

УДК 556.16

Н.М. Юмина<sup>1</sup>, М.А. Терешина<sup>2</sup>**МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА РЕК БАССЕЙНА ВИЛЮЯ**

Для наиболее полного понимания современных колебаний стока рек бассейна Вилюя и выявления их специфики при планировании хозяйственной деятельности в бассейне проведен пространственно-временной анализ многолетних колебаний стока рек с учетом современной гидрометеорологической информации. Выполненный анализ позволил также оценить роль и влияние антропогенной нагрузки на водные ресурсы исследуемого региона. Определены даты и наиболее вероятные причины нарушений однородности многолетних колебаний годового, максимального и минимального стока рек бассейна Вилюя за XX и начало XXI веков. Результаты исследования, основанного на наиболее полных данных о многолетних колебаниях стока различных рек бассейна, позволили получить представление об интенсивности современных изменений стока рек на рассматриваемой территории, дать уточненные количественные оценки этих изменений. Выполнено районирование территории бассейна по синхронности колебаний годового стока, составлены эмпирические зависимости годового стока от осадков и температуры воздуха, позволяющие проводить оценочные расчеты.

*Ключевые слова:* пространственно-временной анализ стока; среднегодовой, максимальный и минимальный сток.

**Введение.** Территория северо-востока России (бассейн реки Лены, в том числе Вилюя) отличается весьма суровыми и сложными природными условиями, здесь наблюдаются практически все возможные опасные гидрометеорологические явления и процессы (катастрофические паводки и наводнения, маловодья, заторы льда, наледи, полыньи, промерзание и перемерзание рек). Водные ресурсы рек региона широко используются в различных отраслях экономики, однако из-за крайне неравномерного пространственного и внутригодового распределения речного стока здесь возникают значительные трудности с их использованием.

Бассейн Вилюя – один из значимых в экономическом и социальном плане регионов Сибири, охватывающий значительную часть территории Якутии. В пределах бассейна расположено множество стратегических объектов ресурсного комплекса, осуществляется деятельность добывающей промышленности, гидроэнергетики, лесного и сельского хозяйства, водного транспорта и туризма. Для региона характерно значительное разнообразие природных условий, обуславливающее пространственно-временную неоднородность распределения водных ресурсов и весьма сложный водный режим рек.

Активное изучение водного режима рек данного региона началось в середине XX века в связи с задачами интенсивного освоения природных богатств Западной Сибири и северо-востока страны. Большое внимание уделялось особенностям формирования гидрологического режима рек, находящихся в сложных мерзлотно-климатических условиях, в частности, изучению закономерностей формирования максимального и минимального стока как основных гидрологических характеристик, широко

используемых в водохозяйственном и строительном проектировании. В 1950-х гг. В.Е. Водогрецким были выполнены первые обобщения данных наблюдений за водным стоком рек северо-востока СССР, на основе которых были разработаны методы расчета годового, максимального, минимального и внутригодового распределения стока. К 1980-м годам появилось множество региональных гидрологических исследований, осуществленных под руководством Якутского Управления гидрометеослужбы, главным итогом которых стала серия изданий «Ресурсы поверхностных вод СССР».

К настоящему времени по данному региону имеются отдельные публикации В.В. Кильмянинова, А.Н. Аржакова, Е.А. Поповой, С.А. Стручковой и др., труды сотрудников лаборатории гидроэнергетики и водного хозяйства Института физико-технических проблем Севера ЯНЦ СО РАН. Итоги научных и экспедиционных изысканий лаборатории опубликованы в виде монографий Г.Е. Чистякова «Водные ресурсы рек Якутии» (1964), Д.Д. Ноговицына «Водные ресурсы Якутской АССР и их хозяйственное использование» (1985).

