

ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЛЕТНЕЙ И СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА В ВЕРШИНЕ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ р. ОНЕГИ

© 2025 г. А. А. Сапожникова^а, *, О. В. Горелиц^а

^аГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, 119034 Россия

*e-mail: asapozhnikova@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 05.07.2024 г.

Представлена характеристика режима стока р. Онеги и его элементов в вершине устьевой области за 80 лет. Проведен анализ многолетней и сезонной изменчивости стока, и дана характеристика его внутригодового распределения. Выполнена статистическая обработка многолетних рядов максимальных расходов весенне-го половодья и дождевых паводков, минимальных меженных расходов летне-осеннего и зимнего периодов. Выявлены закономерности многолетних колебаний годового и сезонного стока, характерных расходов воды. Анализ изменения элементов стока основывался на выявлении общих многолетних трендов и сравнении расчетных параметров по периодам, выделенным с помощью разностно-интегральных кривых и хронологических графиков. Отмечены особенности изменчивости стока р. Онеги, связанные с климатическими изменениями, начавшимися в 1980-е гг. Особое внимание в работе уделено режиму стока в XXI в.

Ключевые слова: устьевая область, расход воды, изменчивость, восстановление расходов, статистические параметры.

DOI: 10.31857/S0321059625010023 EDN: UZBVLT

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях на фоне наблюдающихся климатических изменений внимание исследователей привлекает арктический регион, в частности – водно-ресурсный потенциал рек бассейна Северного Ледовитого океана. Комплексные индикаторы изменчивости гидрологического режима северных рек, антропогенной нагрузки в пределах водосборных бассейнов, а также динамики показателей состояния прибрежных морских вод – устьевые области рек. Устья северных рек – ключевые звенья в развитии морского транспорта и судоходства по Северному морскому пути. Объектом настоящего исследования выступает р. Онега – одна из четырех крупнейших рек Севера Европейской территории России (ЕТР) и самая малая среди них по площади водосбора. В то же время бассейн Онеги – один из наиболее изученных. Густота наблюдательной сети и длительные периоды работы пунктов наблюдения позволяют провести детальный анализ изменения элементов стока за многолетний период.

Сток р. Онеги, поступающий в ее устьевую область и далее в Онежский залив Белого моря, формируется на водосборе, площадь которого составляет 56 900 км². Особенность бассейна Онеги – его меридиональное расположение, что обуславливает более тесную связь гидрологического режима с региональными климатическими изменениями [19]. Характеристика водного режима в вершине устьевой области составлена по данным наблюдений на гидрологическом посту р. Онега – с. Порог, расположенном в 31 км от устьевого створа [18]. В 100 м ниже поста начинается участок Кокоринских порогов, которые принято считать верхней границей устьевой области р. Онеги, так как выше них приливно-отливные и сгонно-нагонные колебания уровня моря не распространяются [9].

В бассейне р. Онеги мало крупных населенных пунктов и промышленных предприятий, требующих значительных объемов воды для коммунального водоснабжения и обеспечения непрерывного производственного цикла. Изменчивость основных параметров гидрологического режима устьевой области реки прак-

тически полностью определяется природными факторами [3].

Цель данной работы – провести анализ многолетней и сезонной изменчивости стока р. Онеги и дать характеристику его внутригодовому распределению за период 1943–2021 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходной информации для выполнения работы использованы данные ежедневных наблюдений за расходом и уровнем воды р. Онеги, полученные из гидрологических ежегодников за 1936–2021 гг. [1, 2, 4, 5], и основные сведения о водном режиме рек водосборного бассейна, содержащиеся в [6, 10–15].

Регулярные гидрологические наблюдения в устьевой области р. Онеги были начаты в 1910-х гг., гидрологический пост (г/п) р. Онега – с. Порог был открыт в 1912 г., однако данные наблюдений за стоком в вершине устьевой области доступны лишь с 1943 г.

Величины среднесуточных расходов, содержащиеся в ежегодниках, вычислялись по основной кривой $Q = f(H)$, построенной по измерениям за период 1949–1954 гг. с ежегодным уточнением по данным новых измерений [1].

С 1993 г. в Гидрологических ежегодниках данные по стоку на г/п р. Онега – с. Порог публикуются только за период открытого русла (май–октябрь), с 2005 по 2011 г. данные отсутствуют. Причина этого, как указано в [5] – отсутствие измерений расходов воды или их пониженная точность, а также сомнительные отметки уровней в зимние месяцы из-за сложной ледовой обстановки.

Для анализа водного режима р. Онеги за многолетний период, включая последние десятилетия, годовой сток на г/п р. Онега – с. Порог с 1994 г. был восстановлен с помощью программных средств автоматизации гидрологических расчетов для изученных и недостаточно изученных бассейнов “HydroStatCalc–2012”, разработанных в Государственном гидрологическом институте в соответствии с СП 33–101–2003 [16, 17]. Для восстановления значений средних

годовых расходов воды применен аппарат множественной корреляции с использованием рядов расходов воды по рекам-аналогам.

В качестве рядов-аналогов использованы данные наблюдений на гидрологических постах бассейна р. Онеги, расположенных выше по течению на основном водотоке – в д. Надпорожский Погост, д. Череповская и д. Казаково и на правом притоке – р. Волошке в д. Тороповской. Статистические характеристики данных расчетного ряда и ряда-аналога за совместный период наблюдений показали хорошее соответствие установленным критериям связи [16, 17] (коэффициент корреляции $R \approx 0.9$), что позволило восстановить средние годовые расходы воды на г/п р. Онега – с. Порог за 1994–2021 гг.

В результате выполненной процедуры восстановления получен 80-летний ряд средних годовых расходов воды за 1943–2021 гг. Далее ряд восстановленных значений был вручную проверен и скорректирован с использованием зависимости среднемесячных расходов воды от уровней за весь период наблюдений на г/п р. Онега – с. Порог, а также с привлечением данных наблюдений на г/п р. Онега – с. Турчасово за период 2008–2021 гг. [1, 2, 4, 5]. С целью выявления и исключения возможных ошибок в записи рядов данных, а также величин расходов с признаками генетической неоднородности полученный многолетний ряд средних годовых расходов воды р. Онеги был проверен на однородность по критериям Смирнова–Граббса и Диксона для экстремальных значений выборки и на стационарность по критериям Стьюдента для средних значений и Фишера для дисперсии.

Проверка ряда за период 1943–2021 гг. по всем критериям при установленном уровне значимости 5% дала положительные результаты, поэтому он был использован для дальнейшего анализа и статистических расчетов.

Для этих рядов рассчитаны линейные тренды. Статистическая значимость трендов оценивалась по критерию Стьюдента в одностороннем тесте с учетом автокорреляции в рядах [7].

Эта методика восстановления рядов расходов воды и их статистическая обработка были также

применены для анализа данных наблюдений за характерными расходами воды межени и половодья.

ГОДОВОЙ СТОК И ВНУТРИГODOVОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Средний многолетний расход воды р. Онеги в вершине устьевой области составляет $507 \text{ м}^3/\text{с}$, объем стока — 16 км^3 .

