимся гидрологическими расчетами и прогнозами и другим специалистам, чья деятельность связана с водными объектами.

Ключевые слова: изменения климата, гидрологический режим, речной сток, температура воды, ледоход, ледостав.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из следствий происходящего глобального потепления климата [1, 2, 3, 4] является трансформация гидрологического режима рек [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Так, в работе [7] были исследованы компоненты гидрологического режима рек Сибири. В термическом режиме не замечены существенные изменения, в то время как продолжительности ледостава и толщины льда уменьшаются. Кроме того, наблюдается увеличение стока подземных вод из таежной зоны. В северных зонах тундр увеличиваются площади озер, а в южных районах тундры и тайги озера теряют площадь. По мнению авторов, ожидается, что сток рек в основных водосборных бассейнах Сибири увеличится, и этот результат согласуется с большинством прогнозов глобальных климатических моделей на XXI век.

В работах [8, 9] установлено, что в 1976–2017 гг. с территории Сибири и Дальнего Востока годовой сток рек в арктические моря увеличился на 7 % по сравнению с предыдущим 30-летием. У рек северо-восточного сектора явный рост отмечен с середины и второй половины 1990-х годов. Больше всего годовой сток вырос у рек Республики Якутии (до 18 %). Рост слоя стока продолжался в течение всех последних лет, о чём свидетельствуют положительные и нередко значимые линейные тренды. Общее уменьшение или «стабильное поведение» стока за этот же период обнаружено у Мезени, рек Обского Севера и крайнего Северо-Востока. Рост температур зимнего периода приводит к повышенному питанию грунтовых вод, что опосредованно влияет на водность межени. Практически во всех исследованиях отмечается рост зимних расходов воды для большинства рек. Так, например, зимний сток Колымы увеличился на 169 %.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Эти выводы подтверждают исследование [10], где зафиксировано статистически значимое увеличение сток рек Восточной Якутии после 1980 г., особенно, в осенне-зимние месяцы.

В настоящей работе сделан обзор исследований климатических изменений режима рек Северо-Востока России, проведенных в Северо-Восточном комплексном научно-исследовательском институте им. Н.А. Шило ДВО РАН (СВКНИИ ДВО РАН) в 2013–2022 гг. Следует упомянуть, что результативность проводимых исследований связана с сотрудничеством с такими организациями как Институт мерзлотоведения СО РАН, Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Рассматриваемый регион занимает северо-восточную окраину Евразии и включает в себя бассейн р. Колымы, реки Чукотки и северного побережья Охотского моря (рис. 1). Природные условия и гидрологический режим рек территории подробно описаны в [11, 12]. Речные водные ресурсы используются в горной промышленности, энергетике, рыбной промышленности, коммунальном хозяйстве.

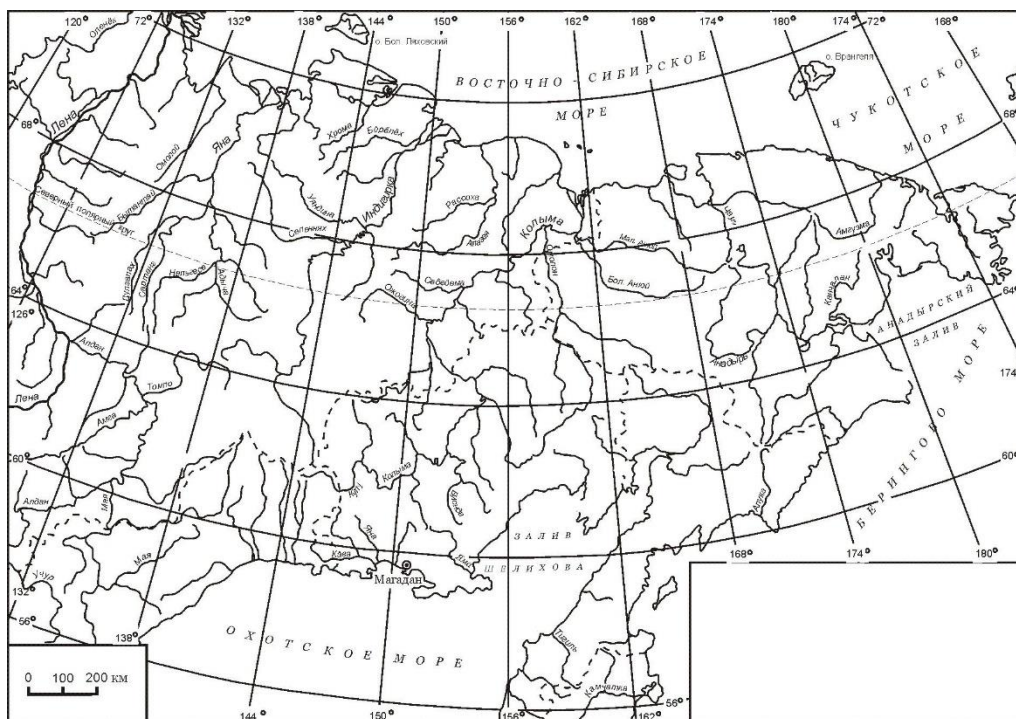


Рис. 1. Границы и речные системы Северо-Востока России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В гидрологическом отношении регион плохо изучен [13]. Исходные данные по речному стоку, температуре воды, ледовым явлениям были взяты из

Гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра. Метеорологические данные имеются в свободном доступе на сайте [14].

Временные ряды исследовались на наличие тренда с использованием критерия Херста [15], метода сравнения среднемноголетних характеристик гидрологического режима за различные периоды по критерию Стьюдента с уровнем значимости 5 %.

Ряды подвергались низкочастотной фильтрации методом скользящей средней. Графические построения производились при помощи табличного редактора Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Режим речного стока претерпел ощутимые климатические изменения. Так, в работе [16] выявлены следующие изменения гидрологического режима р. Колымы:

– заметно увеличился сток в мае, сократилась продолжительность ледостава, что обусловлено совместным влиянием Колымской ГЭС и потеплением климата;

– существенно уменьшился сток взвешенных наносов, как за счет аккумуляции части твердого стока в Колымском водохранилище, так и за счет уменьшения водности реки в теплый период года.

– в нижнем течении Колымы изменения гидрологического режима менее заметны, чем на вышележащих участках.

В работе [17] зафиксирован рост максимальных расходов и слоев стока весеннего половодья рек Верхней Колымы, однако эта тенденция прослеживается не везде (табл. 1). Повысились максимальные расходы и слои стока дождевых паводков.

Таблица 1.

Климатические изменения условных норм гидрологических характеристик рек Верхней Колымы по двум 30-летним периодам [17]

Река – пункт	Среднее	
	за 1955-1984 гг.	за 1985-2014 гг.
Максимальный расход воды весеннего половодья, м ³ /с		
руч. Талок — г. Сусуман	3,20	4,09
руч. Контактный - Нижний	3,38	3,81
р. Омчак — п. Омчак	20,4	23,2
р. Детрин — устье р. Омчука	346	316
р. Омчук — п. Усть-Омчуг	61,3	82,0
Слой сток за половодье, мм		
руч. Талок – г. Сусуман	39	64
руч. Контактный - Нижний	97	111

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Река – пункт	Среднее	
	за 1955-1984 гг.	за 1985-2014 гг.
р. Омчак – п. Омчак	102	107
р. Детрин — устье р. Омчука	120	115
р. Омчук — п. Усть-Омчуг	81	120
Максимальный расход воды дождевого паводка, м ³ /с		
руч. Талок — г. Сусуман	6,21	8,41
руч. Контактный — Нижний	7,46	8,95
р. Омчак — п. Омчак	33,6	36,1
р. Детрин — устье р. Омчука	406	440
р. Омчук — п. Усть-Омчуг	90,4	130
Слой сток за паводок, мм		
руч. Талок – г. Сусуман	17	37
руч. Контактный - Нижний	35	45
р. Омчак – п. Омчак	35	56
р. Детрин – устье р. Омчука	38	80
р. Омчук – п. Усть-Омчуг	31	49

Анализ временных рядов месячного притока воды в Колымское водохранилище показал, что за последние 30 лет притоки за май, август и сентябрь выросли на 37, 31 и 38% [17]. Благодаря тому, что весеннее половодье стало начинаться раньше, произошло увеличение стока в мае и уменьшение его в июне-июле (рис. 2) [18]. Сток за лимитирующий период вырос на 37,9 %.