Задача современных гидрологических исследований заключается, в основном, в разработке методов определения расчетных характеристик неизученных рек. Важнейшие результаты работ изложены в монографии С.К. Аржаковой «Зимний сток рек криолитозоны России» (2001). Большое значение для водного режима рек Якутии имеют мерзлотно-гидрогеологические условия формирования речного стока, изучение которых проводят в Институте мерзлотоведения СО РАН. Одно из приоритетных направлений в последние десятилетия – оценка влияния климатических изменений на водный режим рек

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, старший преподаватель, канд. геогр. н.; e-mail: yuminanm@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; e-mail: sort.of.nickname@gmail.com

региона; результаты опубликованы в ряде работ А.Г. Георгиади, И.П. Милюковой, Н.Н. Романовского, С.Н. Булдовича, Г.С. Типенко, Д.О. Сергеева, А.В. Гаврилова и других.

Для наиболее полного понимания современных колебаний стока и учета их специфики при планировании хозяйственной деятельности в регионе необходим пространственно-временной анализ многолетних колебаний стока рек с учетом современной гидрометеорологической информации. Подобный анализ также позволяет оценить роль и влияние антропогенной нагрузки на водные ресурсы исследуемого региона.

На изменение количественных и качественных характеристик водных объектов наиболее сильное влияние оказывает прямое антропогенное воздействие, а также смена климатических условий, особенно проявляющаяся в последние десятилетия. Оценке этих изменений в различных областях мира, включая территорию Ленского бассейна, посвящен ряд работ различных российских и зарубежных авторов. В частности, в работах Д.В. Магрицкого с соавт. [2008]; В. Ye et al. [2003] рассмотрено влияние на сток Вилюя и Лены введения в эксплуатацию Вилюйских ГЭС. Климатические изменения стока рек особенно интенсивно проявляются в бассейне Северного Ледовитого океана, в частности – в Ленском бассейне [Георгиади, Кашутина, 2011]. С середины 1980-х годов на этой территории наблюдается стабильное повышение температуры воздуха, приводящее к усилению интенсивности таяния многолетней мерзлоты и увеличению грунтовой составляющей питания рек, в результате чего возрастает объем меженного стока. Наблюдается также увеличение годовых сумм осадков, приводящее к росту годового стока рек [Сценарная оценка ..., 2011; Berezovskaya et al., 2005]. Оценки современных антропогенных и климатических изменений стока воды, наносов и теплоты рек бассейна нижней Лены и Вилюя представлены Д.В. Магрицким с соавт. [2015], однако ими рассмотрены лишь крупнейшие речные бассейны. Изучению характера колебаний зимнего стока в естественных и зарегулированных условиях посвящена работа М.П. Лебедева с соавт. [2009], но зимний месячный сток рек Вилюя и Лены рассмотрен также только в замыкающих створах.

Небольшое количество гидрометеорологических и гидрометрических данных, а также трудности их получения в суровых природных условиях северо-востока России, ограничивают возможности применения различных математических методов для описания водного режима рек региона. Вопросам моделирования и оценке водного стока рек Сибири посвящены работы О.Г. Савичева, В.В. Паромова, Е.М. Гусева, В.И. Кузина, Н.А. Лаптевой. В связи с малой изученностью метеорологических факторов и почвенно-растительного покрова на территории бассейна Вилюя, опыт применения моделей формирования стока для изучения связи между гидрологическими и метеорологическими характеристиками минимален и ограничивается попытками рас-

чета притока к Вилюйскому водохранилищу, то есть сводится к изучению крупных водосборов [Семенова, 2008].

Настоящая работа посвящена выявлению нарушений однородности многолетних колебаний стока рек бассейна Вилюя за XX и начало XXI века. Наиболее значимым источником антропогенных изменений стока здесь выступает регулирование стока Вилюя каскадом Вилюйских водохранилищ. Введенная в эксплуатацию в 1960-х годах Вилюйская ГЭС является единственной крупной гидротехнической системой Ленского бассейна и оказывает влияние на внутригодовое распределение стока Вилюя и Лены [Магрицкий, 2008]. Результаты исследования, основанного на наиболее полных данных о многолетних колебаниях стока различных рек крупного бассейна, позволяют получить исчерпывающее представление об интенсивности современных изменений стока рек, дать уточненные количественные оценки этих изменений.