В ходе среднегодовых расходов воды за весь рассматриваемый период выявлена общая тенденция к увеличению (рис. 1). Коэффициент линейного тренда составляет $10 \text{ м}^3/\text{с} / 10 \text{ лет}$, что значимо на 5%-м уровне.

Анализ разностно-интегральной кривой (РИК) показал перелом в многолетнем ряду в 1988–1989 гг. (рис. 2). С 1989 г. отмечено повышение водности. Средний годовой расход за этот период увеличился на $40 \text{ м}^3/\text{с}$ по сравнению с предыдущим периодом 1943–1988 гг. (рис. 1).

Увеличение годового стока за последние 30 лет составляет $> 1 \text{ км}^3$.

Диапазон изменения средних годовых расходов воды за период 1943–1988 гг. составляет $429 \text{ м}^3/\text{с}$, а за период 1989–2021 гг. — $483 \text{ м}^3/\text{с}$. Однако межгодовая изменчивость стока более ярко выражена до начала 1970-х гг. (рис. 1, 2).

По РИК можно выделить несколько периодов повышенной и пониженной водности, но их границы выражены недостаточно четко ввиду того, что в пределах практически каждого периода наблюдается кратковременное резкое увеличение или снижение годовых расходов.

Распределение величин средних годовых расходов весьма неравномерно (рис. 1). Минимальный среднегодовой расход воды равен $309 \text{ м}^3/\text{с}$ (1960 г.). Максимальный среднегодовой расход за период непрерывных (круглогодичных) инструментальных наблюдений равен $738 \text{ м}^3/\text{с}$ (1966 г.). Наибольший за весь период наблюде-

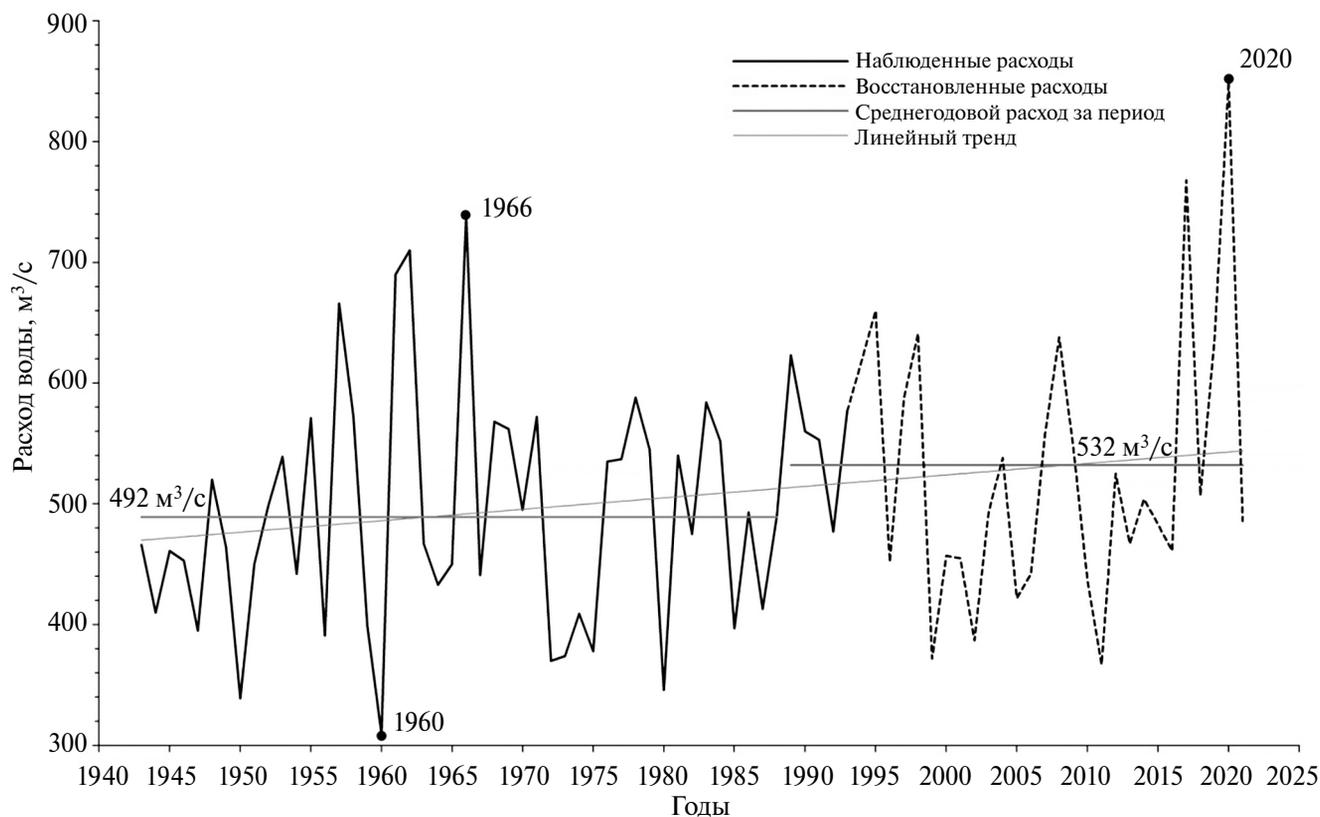


Рис. 1. Многолетние колебания средних годовых расходов воды на г/п р. Онега — с. Порог за период 1943–2021 гг.