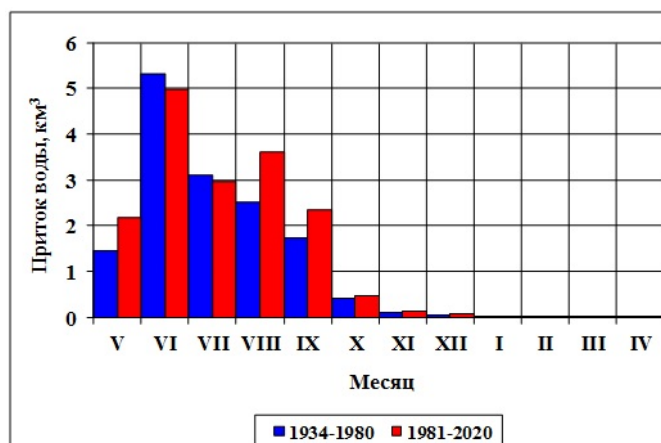


Рис. 2. Внутригодовое распределение притока воды в Колымское водохранилище за водохозяйственный год до 1980 г. и после [18].

Для анализа многолетних изменений стока рек Западной Чукотки в табл. 2 приведены стоковые характеристики за многолетние периоды наблюдений до 1980 и после [19].

Таблица 2.

Характеристики стока рек Западной Чукотки [19]

Река; пункт; площадь водосбора, км ²	Период наблюдений, годы	Слой стока, мм			
		за год	за полугодье	в 3-ем квартале	минимальный за 30 суток в летнюю межень
Березовка; с. Березовка; 15400	1965–1980	117	74	35,3	3,5
	1981–2010	140	75	46,4	4,2
Пеймына, в 1,5 км от устья; 1480	1968–1980	153	74	64,4	5,7
	1981–1994	141	90,3	51,0	8,3
Баимка, пос. Баимка; 400	1963–1980	203	90	96,0	12,4
	1981–2000	224	95,9	108	12,1
Малый Аной, с. Илирней; 8180	1958–1980	236	134	100	20,3
	1981–1999	239	118	102	19,3
Малый Аной, с. Островное; 30000	1960–1980	187	104	83,2	13,5
	1981–1997	198	108	80,8	13,9
Мухтуя, с. Островное; 23,7	1960–1980	213	77	111	14,2
	1981–2006	293	85,9	168	21,9
Погынден, устье р. Инкуливеем; 12000	1960–1980	143	84	49,6	8,3
	1981–2010	162	84	69,6	10,6
Инкуливеем, в 2 км от устья; 242	1960–1980	87,3	71	10,2	0,8
	1981–2010	112	76	20,7	2,0

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ**

Паляваам, в 0,8 км ниже устья р. Кооквын; 6810	1971–1980	201	83	115	28,3
	1981–1996	194	62	111	23,3

В большинстве рек отмечено увеличение среднегодового стока (см. табл. 2). Сток уменьшился в реках Пеймына и Паляваам.

Среднегодовое значение стока за период весеннего половодья уменьшился в реках Малый Аней (пос. Илирней) и Паляваам. В других он вырос, хотя и не всегда значительно. В третьем квартале года сток после 1980 г. в среднем вырос (см. табл. 2). То же можно сказать и о минимальном стоке в летне-осенний период.

Произошли заметные изменения в режиме стока и рек Северного Приохотоморья [20; 21; 22].

Так в работе [20] были проанализированы многолетние колебания модулей минимального суточного стока этого района. Из данных табл. 3 видно, что за с 1981 г. среднегодовые модули минимального суточного стока подросли на 8-53 %. И эти приращения связаны с площадью бассейна (рис. 3)

$$\Delta M = 1621g A^{-2,03}, \quad \text{коэффициент детерминации } R^2 = 0,92, \quad (1)$$

где A – площадь бассейна, км².

Таблица 3.

Среднегодовые значения минимального суточного летне-осеннего стока рек Северного Приохотоморья [20]

Река – пункт	Среднегодовой минимальный суточный модуль стока, л/(с·км ²)	
	до 1980 г.	1981-2016 гг.
р. Дукча – устье	9,5	12,8
р. Магаданка – г. Магадан	13,2	20,2
р. Хасын п. Хасын	7,4	8,8
р. Уптар – п. Уптар	7,9	9,6
р. Тауй – с. Талон	6,7	7,2

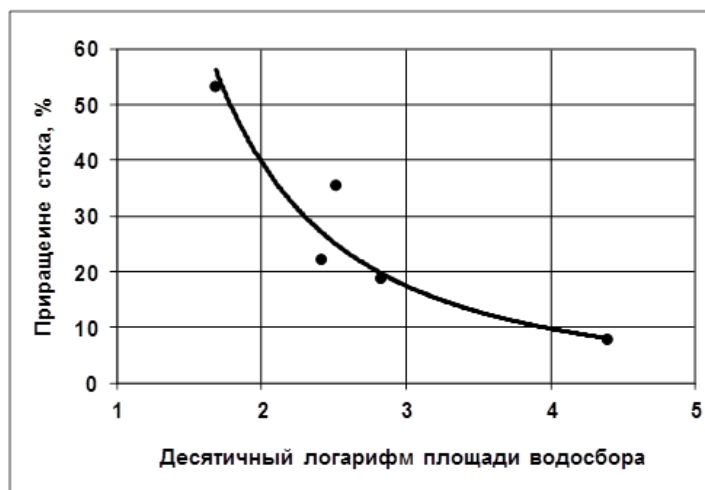


Рис. 3. Связь климатического приращения модуля минимального суточного стока за летне-осенний период с площадью водосбора [20].

Рост минимального стока рек Северного Приохотоморья в первую очередь обусловлен возрастанием атмосферных осадков (табл. 4). Потепление климата вызывает увеличение мощности сезонно-талого слоя и размеров таликов, а это приводит к повышению подземной составляющей стока рек.

Ряды среднегодовой температуры воздуха в г. Магадане и минимального суточного модуля стока на р. Хасыне у п. Хасына были подвержены низкочастотной фильтрации, а именно, скользящим осреднением с окном 30 лет (рис. 4). По этим графикам хорошо видно, что нормы, рассчитанные за 30-летние периоды, растут.

Отфильтрованные значения хорошо связаны между собой

$$Q_{30_i} = 0,97t_{30_i} + 8,28, \quad R^2=0,87, \quad (2)$$

где i – год окончания 30-летнего периода; Q_{30} — скользящие 30-летние средние минимального суточного модуля стока; t_{30} — скользящие 30-летние средние температуры воздуха.

По уравнению (2) можно рассчитывать норму минимального суточного модуля стока р. Хасына при различных вариантах повышения нормы среднегодовой температуры воздуха.

В работе [21] было установлено, что рост температур воздуха и атмосферных осадков повлек за собой увеличение годового стока рек, расположенных в г. Магадане и его окрестностях (табл. 5).

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Таблица 4.