**Материалы и методы исследований.** Используются многолетние данные о среднегодовых расходах воды, максимальных расходах весеннего половодья и минимальных расходах летне-осеннего периода для 18-ти гидрологических постов Росгидромета, расположенных в бассейне Вилюя (табл. 1). Выбранные пункты наблюдений относятся к водосборам различного масштаба (в основном – к средним рекам), расположенным в различных физико-географических условиях. Период наблюдений на постах составляет от 38 до 86 лет и заканчивается 2013 г. Для первичного изучения климатических факторов стока выбрано 8 метеорологических станций, для каждой из которых рассмотрены многолетние ряды температуры воздуха и количества осадков. Пространственное размещение пунктов гидрологических наблюдений, расположенных как на самом Вилюе (практически на всем его протяжении), так и на многих значительных его притоках, позволяет почти равномерно охватить всю территорию бассейна Вилюя (рис. 1). При обосновании природы изменений стока использованы выводы о климатических изменениях в бассейне [Сценарная оценка ..., 2011; Berezovskaya et al., 2005].

Для каждого гидрологического поста проведен стандартный статистический анализ многолетних рядов характерных расходов воды в целях обнаружения нарушений независимости и однородности колебаний стока. Проверка на соответствие гипотезам независимости осуществлялась с использованием критериев Андерсена, числа серий и Спирмена, проверка на однородность – по двувыворочным критериям Стьюдента и Фишера с учетом внутрирядной связности и асимметрии исследуемых характеристик [Магрицкий, 2014]. Был назначен 5%-ный уровень значимости критериев.

Исследование изменений стока Вилюя, связанных с работой водохранилищ, проводилось с разбиением рядов стока на интервалы по середине 1960-х годов (1966 г. – дата заполнения водохранили-

Таблица 1

## Характеристики пунктов гидрологических наблюдений в бассейне Вилюя

№	Река	Пост	Площадь бассейна, $F$ , км <sup>2</sup>	Средняя высота бассейна, $H_{ср}$ , м	Период наблюдений		
					начало	конец	число лет
1	Вилюй	Усть-Амбардах	57 300	–	1966	2013	47
2	«	Чернышевский	136 000	–	1959	«	49
3	«	Сюльдюкар	168 000	–	1967	«	42
4	«	Сунтар	202 000	–	1927	«	86
5	«	Хатырык-Хомо	452 000	–	1935	«	77
6	Чуркуо	Лавинда	4440	347	1971	«	42
7	Чона	Чона	21 000	370	1975	«	38
8	Ичода	Майский	2820	372	1973	«	39
9	Батыр	Ясный	3380	390	1970	«	43
10	Кэмпэндэйи	Кемпендяй	1290	280	1945	«	67
11	Ыгыгата	Хампа	11 200	310	1969	«	40
12	Марха	Шалагонцы	16 500	438	1974	«	38
13	«	Чумпурук	78 700	–	1955	«	57
14	«	Малыкай	89 600	–	1940	«	69
15	Моркока	Хабардино	18 600	549	1974	«	39
16	Чилии	Чилии	3850	200	1964	«	48
17	Тангнары	Чай	5760	200	1964	«	47
18	Тюнг	Угулятцы	37 000	260	1959	1996	38