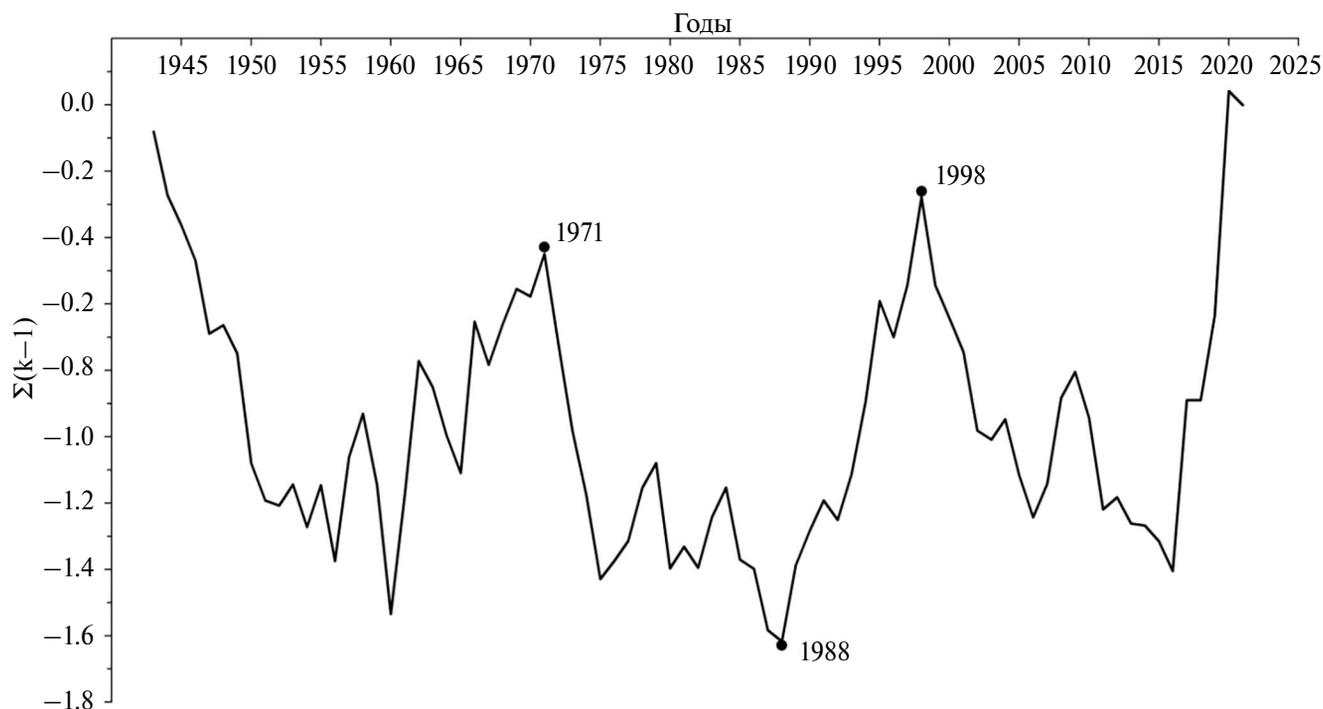


Рис. 2. Разностно-интегральная кривая средних годовых расходов воды на г/п р. Онега – с. Порог за период 1943–2021 гг.

ний – восстановленный среднегодовой расход в 2020 г., равный $850 \text{ м}^3/\text{с}$.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) средних годовых расходов воды составляет $104 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом внутри многолетнего ряда наблюдений 1943–2021 гг. можно выделить три периода с разной степенью разброса средних годовых расходов (табл. 1).

Для расходов 1943–1966 и 1999–2021 гг. характерна тенденция к увеличению и большая изменчивость по сравнению с 1967–1998 гг. Наибольшее СКО последнего десятилетия (2011–2021 гг.) объясняется значительным ростом средних годовых расходов с 2011 по 2021 г. (рис. 1). Приведенные в табл. 1 статистические

параметры этого периода отражают лишь изменения в величинах годового стока и не могут быть использованы для статистических оценок ввиду малой длины ряда (11 лет).

На основе многолетних данных о стоке на г/п р. Онега – с. Порог рассчитаны значения среднего годового расхода воды разной обеспеченности (табл. 2).

Из статистических расчетов исключена величина годового расхода 2020 г. В этом году наблюдались исключительные условия формирования стока. Имело место превышение среднемноголетних расходов во все месяцы, а зимние и осенние среднемесячные расходы были выше средних многолетних в 2–4 раза. В литературных

Таблица 1. Статистические характеристики годового стока р. Онега – с. Порог за разные периоды наблюдений

Период, годы	Средний многолетний расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	Среднее квадратическое отклонение (СКО), $\text{м}^3/\text{с}$	Коэффициент вариации C_v
1943–2021	507	104	0.20
1943–1966	493	114	0.23
1967–1998	513	86	0.17
1999–2021	513	117	0.23
2011–2021	550	144	0.26

Таблица 2. Параметры аналитической кривой обеспеченности средних годовых расходов воды на г/п р. Онега – с. Порог

Модуль стока, л/с км ²	C_v	C_s / C_v	Расходы воды различной обеспеченности, м ³ /с									
			1 %	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	97%	99%
9.0	0.19	2.5	761	674	631	563	495	433	385	358	340	312

и архивных материалах отсутствуют данные об исторических экстремумах средних годовых расходов. Поэтому экстремальному расходу 850 м³/с не было поставлено в соответствие значение обеспеченности, находящееся за границами периода наблюдений на г/п р. Онега – с. Порог.

Средние месячные величины расхода с ноября по апрель за период 1993–2021 гг. восстановлены вручную по данным наблюдений на постах-аналогах и среднемесячным уровням воды на г/п р. Онега – с. Порог.

Основной источник питания р. Онеги – талые снеговые воды [15]. Для данного бассейна характерно неравномерное внутригодовое распределение стока, и эта неравномерность разная в разных частях бассейна. Типовой гидрограф стока характеризуется однопиковым половодьем, незначительным повышением расхода воды в период осенних паводков и низкой зимней меженью. По оценкам авторов статьи величины сезонного стока за многолетний период, на весну (апрель–июнь) приходится более половины (53%) объема годового стока, при этом 32% – майский сток. На период летне-осенней межени (июль–ноябрь) приходится 34% стока, а доля зимнего (декабрь–март) стока составляет 13% годового объема.

Форма волны половодья на спаде более пологая, чем на подъеме, что свидетельствует в том числе о регулирующей роли проточных озер в бассейне Онеги. Озера выполняют роль аккумуляторов стока в период половодья, срабатывая накопленную воду в межень и тем увеличивая долю межненного стока [15].

В результате актуализации рядов наблюдений за стоком р. Онеги получены уточненные характеристики внутригодового распределения стока воды. Наибольшие среднемесячные расходы воды в вершине устьевой области наблюдаются в мае. Максимальная величина (3557 м³/с) зафиксирована в мае 1997 г. Минимальные среднемесячные расходы приурочены к марту.

Наименьшая величина 71 м³/с зафиксирована в марте 2006 г. Расходы летне-осенней межени в 2 раза превышают расходы зимней межени. Среднемноголетний расход воды в июле–ноябре равен 407 м³/с, а декабре–марте – 204 м³/с. Минимальные среднемесячные расходы в период открытого русла наблюдаются в августе и составляют 320 м³/с. При этом расход летне-осенней межени имеет очень большой разброс величин – от 116 до 1250 м³/с. Меженные расходы возрастают в периоды прохождения паводков. Чаще всего наблюдаются осенние паводки с пиком в октябре, среднемесячный расход воды за 1943–2021 гг. составляет 485 м³/с.

Анализ сезонного стока р. Онеги показал, что за период наблюдений 1943–2021 гг. на фоне общего роста водности реки выявлены тенденции увеличения стока летне-осенней и зимней межени. Линейные тренды составляют 0.14 км³/10 лет в летне-осеннюю межень (статистически значимо на 10%-м уровне) и 0.20 км³/10 лет в зимнюю межень (статистически значимо на 1%-м уровне) (рис. 3).

Сток летне-осенней межени за период 2006–2021 гг. увеличился на ~1 км³ по сравнению с 1943–2005 гг. и составил 6.0 км³. Это произошло в основном за счет полуторакратного увеличения стока в ноябре. Одновременно зимний сток увеличился на 1.4 км³ и составил 3.3 км³. Увеличение стока в ~2 раза связано с высокой водностью зимы 2006/2007 гг. и осени–зимы 2019/2020 гг. вследствие положительных аномалий температуры воздуха и суммы осадков в бассейне [8]. В 2006 г. сток зимней межени составлял 7.4 км³, в 2019 г. – 6.7 км³ (табл. 3). Методом количественной оценки выбросов (тест Граббса) при проведении статистического анализа ряда величин зимнего стока данные 2006 и 2019 гг. последовательно идентифицированы как выбросы.