Среднемноголетние значения климатических характеристик [20]

Климатическая характеристика	Среднее	
	до 1980 г.	1981–2015 гг.
Среднегодовая температура воздуха, С°	-3,5	-2,6
Температура воздуха в третьем квартале, С°	10,0	10,5
Сумма осадков за год, мм	530	577
Сумма осадков за третий квартал, мм	209	252

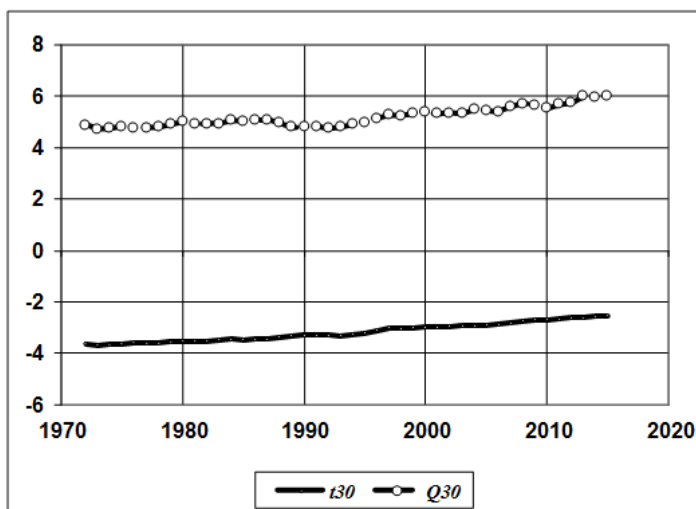


Рис. 4. Скользящие 30-летние средние среднегодовой температуры воздуха в г. Магадане (t_{30} в °С) и минимального летне-осеннего суточного модуля стока на р. Хасыне у п. Хасына (Q_{30} в л/(с·км²)) [20].

Таблица 5.

Изменения среднемноголетних модулей годового стока [21]

Река - пункт	Средний модуль годового стока за	
	1958–1986 гг.	1987–2016 гг.
р. Дукча – п. Снежная Долина	22,5	26,1
р. Дукча – устье	16,8	18,5
р. Магаданка – г. Магадан	21,8	25,8
р. Магаданка – устье р. Каменушки	19,4	23,1
р. Магаданка – мост	17,7	19,5

Река - пункт	Средний модуль годового стока за	
	1958–1986 гг.	1987–2016 гг.
Колымского шоссе		
р. Каменушка — в 8 км от устья	18,3	20,9
р. Каменушка — в 3,3 км выше плотины	16,8	19,6
руч. Спутник — устье	19,1	24,2
руч. Солнечный — устье	11,6	13,3
р. Уптар — п. Уптар	15,7	17,6

На рис. 5 можно увидеть, что увеличение годовых сумм осадков и стока р. Дукчи началось с «нормы», рассчитанной за период 1977–2006 гг., а рост температуры начался еще раньше. Исходя из этого, были построены корреляционные связи рассматриваемых гидрометеорологических характеристик, начиная с «норм», рассчитанных за 1977–2006 гг. и заканчивая «нормами» за 1987–2016 гг. (рис. 6).

Эти связи довольно тесные:

$$P30_i = 103t30_i + 836, \quad r = 0,93, \quad (3)$$

$$M30_i = 0,041P30_i - 5,38, \quad r = 0,96, \quad (4)$$

$$M30_i = 4,46t30_i + 29,54, \quad r = 0,94, \quad (5)$$

где $P30_i$, $t30_i$, $M30_i$ — скользящие 30-летние средние годовые суммы осадков (мм), среднегодовой температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и модуля годового стока р. Дукчи в устье ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$), соответственно; i — год окончания 30-летки ($i = 1986, 1987, \dots, 2016$).

По формулам (3), (4), (5) можно рассчитывать «нормы» годовой суммы осадков в г. Магадане и модуля годового стока р. Дукчи при различных вариантах потепления (табл. 6), а затем построить кривые распределения модуля годового стока р. Дукчи (рис. 7).

Таблица 6.

«Нормы» модуля годового стока р. Дукчи в устье при различных сценариях потепления климата [21]

Река - пункт	Средний модуль годового стока ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) при повышении «нормы» среднегодовой температуры воздуха на		
	0°C	1°C	2°C
р. Дукча — устье	18,5	23,3	27,8

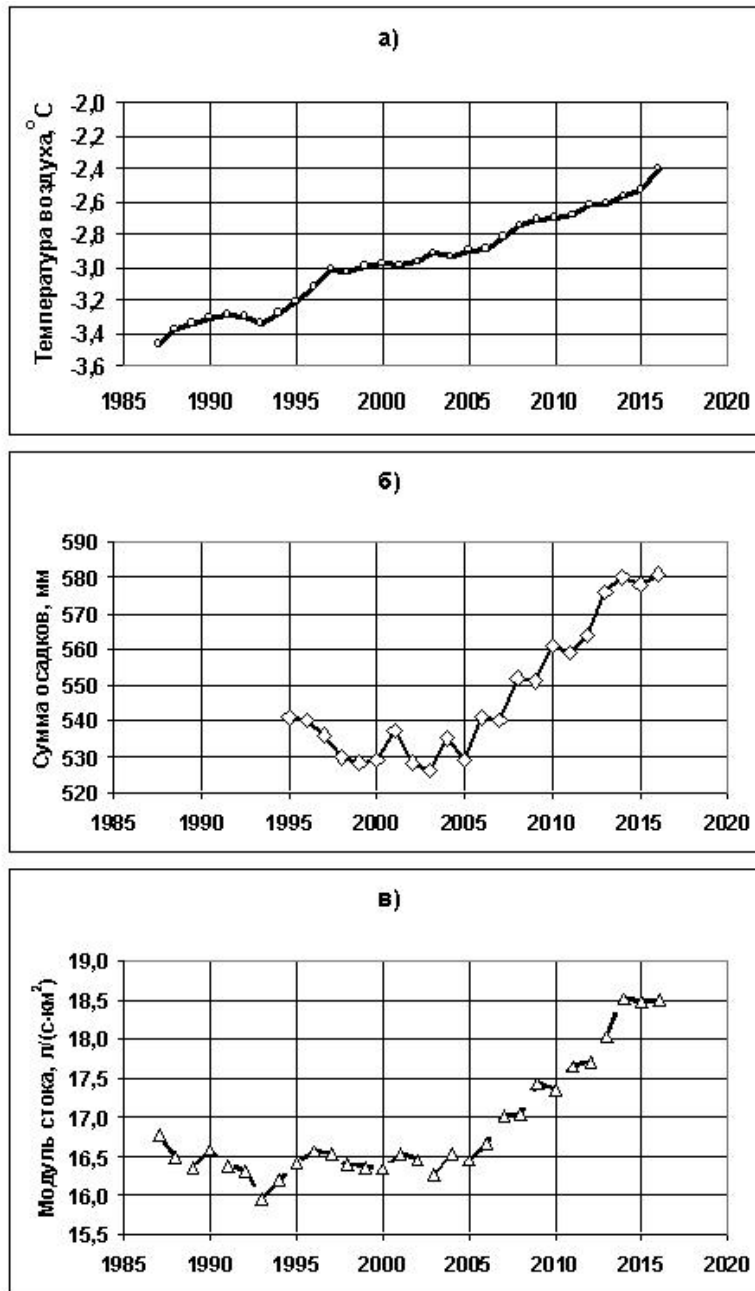


Рис. 5. Многолетний ход 30-летних скользящих средних температуры воздуха (а), годовой суммы осадков (б) в г. Магадане и модуля годового стока р. Дукчи в устье (в). По оси абсцисс – годы окончания 30-летних периодов осреднения [21].

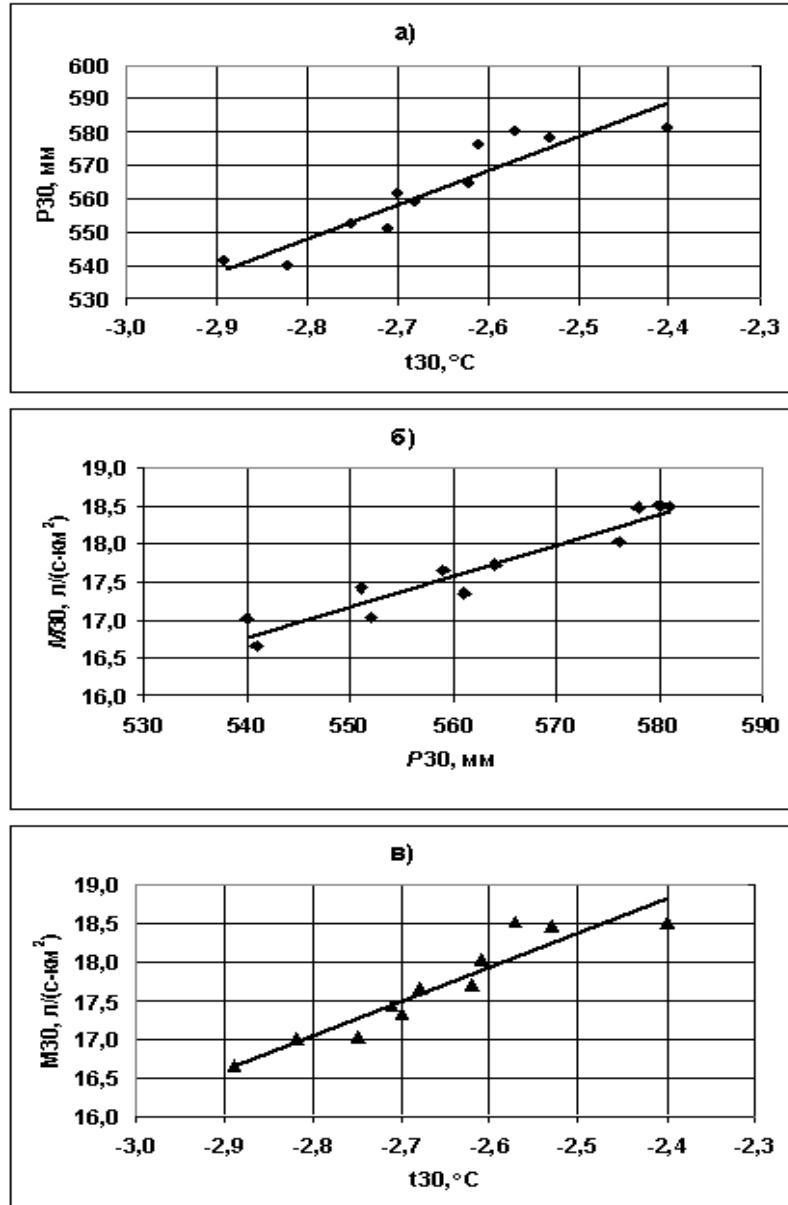


Рис. 6. Связи скользящих 30-летних средних: годовых сумм осадков со средними температурами воздуха за год в г. Магадане (а), модулей годового стока р. Дукчи в устье с годовыми суммами осадков (б) и температурой воздуха за год (в) [21].

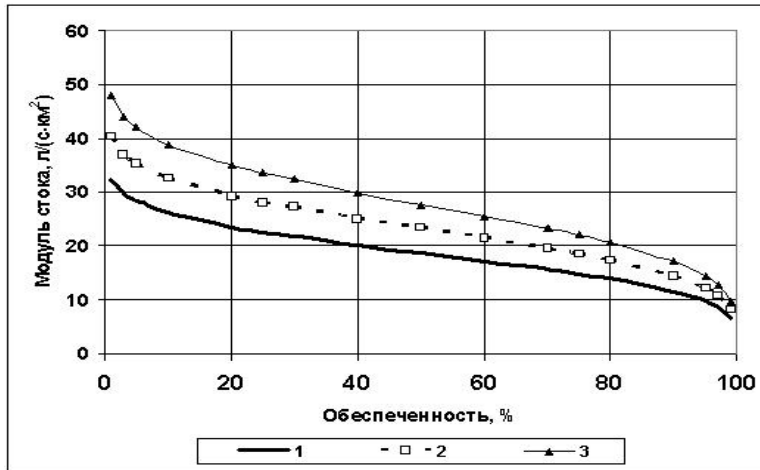


Рис. 7. Кривые обеспеченности модуля годового стока р. Дукчи в устье в современных условиях (1), при увеличении «нормы» среднегодовой температуры воздуха в г. Магадане на 1°C (2) и на 2°C (3) [21].

Для обеспечения г. Магадана питьевой водой используется каскад из двух водохранилищ на р. Каменушке. Ряд годового притока воды к этому каскаду также имеет статистически значимый тренд на повышение, который хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени (рис. 8) [22].

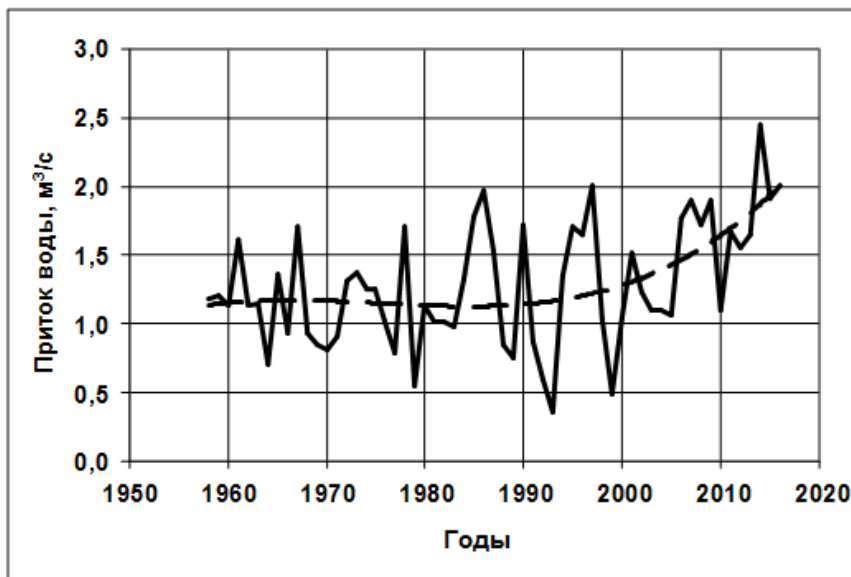


Рис. 8. Суммарный приток воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке (пунктиром проведена линия тренда) [22].

Температурный и ледовый режимы также отреагировали на потепление климата. Так в статье [23] проанализированы изменения в термическом режиме рек Верхней Колымы, расположенных в криолитозоне. Нормы сроков перехода температуры воды через $0,2^{\circ}\text{C}$ весной за последние три десятилетия сместились на 3–13 дней в сторону ранних. Средняя многолетняя температура воды в первой половине лета повысилась на $1,4\text{--}1,6^{\circ}\text{C}$. Осенью похолодание температуры воды ниже $0,2^{\circ}\text{C}$ происходит позже, в среднем на 9 дней. Все это согласуется с повышением норм температуры воздуха. Но во второй половине теплого сезона средняя многолетняя температура воды снизилась на $0,7\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 9). Такая аномальная реакция обусловлена вовлечением дополнительного объема охлажденной воды в речной сток из-за таяния вечной мерзлоты и расширения таликов в августе и сентябре.