Сток межненного периода с июля по март характеризуется повышенной изменчивостью. Коэффициенты вариации C_v зимнего и летне-

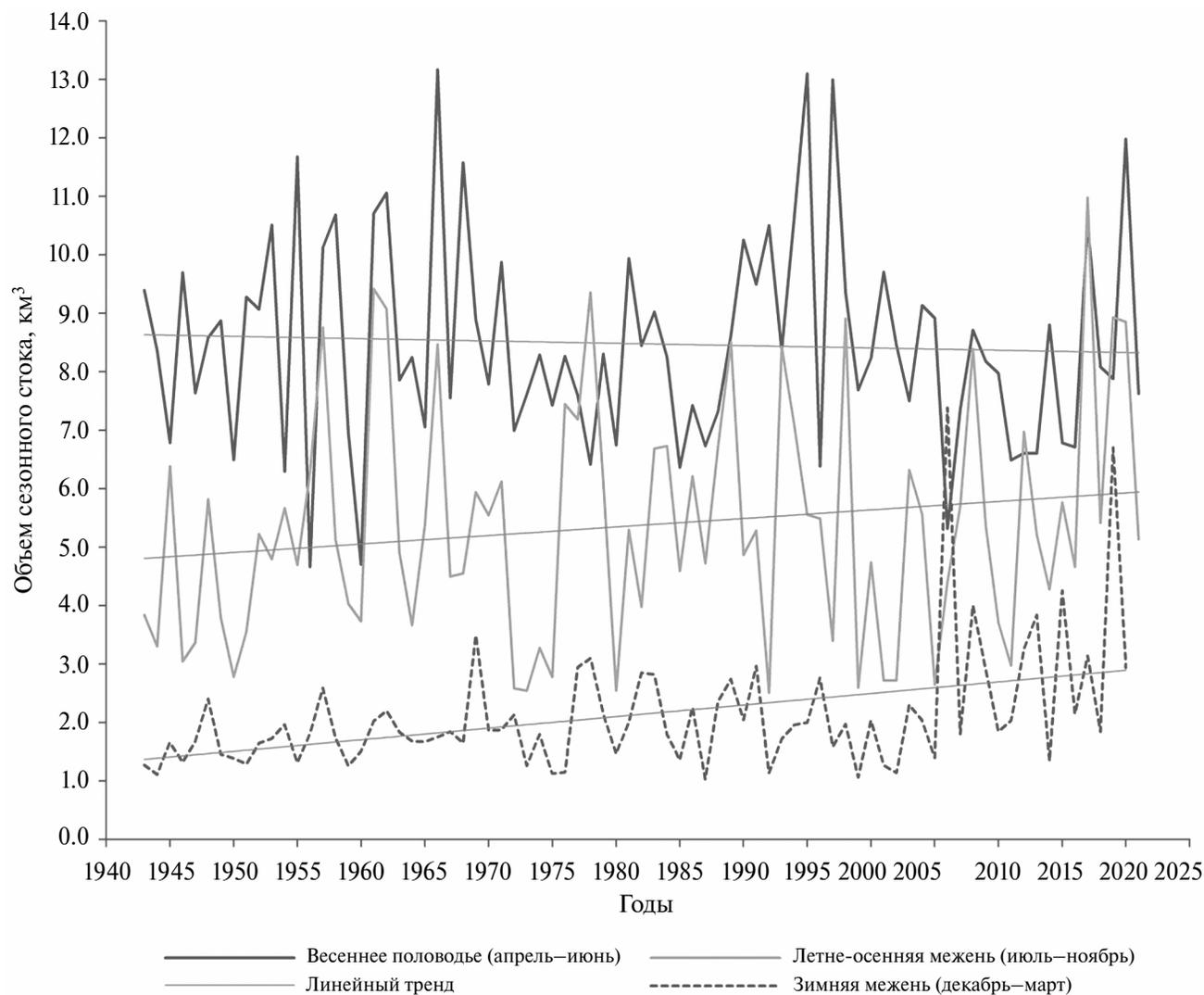


Рис. 3. Сезонный сток на г/п р. Онега – с. Порог за 1943–2021 гг.

Таблица 3. Характерные значения сезонного стока на г/п р. Онега – с. Порог за 1943–2021 гг.

Значение	Половодье (IV–VI)		Летне-осенняя межень (VII–XI)		Зимняя межень (XII–III)	
	км ³	год	км ³	год	км ³	год
Среднее	8.5	1966	5.4	2017	2.0	2015 (2006)
Наибольшее	13.2		11		4.3 (7.4)	
Наименьшее	4.7	1956, 1960	2.5	1973, 1980, 1992	1.0	1987
Среднее квадратическое отклонение (СКО)	1.8		2.0		0.7*	
C_v	0.21		0.38		0.36*	

*Статистическая величина рассчитана без учета экстремальных значений 2006 и 2019 гг.

осеннего стока превышают C_v годового и весеннего стока в ~2 раза и составляют 0.36 и 0.38 соответственно. Это может быть вызвано влиянием осенних паводков.

Сток весеннего (апрель—июнь) половодья остается относительно стабильным, наблюдается лишь незначительное его снижение. Для последних 15 лет рассматриваемого периода характер-

ны изменения распределения месячных объемов стока внутри этого сезона. Доля майского стока уменьшилась на 8%, объем стока снизился с 5.3 (1943–2005 гг.) до 4.4 км³ (2006–2021 гг.). Сток апреля увеличился на 0.6 км³.

Оценка величины сезонного стока в среднем за период 2006–2021 гг. относительно величины предшествующего периода 1943–2005 гг. показывает уменьшение доли весеннего стока с 55 до 46% и увеличение зимнего стока с 12 до 19% годового. Доля летне-осеннего стока возросла незначительно – с 33 до 35%. На фоне увеличения доли зимнего стока сохраняется четкое распределение расхода внутри сезона с максимальной величиной в декабре и минимальной в марте.

Изменение характеристик стока внутри года, особенно в зимний период, связано с особенностями климатического режима водосбора Онеги [18]. За последние десятилетия наблюдается увеличение средних месячных значений температуры воздуха. Повышение температуры воздуха в декабре приводит к частым оттепелям, что вызывает увеличение водоотдачи из снежного покрова в холодный период. Повышение температуры воздуха за последние десятилетия в апреле и ноябре способствовало более позднему установлению и более раннему сходу снежного покрова [8, 19].

В сезонном распределении стока в годы разной водности имеются различия (табл. 4). С уменьшением водности года увеличивается доля весеннего стока и уменьшается доля летне-осеннего и зимнего (незначительно). Значи-

тельная доля летне-осеннего стока в многоводные и средние по водности годы обусловлена регулирующим влиянием проточных озер в бассейне Онеги. В очень многоводные годы величина стока летне-осенней межени сопоставима с величиной стока в половодье.

При определении расчетного внутригодового распределения стока р. Онеги для групп разной водности выявлены различия месячных долей обеспеченного стока (табл. 5).