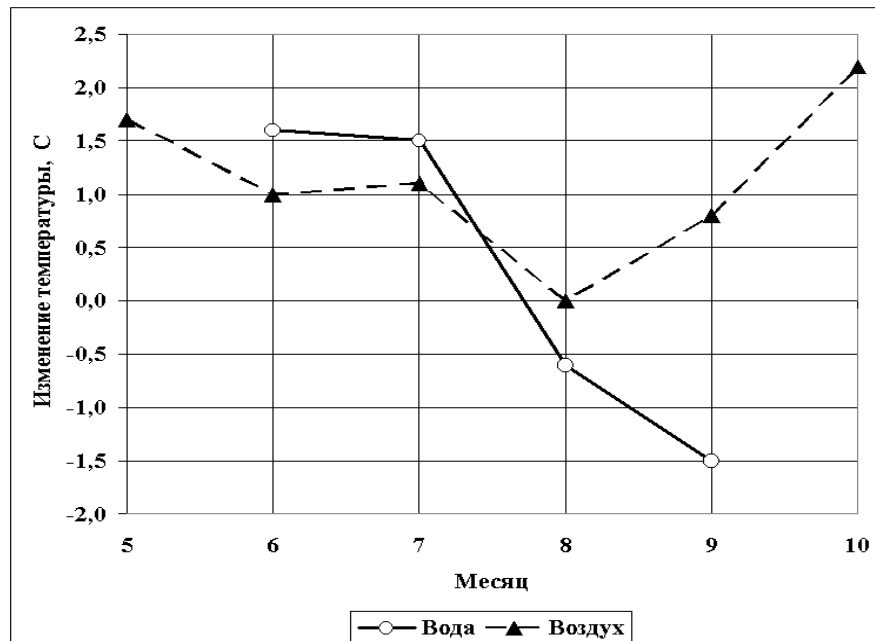


Рис. 9. Изменения среднемесячных температур воды и воздуха, рассчитанных за 1981–2010 гг. по отношению средним, рассчитанным по 1980 г. [23].

Климатические изменения «нормы» температуры воды за август–сентябрь ΔT хорошо связаны с размером водосбора (рис. 10) [24]

$$\Delta T = -1,54 \cdot 10^{-4} A - 0,17, \quad \text{коэффициент корреляции } r = 0,86, \quad (6)$$

где A — площадь водосбора, км^2 .

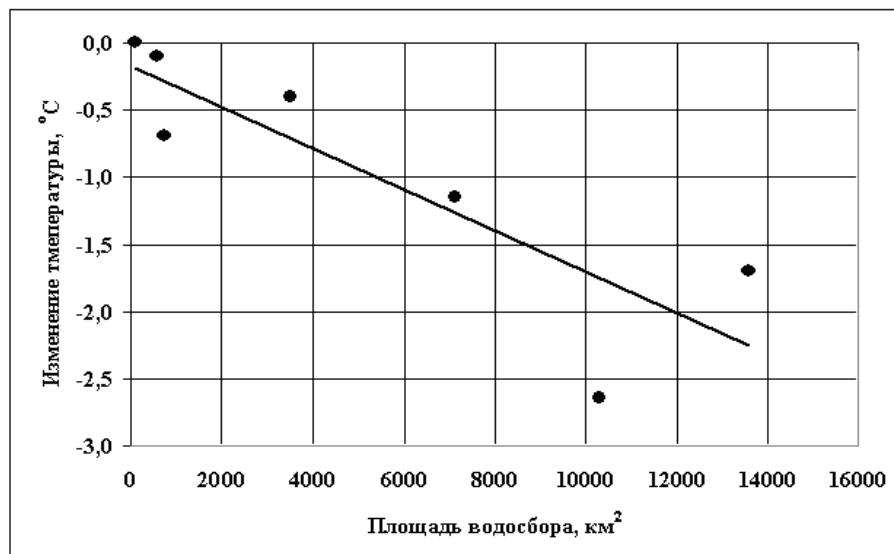


Рис. 10. Связь климатических изменений температуры воды за август-сентябрь с площадью водосбора на реках Верхней Колымы [24].

На рис. 10 показано, что с увеличением размеров водосбора охлаждение речных вод в августе-сентябре становится сильнее. Мы объясняем это тем, что крупные реки глубже врезаются в поверхность водосборного бассейна, а, значит, они больше отводят охлажденные воды приречных таликов, которые, как упоминалось выше, расширяются.

В исследовании [25] показано, что многолетние ряды вскрытия р. Колымы имеют тенденцию на понижение, которая обусловлена влиянием работы каскада водохранилищ, а также изменением климата, и имеют 9–10-летний цикл (рис. 11). А с конца прошлого века на р. Колыме позже стал образовываться ледостав (рис. 12) [26].

Хорошую визуализацию климатических изменений продолжительности ледового сезона (ПЛС) на реках Тауйской губы представляют совмещенные графики с динамикой температуры воздуха в Магадане в октябре и мае (рис. 13) [27]. Все эти характеристики выражены в 30-летних скользящих средних.

На рис. 13 видно, что рост температур воздуха в октябре, когда начинается ледообразование на реках, и в мае, когда реки освобождаются ото льда, отражается на ПЛС. Это утверждение подтверждается и графиком связи 30-летних скользящих средних годовых температур воздуха в Магадане и динамической средней продолжительности ледового сезона рек исследуемого региона (рис. 14).

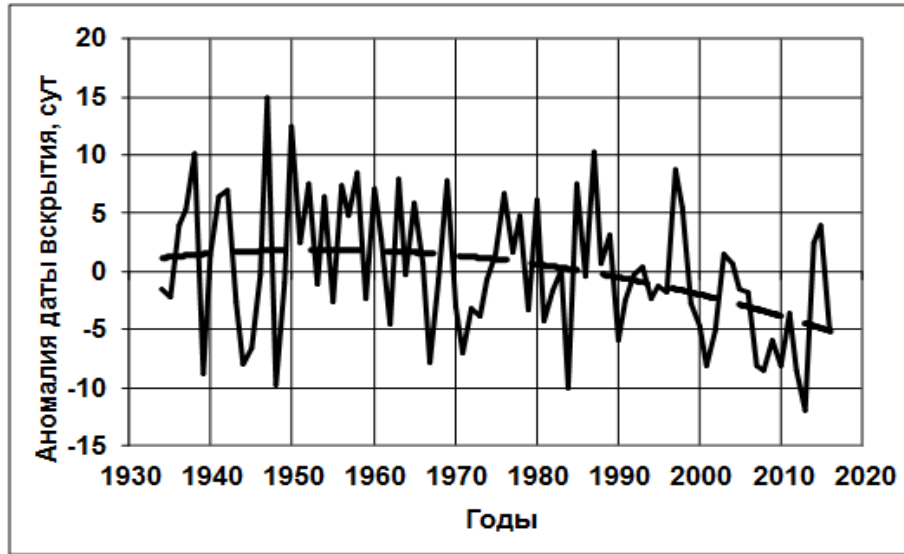


Рис. 11. Многолетние колебания средней динамической аномалии дат начала ледохода на р. Колыме [25]. Пунктиром проведена линия тренда.

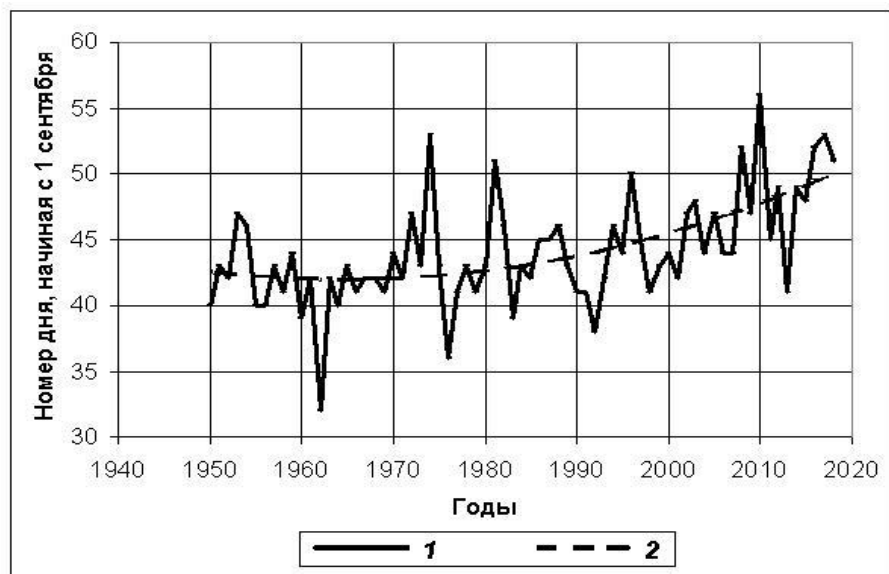


Рис. 12. Многолетний ход дат замерзания р. Колымы у г. Среднеколымска (1) и линия тренда (2) [26].

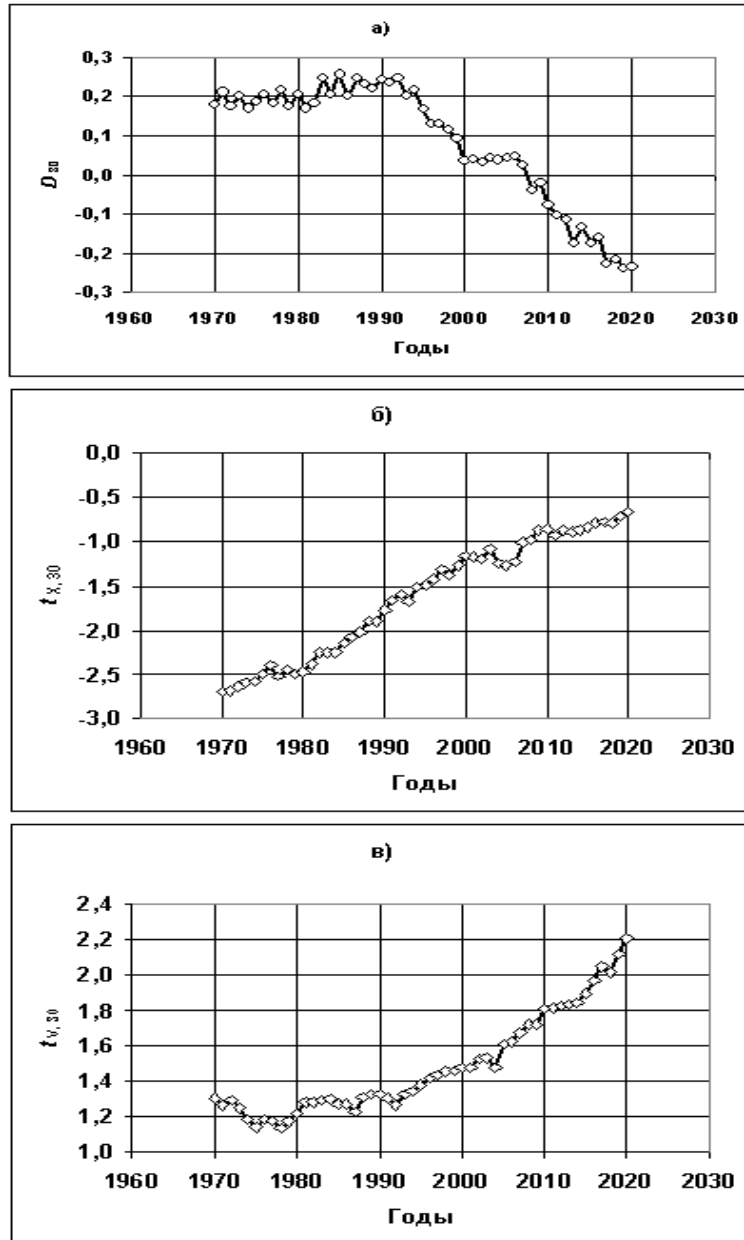


Рис. 13. Многолетняя динамика «норм» продолжительности ледового сезона на реках Тауйской губы (а), температуры воздуха в октябре (б) и мае (в) в Магадане, рассчитанным по скользящим 30-летиям [27].

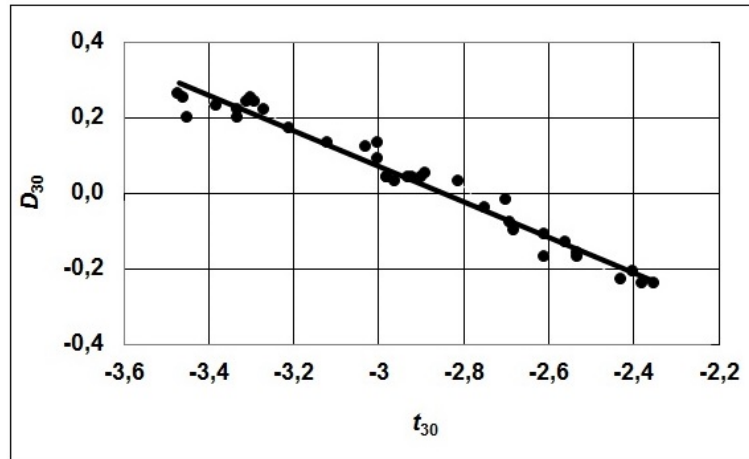


Рис. 14. Связь скользящих 30-летних динамической средней продолжительности ледового сезона D_{30} и 30-летних скользящих средних годовых температур воздуха в Магадане t_{30} [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были выявлены климатические изменения гидрологического режима рек Северо-Востока России.

Анализ временных рядов месячного притока воды в Колымское водохранилище показал, что за последние 30 лет годовой приток увеличился на 14%. Притоки за май, август и сентябрь выросли на 37, 31 и 38% соответственно. Увеличение притока в другие месяцы статистически не значимо. Прослеживается тенденция на увеличение максимального стока весеннего половодья и дождевых паводков. На участке Колымы ниже каскада ГЭС уменьшился летний сток, увеличился зимний, понизились максимальные расходы и уровни воды весеннего половодья и дождевых паводков. Из-за совместного влияния работы ГЭС и потепления климата появление осенних ледовых явлений и установление ледостава стали происходить значительно позже, а вскрытие раньше (сократилась продолжительность ледостава), заметно увеличился сток в мае. Благодаря тому, что весеннее половодье стало начинаться раньше, произошло увеличение стока в мае и уменьшение его в июне-июле. «Норма» стока за лимитирующий период существенно выросла – на 37,9 %. Этот прирост произошел главным образом в нелимитирующий сезон. Такие изменения будут способствовать повышению эффективности использования водных ресурсов.

Установлено увеличение речного стока рек Западной Чукотки. Это связано не только с ростом атмосферных осадков, но и с увеличением среднегодовых температур воздуха. Последнее приводит к вытаяванию накопленных в предшествующие годы многолетних снежников, каменных глетчеров, подземного льда и других составляющих гидрокриогенного резерва в горных арктических районах.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

За последние десятилетия увеличился годовой сток рек Северного Приохотоморья на 10–27 %, минимальный суточный сток увеличился на 8–53 %. Это вызвано в первую очередь ростом атмосферных осадков.

Нормы дат перехода температуры воды рек Верхней Колымы через 0,2°C весной за последние три десятилетия сдвинулись на 3–13 дней в сторону ранних. Среднегодовые температуры воды в первую половину лета повысились на 1,4–1,6°C. Осенью охлаждение температуры воды ниже 0,2°C наступает позже в среднем на 9 дней. Все это согласуется с повышением норм температуры воздуха. А вот во второй половине теплого периода среднегодовые температуры воды понизились на 0,7–1,5°C.

Многолетний ход продолжительности ледового сезона (ПЛС) на реках Тауйской губы имеет отрицательный тренд, обусловленный потеплением климата. Колебания ПЛС содержат циклы с периодом 3, 7, и 10 лет.