Для многоводных лет (обеспеченности годового стока 5 и 25%) характерно наличие двух пиков годового гидрографа – весеннее половодье и существенное увеличение стока в осенние месяцы за счет паводков (рис. 4). Период паводков имеет затяжной характер. Высокие расходы наблюдаются в сентябре и сохраняются вплоть до декабря. Пик паводковых расходов приходится на октябрь: его доля вдвое меньше доли стока в мае – 11–13% годового объема. В средние по водности годы (~50%-й обеспеченности) маловодный период отличается высокими расходами воды в июле (10% годового объема стока), а период осенних паводков характеризуется незначительным увеличением стока.

Гидрограф маловодных лет (75%) имеет однопиковую форму. Максимальные расходы весеннего половодья сменяются повышенными расходами летней межени, плавно снижающимися к сентябрю, что растягивает период спада половодья. Низкая осенняя межень практически не осложнена паводками. Наибольшие (75, 95%) расходы летне-осенней межени в маловодные

Таблица 4. Распределение стока разной водности по сезонам на г/п р. Онега – с. Порог

Водность (обеспеченность годового стока), %	Единицы измерения	Весна (IV–VI)	Лето–осень (VII–XI)	Зима (XII–III)	Год, км ³
5	%	42.9	41.5	15.6	21.3
	км ³	9.1	8.8	3.3	
25	%	50.2	36.6	13.2	17.7
	км ³	8.9	6.5	2.3	
50	%	54.8	33.3	11.9	15.6
	км ³	8.5	5.2	1.9	
75	%	58.9	30.3	10.8	13.6
	км ³	8.0	4.1	1.5	
95	%	64.4	25.6	10.0	11.3
	км ³	7.3	2.9	1.1	

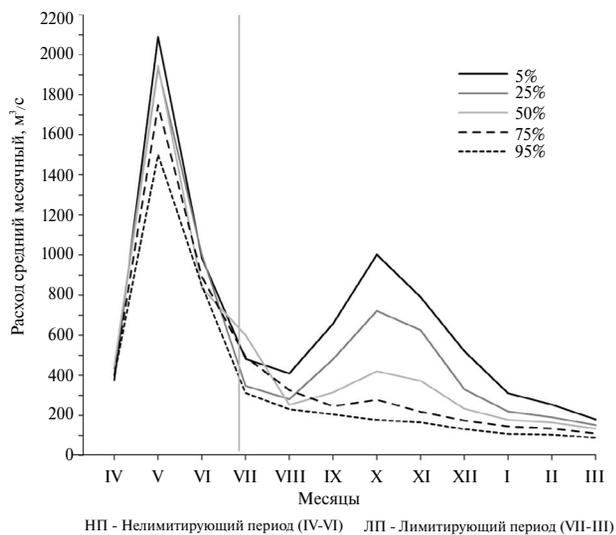


Рис. 4. Внутригодовое распределение стока на г/п р. Онега – с. Порог для разных градаций водности.

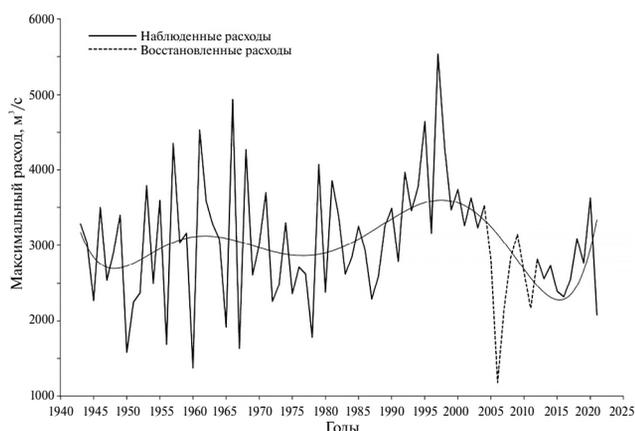


Рис. 5. Максимальные расходы воды весеннего половодья на г/п р. Онега – с. Порог за 1943–2021 гг.

и очень маловодные годы отмечены в июле, как и в средние по водности годы.

Распределение месячного стока в очень маловодные годы (95%) четко иллюстрирует деление на лимитирующий и нелимитирующий периоды внутри года. Для этих лет характерно ярко выраженное половодье, на которое приходится 2/3 годового стока, и глубокая межень с июля по март. Основные различия месячных долей стока в разные по водности годы свойственны маловодным сезонам – лимитирующему периоду (рис. 4).

Распределение стока внутри зимнего сезона в разные по водности годы имеет схожий характер. Доли стока февраля и марта минимальны и практически неизменны, составляют 2–3%. Доля стока декабря меняется заметно: с уменьшением водности года она снижается с 6.6 до 3.1%.

МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК

Среднемноголетний максимальный расход весеннего половодья восстановленного ряда (1943–2021 гг.) составляет 3013 м³/с. Максимальный расход воды половодья – как правило, наибольший за год – за весь период наблюдений менялся в широких пределах (рис. 5). Наибольший максимальный расход (5540 м³/с) отмечен 17.05.1997. Наименьший в ряду наблюдений максимальный расход половодья (1380 м³/с) зафиксирован 26.04.1960. Анализ восстановленного ряда максимальных расходов показывает, что наименьший пиковый расход половодья приходится на 2006 г. и равен 1183 м³/с (рис. 5).

Максимальный расход в том же 2006 г. приходится на декабрь, о чем свидетельствуют данные наблюдений за уровнем воды на г/п р. Онега – с. Порог и наблюдения за стоком на гидрологических постах, расположенных выше по течению. Восстановленный по графику связи $Q = f(H)$ максимальный расход в 2006 г. составил 1900 м³/с.

В многолетнем ходе максимальных расходов наблюдается выраженная цикличность (рис. 5). Сорокалетний цикл, начавшийся в 1981 г., имеет максимальный размах колебаний, равный 4300 м³/с. Межгодовая изменчивость максимальных расходов до начала 1980-х гг. и после также различается. Период 1943–1980 гг. характеризуется частой сменой высоких и низких максимальных расходов половодья, в 1981–2021 гг. можно выделить более продолжительные группы лет, близкие по водности.

Изменчивость максимальных расходов воды характеризуется коэффициентом вариации $C_v = 0.27$ (табл. 6). Причем для периода 1943–1980 гг. значение C_v максимально и равно 0.30, а с 1981 г. уменьшается до 0.25. Изменения в колебаниях максимального стока с 1980-х гг. обусловлены климатическими факторами [18, 19].