Происходящие климатические изменения необходимо учитывать в практике гидрологических расчетов и прогнозов, а также при оценке воздействия хозяйственных объектов на окружающую среду.

Список литературы

1. Израэль Ю.А., Груза Г.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. Изменение глобального климата. Роль антропогенных воздействий. Метеорология и гидрология, 2001, № 5. С. 5–22.
2. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO–No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. 26 p.
3. Сточкун Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический вестник. 2016. № 2. С. 84–96.
4. Ушаков М.В. Современные изменения термического режима холодного сезона на Российском Дальнем Востоке // Научные Ведомости БелГУ. Естественные науки. 2017. Вып. 39. № 11(260). С. 97–104.
5. Gartsman B. I., Lupakov S. Yu. Effect of Climate Changes on the Maximal Runoff in the Amur Basin: Estimation Based on Dynamic–Stochastic Simulation. // Journal Water Resources. 2017. No. 44(5). pp. 697–706.
6. Маргарян В.Г., Овчарук В.А., Голций М.В., Боровская Г.А. Сравнительный анализ и оценка многолетних колебаний максимального стока рек горных территорий Армении и Украины в условиях глобальных изменений климата // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. № 12(43). С. 61–75.
7. Shiklomanov A. I., Lammers R. B., Lettenmaier D. P., Polischuk Yu. M., Savichev O. G., Smith L. C., Chernokulsky A. V. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. Part of the Springer Environmental Science and Engineering book series (SPRINGERENVIRON). [Электрон. ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4569-8_4 (Дата обращения 11.08.2020).
8. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Повалишников Е.С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек российской Арктики // Сборник: Вопросы географии. / Под ред. В.М. Котлякова, Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабановой. Т. 245, 2018. С. 233–251.
9. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. Т. 7, № 1, 2021. С. 36–79.
10. Makarieva O., Nesterova N., Post D. A., Sherstyukov A. and Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost, The Cryosphere, 13, 2019. pp. 1635–1659, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>.

11. Север Дальнего Востока / Под ред. Н. А. Шило. М.: Наука, 1970. 487 с.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 282 с.
13. Ушаков М.В. О продолжающемся кризисе стационарной гидрологической сети на Северо-Востоке России / Роль стационарных наблюдений в современных географических исследованиях. Владивосток: ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 2022. С. 159–161.
14. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации–Мировой центр данных. [Электрон. ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/> (Дата обращения 13.01.2021).
15. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. V. 116. pp. 770–808.
16. Ушаков М.В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН ДВО РАН, 2013. № 2. С. 20–24.
17. Ушаков М.В., Лебедева Л.С. Климатические изменения режима формирования притока воды в Колымское водохранилище // Научные Ведомости БелГУ. Естественные науки. 2016. Вып. 37. № 25(246). С. 120–127.
18. Ушаков М.В. Характер климатических изменений внутригодового распределения стока Верхней Колымы // Общество, среда, развитие. 2021. № 2. С. 86–89
19. Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки // Криосфера Земли. 2020. т. XXIV. № 6. С. 33–44.
20. Ушаков М. В. Климатический отклик минимального летне-осеннего стока рек северного Приохотоморья // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. Т. 5(71). № 1. 2019. С. 238–246.
21. Ушаков М.В. Схема расчета ресурсов речных вод Примагаданья в условиях меняющегося климата // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2018. № 3. С. 76–79.
22. Ушаков М.В. Многолетние колебания годового притока воды к каскаду водохранилищ на реке Каменушке и их предвычисление // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 4. С. 139–145.
23. Ushakov M.V., Ukhov N.V. Modern Changes in the Thermal Regime of Mountain Rivers in the Permafrost Zone (A Case Study for the Upper Kolyma). Russian Meteorology and Hydrology. 2020, vol. 45, No. 12, pp. 858–863.
24. Ушаков М.В. Об аномальном отклике термического режима рек Верхней Колымы на глобальное потепление // Общество, среда, развитие. 2021. № 1. С. 140–142.
25. Ушаков М.В. Методика прогноза дат вскрытия верхнего судоходного участка р. Колыма в условиях нестационарности // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2018. № 1. С. 49–55.
26. Ушаков М.В. Прогноз сроков замерзания реки Колымы в условиях климатических и антропогенных изменений // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6(16), Вып. 4. С. 191–202.
27. Ушаков М.В. Продолжительность ледового сезона на реках Тауйской губы в условиях климатических изменений // Геополитика и геоэкодинамика регионов. 2022. Т.8. Вып. 2. С. 236–245.

CLIMATIC CHANGES IN THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE RIVERS IN THE NORTH-EAST OF RUSSIA

Ushakov M. V.

*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N. A. Shilo, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russian Federation
E-mail: mvilorich@narod.ru*

Modern global climate warming entails changes in the hydrological regime of rivers. In this paper, a brief review of the research of the North-Eastern Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N. A. Shilo, Far East Branch in the field of climatic changes in the hydrological regime of the rivers in the North-East of Russia for 2011–2022. The primary data were long-term observations on the network of the Russian Hydrometeorological Service. The initial series observations of the elements of the hydrological regime were

studied for the presence of a trend using the Student and Hurst criterions. The series were also subjected to low-pass filtering using the 30-year moving average method. Time series analysis of the monthly water inflow to the Kolyma reservoir showed that over the past 30 years, the annual inflow has increased by 14%. Inflows for May, August and September increased by 37%, 31% and 38% respectively. The increase in inflow in other months is not statistically significant. There is a trend towards an increase in the maximum runoff of spring floods and rain floods. In the Kolyma section downstream of the HPP cascade, the summer runoff decreased, the winter runoff increased, and the maximum discharges and water levels during spring floods and rain floods decreased. Due to the combined influence of the operation of the HPP and climate warming, the appearance of autumn ice phenomena and the establishment of freeze-up began to occur much later, and the break-up earlier (the duration of freeze-up was reduced), the runoff increased noticeably in May. Due to the fact that the spring flood began to begin earlier, there was an increase in runoff in May and a decrease in it in June-July. The "norm" of the runoff for the limiting period increased significantly – by 37.9%. This increase occurred mainly in the non-limiting season. Such changes will improve the efficiency of water use. An increase in the river runoff of the rivers of Western Chukotka has been established. This is due not only to an increase in precipitation, but also to an increase in average annual air temperatures. The latter leads to the thawing of perennial snowfields, stone glaciers, underground ice and other components of the hydrocryogenic reserve accumulated in previous years in the mountainous Arctic regions. Over the past decades, the annual runoff of the rivers of the Northern Okhotsk region has increased by 10–27%, the minimum daily runoff has increased by 8–53%. This is primarily due to the increase in precipitation. The norms for the dates of the transition of the water temperature of the rivers of the Upper Kolyma through 0.2 °C in the spring over the past three decades have shifted by 3–13 days towards the early ones. Average long-term water temperatures in the first half of summer increased by 1.4–1.6°C. In autumn, the cooling of water temperature below 0.2°C occurs later, on average, by 9 days. All this is consistent with the increase in air temperature norms. But in the second half of the warm period, the average long-term water temperatures dropped by 0.7–1.5°C. The long-term course of the duration of the ice season on the rivers of the Tauy Bay has a negative trend due to climate warming. Fluctuations contain cycles with a period of 3, 7, and 10 years. The ongoing climate change must be taken into account in the practice of hydrological calculations and forecasts, as well as in assessing the impact of economic facilities on the environment.

Keywords: climate change, hydrological regime, river flow, water temperature, ice drift, freeze-up.

References

1. Izrael Yu.A., Gruza G.V., Kattsov V.M., Meleshko V.P. *Izmeneniye global'nogo klimata. Rol' antropogennykh vozdeystviy (Global climate change. The role of anthropogenic influences)*. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2001, no. 5, pp. 5–22. (in Russian).
2. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO–No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. 26 p.

3. Stochkute YU. V., Vasilevskaya L. N. *Mnogoletnie izmeneniya temperatury vozduha i pochvy na krajnem severo-vostoke Rossii (Long-term changes in air and soil temperature in the extreme north-east of Russia)*. Geograficheskij vestnik, 2016, no 2, pp. 84–96. (in Russian).
4. Ushakov M. V. *Sovremennyye izmeneniya termicheskogo rezhima kholodnogo sezona na Rossiyskom Dal'nem Vostoke (Modern changes in the thermal regime of the cold season in the Russian Far East)*. Nauchnyye Vedomosti BelGU. Yestestvennyye nauki. 2017. Iss. 39, no. 11(260), pp. 97–104. (in Russian).
5. Gartsman B. I., Lupakov S. Yu. *Effect of Climate Changes on the Maximal Runoff in the Amur Basin: Estimation Based on Dynamic–Stochastic Simulation*. Journal Water Resources. 2017, no. 44(5), pp. 697–706.
6. Margaryan V. G., Ovcharuk V. A., Goltsiy M. V., Borovskaya G. A. *Sravnitel'nyy analiz i otsenka mnogoletnikh kolebaniy maksimal'nogo stoka rek gornyykh territoriy Armenii i Ukrainy v usloviyakh global'nykh izmeneniy klimata (Comparative analysis and assessment of long-term fluctuations in the maximum flow of rivers in the mountainous territories of Armenia and Ukraine under global climate change)*. Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy. 2020, no. 12(43), pp. 61–75. (in Russian).
7. Shiklomanov A. I., Lammers R. B., Lettenmaier D. P., Polischuk Yu. M., Savichev O. G., Smith L. C., Chernokulsky A. V. *Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections*. Part of the Springer Environmental Science and Engineering book series (SPRINGERENVIRON). [Electron. resource] URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4569-8_4 (application: 08.11.2020).
8. Frolova N. L., Magritsky D. V., Kireeva M. B., Agafonova S. A., Povalishnikova E. S. *Antropogennye i klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya stoka vody i ledovykh javleniy rek rossijskoj Arktiki (Anthropogenic and climatically determined changes in water flow and ice phenomena in the rivers of the Russian Arctic)*. Sbornik: Voprosy geografii. Vol. 245 (Ed. V.M. Kotlyakova, N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova), 2018, pp. 233–251. (In Russian).
9. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. *Vliyanie izmeneniya klimata na godovoy i maksimal'nyy stok rek Rossii: oценка i prognoz (Influence of climate change on the annual and maximum runoff of Russian rivers: assessment and forecast)*. Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2021. Vol. 7, no. 1, 2021, pp. 36–79. (In Russian).
10. Makarieva O., Nesterova N., Post D. A., Sherstyukov A. and Lebedeva L.: *Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost*. The Cryosphere, 13, 2019, pp. 1635–1659, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>.
11. Sever Dal'nego Vostoka (North of the Far East) / Ed. N. A. SHilo. Moscow, Nauka (Publ.), 1970. 487 p. 12.
12. Resursy poverhnostnykh vod SSSR. T. 19. Severo-Vostok (Surface water resources of the USSR. Vol. 19. Northeast). Leningrad, Gidrometeoizdat (Publ.). 1969, 282 p.
13. Ushakov M. V. *On the ongoing crisis of the stationary hydrological network in the North-East of Russia (The role of stationary observations in modern geographical research)*. Conf. Vladivostok: Pacific Institute of Geography FEB RAS, 2022, pp. 159–161. (In Russian).
14. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center. [Electron. resource] URL: <http://meteo.ru/data/> (application: 01/13/2021). (In Russian).
15. Hurst H. E. *Long-term storage capacity of reservoirs*. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. V. 116, pp. 770–808.
16. Ushakov M. V. *Vliyaniye Kolymskoy GES i klimaticheskikh izmeneniy na gidrologicheskiy rezhim r. Kolyma (Influence of the Kolyma HPP and climate change on the hydrological regime of the Kolyma River)*. Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN. 2013, no. 2, pp. 20–24.
17. Ushakov M. V., Lebedeva L. S. *Klimaticheskiye izmeneniya rezhima formirovaniya pritoka vody v Kolymskoye vodokhranilishche (Climatic changes in the regime of formation of water inflow into the Kolyma reservoir)*. Nauchnyye Vedomosti BelGU. Yestestvennyye nauki. 2016. Iss. 37, no. 25(246), pp. 120–127. (In Russian).
18. Ushakov M. V. *Kharakter klimaticheskikh izmeneniy vnutrigodovogo raspredeleniya stoka Verkhney Kolymy (The nature of climatic changes in the intra-annual distribution of runoff in the Upper Kolyma)*. Obshchestvo, sreda, razvitiye. 2021, no. 2, pp. 86–89. (In Russian).

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

19. Glotov V. E., Ushakov M. V. Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya stoka zapolyarnykh rek Zapadnoy Chukotki (Climatically conditioned changes in the runoff of the polar rivers of Western Chukotka). *Kriosfera Zemli*. 2020, Vol. XXIV, no. 6, pp. 33–44. (In Russian).
20. Ushakov M. V. Klimaticheskiy otklik minimal'nogo letne-osennego stoka rek severnogo Priokhotomor'ya (Climatic response of the minimum summer-autumn runoff of the rivers of the northern Okhotsk region). *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019. Vol. 5(71), no 1, pp. 238–246. (In Russian).
21. Ushakov M. V. Skhema rascheta resursov rechnykh vod Primagadan'ya v usloviyakh menyayushchegosya klimata (Scheme for calculating the resources of river waters in Primagadanya in a changing climate). *Ispol'zovaniye i okhrana prirodnykh resursov v Rossii*. 2018, no 3, pp. 76–79. (In Russian).
22. Ushakov M. V. Mnogoletniye kolebaniya godovogo pritoka vody k kaskadu vodokhranilishch na reke Kamenushke i ikh predvychisleniye (Long-term fluctuations of the annual water inflow to the cascade of reservoirs on the Kamenushka River and their prediction). *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*. 2018, no. 4. pp. 139–145. (In Russian).
23. Ushakov M. V., Ukhov N. V. Modern Changes in the Thermal Regime of Mountain Rivers in the Permafrost Zone (A Case Study for the Upper Kolyma). *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, vol. 45, no. 12, pp. 858–863.
24. Ushakov M. V. Ob anomal'nom otklike termicheskogo rezhima rek Verkhney Kolymy na global'noye potepeniye (On the anomalous response of the thermal regime of the Upper Kolyma rivers to global warming). *Obshchestvo, sreda, razvitiye*. 2021, no. 1, pp. 140–142. (In Russian).
25. Ushakov M. V. Metodika prognoza dat vskrytiya verkhnego sudokhodnogo uchastka r. Kolyma v usloviyakh nestatsionarnosti (Methodology for predicting the dates of the opening of the upper navigable section of the river. Kolyma in conditions of non-stationarity). *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN*. 2018, no. 1, pp. 49–55. (In Russian).
26. Ushakov M. V. Prognoz srokov zamerzaniya reki Kolymy v usloviyakh klimaticheskikh i antropogennykh izmeneniy (Forecasting the timing of freezing of the Kolyma River under conditions of climatic and anthropogenic changes). *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*. 2020. Vol. 6(16), iss. 4, pp. 191–202. (In Russian).
27. Ushakov M. V. Prodolzhitel'nost' ledovogo sezona na rekakh Tauyskoy guby v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy (The duration of the ice season on the rivers of the Tauyskaya Bay under the conditions of climatic changes). *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*. 2022. Vol.8, iss. 2, pp. 236–245. (In Russian).

Поступила в редакцию 16.02.2023 г.