Таблица 5. Распределение стока разной водности по месяцам (I–XII) на г/п р. Онега – с. Порог

Сток	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Очень многоводный год (5%)												
%	3.9	2.9	2.3	4.6	26.3	12.0	6.1	5.1	8.0	12.6	9.6	6.6
м ³ /с	310	254	180	377	2091	987	482	409	658	1003	791	521
Многоводный год (25%)												
%	3.3	2.6	2.3	6.3	29.2	14.7	5.2	4.2	7.0	10.9	9.2	5.0
м ³ /с	219	191	151	433	1935	1003	347	281	481	722	626	330
Год средней водности (50%)												
%	3.0	2.5	2.3	7.5	33.4	13.9	10.3	4.3	5.2	7.2	6.2	4.0
м ³ /с	177	164	134	448	1946	837	601	252	315	421	373	233
Маловодный год (75%)												
%	2.8	2.4	2.2	7.6	34.3	17.0	9.7	6.4	4.7	5.5	4.2	3.4
м ³ /с	145	134	110	400	1749	893	492	326	246	278	218	174
Очень маловодный (95%)												
%	2.6	2.2	2.1	9.2	35.7	19.5	7.4	5.5	4.7	4.2	3.8	3.1
м ³ /с	108	104	88	401	1502	849	311	231	205	178	165	131

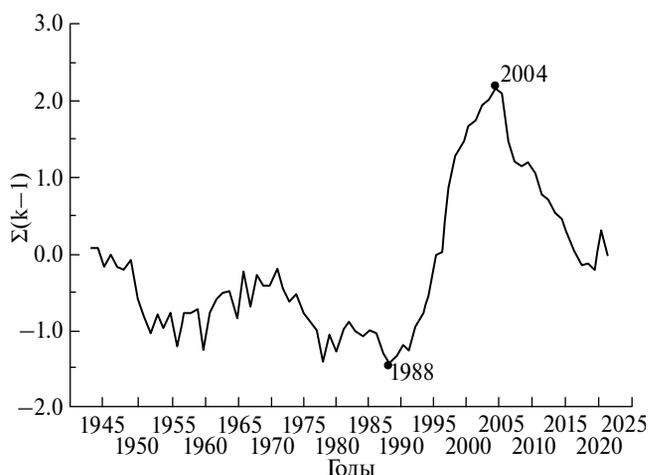
Таблица 6. Параметры максимальных расходов весеннего половодья на г/п р. Онега – с. Порог

Модуль стока, л/с км ²	Средний многолетний расход, м ³ /с	C_v	C_s / C_v	Максимальные расходы различной обеспеченности, м ³ /с					
				0.1%	1%	2%	5%	10%	25%
54.1	3013	0.27	1.5	6003	5144	4854	4441	4090	3526

При оценке линейного тренда в многолетнем ходе максимальных расходов половодья тенденции не выявлено. На основе анализа РИК выделен относительно стабильный период до 1988 г. (рис. 6). Средняя величина максимального расхода 1943–1988 гг. составляет 2900 м³/с, его обеспеченность в среднем равна 53%. С 1989 г. можно выделить два последовательных периода с высокими и низкими максимальными расходами. В 1989–2004 гг. наблюдалось увеличение максимальных расходов, равных в среднем 3700 м³/с обеспеченностью 25%. Весь следующий период (кроме 2020 г.) характеризуется низкими максимальными расходами половодья (2520 м³/с): обеспеченность менялась от 44 до 99%.

Пик половодья в вершине устьевой области р. Онеги в среднем за многолетний период наступает 8 мая. Самая ранняя дата наступления пика половодья – 21.04.1951, самая поздняя – 27.05.1969. С 1981 г. наблюдается смещение даты наступления пиковых расходов на 5 дней в сторону более ранних дат. С того же года уменьшился разброс дат максимальных расходов половодья с 36 до 24 дней (рис. 7).

В многолетних колебаниях стока весеннего половодья (IV–VI) также не наблюдается значимого тренда. Средний многолетний объем стока половодья равен 8.5 км³. Изменчивость весеннего стока р. Онеги в устье характеризуется значением $C_v = 0.21$. Самые многоводные половодья наблюдались в годы, когда были зафиксированы максимальные пиковые расходы – 1966, 1995

**Рис. 6.** Разностно-интегральная кривая максимальных расходов весеннего половодья на г/п р. Онега – с. Порог за период 1943–2021 гг.

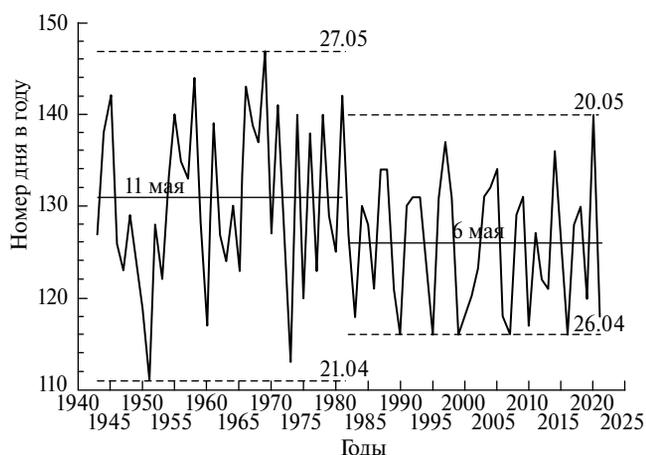


Рис. 7. Даты максимальных расходов весеннего половодья на г/п р. Онега – с. Порог 1943–2021 гг.

и 1997 гг., а наименьший весенний сток наблюдался в 1956, 1960 и 2006 гг.

Совместный анализ рядов максимальных расходов половодья и объемов весеннего стока показал, что связь параметров выражена недостаточно четко. Это связано с неравномерностью снеготаяния, обуславливающей прохождение половодья в виде сложной многопиковой волны, а также со значительным участием в формировании весеннего половодья жидких осадков, влияющих на объем стока, но мало сказывающихся при этом на величине максимального расхода.

Региональные климатические изменения, наблюдавшиеся в последнее 20-летие (2000–2021 гг.) – увеличение температуры воздуха в ноябре и декабре, увеличение жидких осадков в холодное время года и уменьшение снеготаяния – по большей части способствовали снижению стока в период весеннего половодья.

Максимальные расходы дождевых паводков на р. Онеге наблюдаются преимущественно в летне-осенний период с июля по ноябрь. Редко случаются паводки в конце июня и в декабре. Примечательно, что наиболее значительный паводок прошел в декабре 2006 г., о чем сви-

детельствуют данные наблюдений за уровнем воды [5, 18].

Величина максимального расхода в период дождевых паводков обычно в несколько раз меньше, чем в период половодья. Объем паводочного стока зависит не только от слоя осадков и их интенсивности, но и от предшествующей увлажненности бассейна [15]. Высокие значения расходов редких летних паводков обусловлены повышенной увлажненностью почвы после прохождения весеннего половодья. Средний паводочный расход в июле составляет 910 м³/с. В 6% случаев на спаде волны половодья в конце июня наблюдаются паводки с расходом > 1000 м³/с. Чаще всего дождевые паводки наблюдаются в октябре (32% случаев) со средним расходом 850 м³/с. Кроме того, для октября характерен наибольший диапазон величин расходов. Для ноября характерны наиболее узкие диапазоны изменчивости, а изменчивость паводочных расходов, фиксируемых в августе, максимальна. Анализ данных многолетних наблюдений за стоком дождевых паводков показал, что в 50% случаев величина максимальных паводочных расходов менялась в пределах от 600 до 1100 м³/с.

Средний многолетний расход дождевого паводка за период 1943–2021 гг. равен 890 м³/с. Наибольший паводочный расход (1760 м³/с) наблюдался 17.10.2019, наименьший расход (258 м³/с) – 30.10.1972. В изменениях величин паводочных расходов многолетнего периода 1943–2021 гг. зафиксирован положительный тренд с коэффициентом 30 м³/с /10 лет. Наиболее значимое увеличение наблюдается с 2000 г.

Для оценки обеспеченности паводочных расходов проведена статистическая обработка ряда данных наблюдений с 1943 по 2021 г. с пропусками в период 2005–2011 гг. (табл. 7). Поскольку из-за неравномерности выпадения осадков дождевые паводки в бассейне Онеги проходят не синхронно, удовлетворительные связи между

Таблица 7. Статистические характеристики максимальных расходов дождевых паводков на г/п р. Онега – с. Порог

Модуль стока, л/с км ²	Средний многолетний расход, м ³ /с	C_v	C_s/C_v	Максимальные расходы различной обеспеченности, м ³ /с					
				0.1%	1%	2%	5%	10%	25%
16.0	890	0.43	1.5	2382	1943	1798	1580	1404	1123

характеристиками паводков на ближайших гидрологических постах, как правило, отсутствуют [15]. Поэтому величины максимальных расходов дождевых паводков за период отсутствия данных наблюдений (2005–2011 гг.) на г/п р. Онега – с. Порог не были восстановлены.

МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК

Минимальный сток р. Онеги наблюдается в зимний период. Расходы зимней межени в среднем в ~2 раза ниже минимальных расходов летне-осенней межени. Летне-осенняя межень практически ежегодно прерывается дождевыми паводками, а зимняя межень, напротив, устойчива и характеризуется постепенным уменьшением расходов воды к концу сезона по мере истощения запасов грунтовых вод.

Минимальные расходы зимней межени в период 1943–2005 гг. наблюдаются в основном в марте (65% случаев). Наименьший расход зимней межени (82.6 м³/с) зафиксирован 05.03.1956, наибольший расход (196 м³/с) – 25.02.1990.

Многолетний ряд минимальных расходов зимней межени непродолжителен и имеет пропуски за

некоторые годы, а с 1996 г. наблюдения за зимним стоком не проводятся вовсе. В изменениях минимальных расходов зимней межени восстановленного ряда наблюдается ярко выраженный положительный тренд, который составляет 4.5 м³/с/10 лет, что значимо на 5%-м уровне (рис. 8).

По результатам статистической обработки многолетнего ряда минимальных зимних расходов, приведенного к периоду 1943–2005 гг., получены расчетные параметры (табл. 8).

Величины летне-осеннего стока меняются в больших пределах, чем зимние. Минимальные расходы летне-осенней межени за весь период наблюдений колебались от 124 (19.09.1999) до 443 м³/с (10.09.2017). Причем величина 443 м³/с выделяется из общей выборки минимальных расходов, зафиксированных в сентябре. Это объясняется тем, что в 2017 г. наблюдались большие величины расходов воды на протяжении всего меженного периода и величина летне-осеннего стока 11 км³ была максимальной за весь период наблюдений.

В изменении величин летне-осенних меженных расходов (рис. 9) отмечена тенденция к уве-



Рис. 8. Минимальные расходы воды зимней межени на г/п р. Онега – с. Порог 1943–2005 гг.

Таблица 8. Характеристики минимальных расходов зимней межени на г/п р. Онега – с. Порог 1943–2005 гг.

Модуль стока, л/с км ²	Средний многолетний расход, м ³ /с	C_v	C_s/C_v	Минимальные зимние расходы различной обеспеченности, м ³ /с						
				75%	80%	85%	90%	95%	97%	99%
2.26	123	0.24	1.5	103	98.6	93.0	87.4	78.8	73.0	63.3



Рис. 9. Минимальные расходы воды летне-осенней межени на г/п р. Онега – с. Порог 1943–2021 гг.

личению, особенно в период с 2000 г. Коэффициент линейного тренда составляет $6.5 \text{ м}^3/\text{с} / 10 \text{ лет}$.

Минимальные расходы летне-осенней межени наблюдаются в основном в августе (28% случаев) и сентябре (47% случаев) до периода дождевых паводков.

Результаты статистической обработки восстановленного ряда минимальных летне-осенних расходов приведены в табл. 9.

Анализ связи минимальных расходов летне-осенней межени и уровней воды на г/п р. Онега – с. Порог показывает, что в период после 1989 г. уровень воды снизился при прохождении тех же соответственных расходов по сравнению с периодом до 1989 г. Для выявления причин происходящего требуются дополнительные полевые экспедиционные исследования, включая проверку истории изменения отметок нуля поста, а также оценку динамики русла в створе поста и в вершине устьевой области р. Онеги (рис. 10).

Для визуализации данных наблюдений за минимальными расходами р. Онеги на диаграмме на рис. 11 показано распределение значений по месяцам меженного (лимитирующего) периода

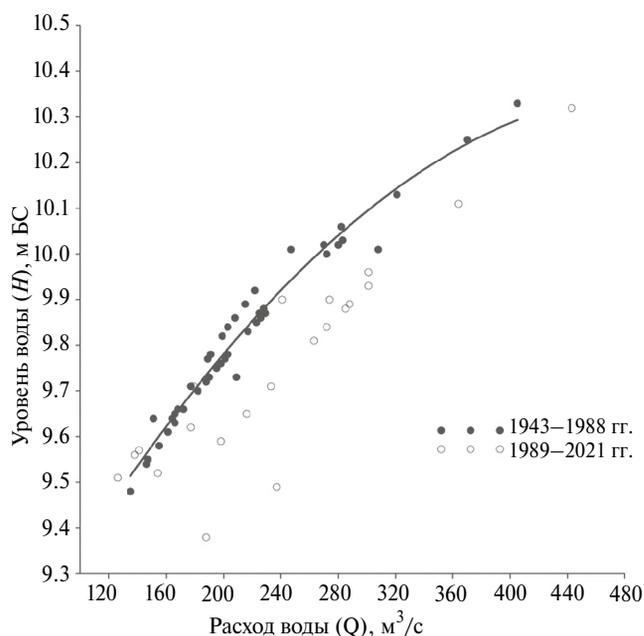


Рис. 10. График связи минимальных расходов воды летне-осенней межени и уровней на г/п р. Онега – с. Порог 1943–2021 гг.

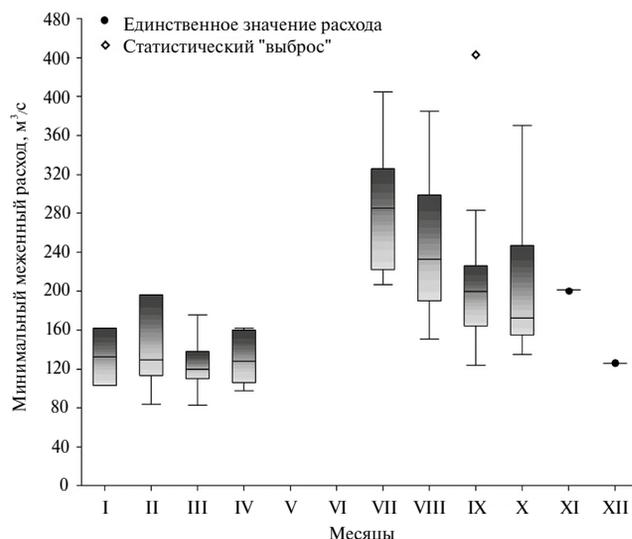


Рис. 11. Распределение минимальных расходов по месяцам меженного периода на г/п р. Онега – с. Порог. (“Ящичковая диаграмма”: отображает область значений между квантилями вероятности 25 и 75% с медианой 50% вероятности и максимальные и минимальные наблюдаемые значения).

Таблица 9. Характеристики минимальных расходов летне-осенней межени на г/п р. Онега – с. Порог в 1943–2021 гг.

Модуль стока, л/с км ²	Средний многолетний расход, м ³ /с	C_v	C_s / C_v	Минимальные летне-осенние расходы различной обеспеченности, м ³ /с						
				75%	80%	85%	90%	95%	97%	99%
4.0	226	0.29	3.5	177	169	160	151	139	130	121

1943–2021 гг. Закрашенные области диапазонов объединяют группу расходов, фиксируемых в 50% случаев. Данная диаграмма демонстрирует разницу между рядами минимальных меженных расходов, наблюдаемых в разные месяцы, и их асимметрию. Об асимметрии можно судить по смещенной к какому-либо концу “ящика” медиане и по разной длине “усов”, выходящих из “ящика”.

Анализ подтвердил, что по сравнению с минимальными летне-осенними расходами минимальные зимние расходы имеют меньшую дисперсию: СКО величин равно, соответственно, 66 и 29 м³/с. Минимальные расходы, наблюдаемые зимой чаще всего в марте, а осенью – в сентябре, в большинстве случаев наименьшие за сезон. Наибольшее число случаев наблюдений минимальных расходов в эти месяцы косвенно подтверждает форма диаграмм, отражающая близкое к нормальному распределение значений.

Выдающаяся величина минимального расхода (443 м³/с), наблюдаемого 10.09.2017, на диаграмме обозначена как статистический выброс вследствие отличных условий формирования стока соответствующего меженного периода за все годы наблюдений. Тот же результат дала проверка по тесту Граббса. Показано, что в июле и августе фиксируются наибольшие из минимальных меженных расходов редкой повторяемости, которые близки к самому экстремальному (рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования режима стока, поступающего в устьевую область Онеги, за период 1943–2021 гг. основной акцент был направлен на выявление особенностей динамики параметров стока, связанных с изменениями климата, которые наблюдаются на севере ЕТР с начала 1980-х гг. Многолетние изменения стока р. Онеги обусловлены изменением условий увлажнения на водосборе и повышением приземной температуры воздуха. Результаты анализа многолетних колебаний годового стока свидетельствуют об увеличении водности реки. В период с 1989 по 2021 г. объем годового стока увеличился на 1.3 км³ по сравнению с 1943–1988 гг.

Изменение климатических факторов привело прежде всего к трансформации сезонного стока – перераспределению его внутри года. На фоне незначительного снижения стока весеннего половодья наблюдается заметное увеличение стока летне-осенней и зимней межени. Зимний сток за последние 15 лет увеличился в 2 раза по сравнению с периодом 1943–2005 гг. (1.9 км³) и составил 3.3 км³. Это произошло в основном за счет аномально высоких расходов межени в 2006/2007 и 2019/2020 гг. При практически неизменной доле летне-осеннего стока доля весеннего стока снизилась на 9% годового, а доля зимней межени почти на столько же увеличилась.

С начала 1980-х гг. изменился характер межгодовой изменчивости максимальных расходов воды: в меньшей степени – дождевых паводков, а в большей – весеннего половодья. Произошло смещение дат наступления пика половодья на более ранние, а вместе с этим – уменьшение диапазона разброса дат с максимальными расходами на 12 дней. Наблюдается перераспределение стока внутри весеннего сезона. На 0.5 км³ увеличился сток в апреле, сток в мае уменьшился на ~1 км³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрологический ежегодник. Т. 0. Бассейны Белого и Баренцева морей. Вып. 2–9. 1936–1962 гг. Л.: Гидрометеоиздат, 1937–1962.
2. Гидрологический ежегодник. Т. 0. Вып. 2, 3, 5–7. 1963–1977 гг. Архангельск: Северное УГМС, 1964–1979.
3. *Горелиц О.В., Землянов И.В., Крыжов В.Н.* Гидрологический режим реки Онеги в условиях современных климатических изменений // Материалы Международ. науч. конф. “Региональные эффекты глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы)”. Воронеж: Науч. кн., 2012. С. 209–211.
4. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 0. Вып. 2, 3, 5–7. 1978–1980 гг. Архангельск: Северное УГМС, 1980–1982.
5. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Т. 1. Вып. 8. Бассейны Онеги, Северной Двины

- и Мезени. 1981–2021 гг. Архангельск: Северное УГМС, 1982–2022.
6. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 8. Бассейны Онеги, Северной Двины и Мезени. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
 7. Киктев Д.Б., Крыжов В.Н. О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С. 27–38.
 8. Крыжов В.Н., Горелиц О.В. Зимняя арктическая осцилляция и формирование весеннего половодья рек бассейна Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 50–61.
DOI: 10.3103/S106837391903004X
 9. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
 10. Научно-прикладной справочник. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: РИАЛ, 2021. 190 с.
 11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 611 с.
 12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Т. 3. Северный край / Под ред. И.М. Жилы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 395 с.
 13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 3. Северный Л.: Гидрометеиздат, 1974. 475 с.
 14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1971–1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 432 с.
 15. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 663 с.
 16. Руководство пользователя <https://www.hydrology.ru/rukovodstvo-polzovatelja-programmy-hydrostatcalc>
 17. СП 33-11-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
 18. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Онега / Под ред. О.В. Горелиц, Г.С. Ермаковой, Г.Ш. Турсуновой. Воронеж: Воронежская областная типография, 2023. 334 с.
 19. Gorelits O.V., Kryjov V.N., Rakcheeva E.A., Ermakova G.S. Wintertime Arctic Oscillation Harbinger of Spring Floods in the Mouth Areas of the North-Eastern European Rivers // Water Resour. 2022. V. 49. № 5. P. 836–844. DOI: 10.1134/S0097807822050049

CHARACTERISTICS OF LONG-TERM AND SEASONAL VARIABILITY OF THE ONEGA RIVER FLOW REGIME AT THE HEAD OF THE MOUTH AREA

A. A. Sapozhnikova*, O. V. Gorelits

Zubov State Oceanographic Institute Federal Service on Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Moscow Russia

**e-mail: asapozhnikova@mail.ru*

The characteristics of the Onega River flow regime and its elements at the top of the mouth area over 80 years are presented. The analysis of the long-term and seasonal runoff variability is carried out, the characteristic of the intra-annual distribution were given. Statistical processing of long-term series of maximum discharges of spring floods and rain floods, minimum low-water discharges of the summer-autumn and winter periods was carried out. Patterns of long-term fluctuations of the annual and seasonal runoff and extreme water discharges have been revealed. The analysis of changes in runoff elements was based on identifying general long-term trends and comparing calculated parameters by periods, identified using difference-integral curves and chronological graphs. The features of fluctuations in Onega River flow, related with climate change started in the 1980-s are noted. Particular attention was paid to the water flow regime in the 21st century, characterized by a rising of its parameters.

Keywords: Mouth area, water discharge, variability, discharge recovery, statistical parameters.