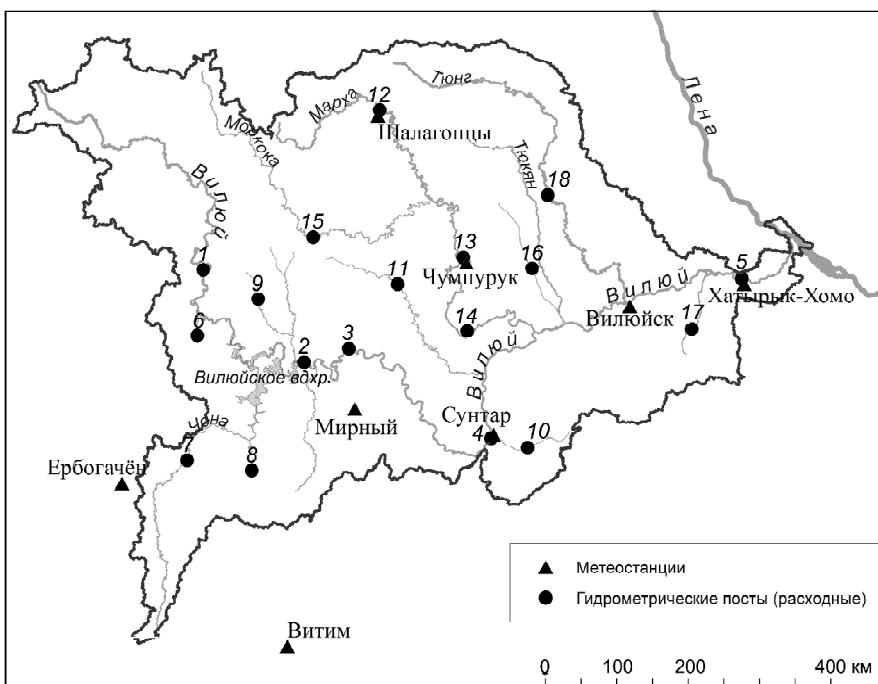


Рис. 1. Расположение выбранных пунктов гидрометеорологических наблюдений в пределах бассейна Вилюя и около него

Fig. 1. Location of selected weather stations within the Viluy River basin and around it

ща). Дата начала климатических изменений определялась с использованием суммарно интегральных кривых годового стока, на которых начало нарушения однородности отмечается по отклонению кривой от прямой линии. Почти для всех постов бассейна эта дата приходится на 1987 год. Также для каждого поста рассматривались разностно-интегральные кривые годового стока.

Для оценки связи стока рек с метеорологическими факторами рассмотрены регрессионные связи годового стока с различными предикторами: среднегодовой температурой воздуха, суммой положительных температур за год, годовыми суммами осадков. Эмпирические зависимости являются наиболее оптимальным вариантом в условиях разреженной сети метеорологических станций, так как расчеты климатического стока требуют гораздо большего объема и надежности данных.

Визуальное представление всех материалов выполнено в ГИС-проекте, содержащем ряд карт бассейна Вилюя, отражающих природные условия формирования стока, антропогенную нагрузку на водные ресурсы, исходную гидрометеорологическую информацию и основные результаты расчетов.

#### **Результаты исследований и их обсуждение.**

Суровый климат Якутии, повсеместное распространение многолетнемерзлых пород, особые геологические и гидрогеологические условия, своеобразное географическое расположение по отношению к направлению движения влагонесущих воздушных масс с океанов создают условия, при которых формируется весьма сложный водный режим рек. Реки бассейна Вилюя, по классификации Б.Д. Зайкова, относятся к восточно-сибирскому типу водного режима, характеризующемуся высоким половодьем, проходящим во время таяния снега в мае–июне, после которого наступает летне-осенний меженный период, часто прерывающийся дождевыми паводками, межень холодного периода очень продолжительна и отличается крайней маловодностью. Водами половодья может обеспечиваться до 70% стока. Паводков в течение года может проходить различное количество – от двух-трех на равнинных частях бассейна до десяти и более в горных областях.

Неоднородность распределения стока рек бассейна Вилюя во времени дополняется пространственной неоднородностью, когда на северо-западе бассейна в горных и полугорных частях Вилюйского плато увлажненность территории больше, чем на юго-западе и в низовьях бассейна (на полугорьях Приленского плато и Центрально-Якутской равнине). При этом основная доля населения и хозяйственных объектов приурочены как раз к районам среднего и нижнего течения Вилюя. В целях оптимального использования водных ресурсов в регионе проведен пространственно-временной анализ стока рек бассейна с учетом имеющейся современной гидрометеорологической информации.

В результате исследования для большей части постов обнаружена статистически достоверная автокорреляция в колебаниях годового стока (значимый коэффициент автокорреляции  $r_1=0,25-0,50$ ), а также в ряде случаев максимального за половодье ( $r_1=0,28-0,74$ ) и минимального летне-осеннего стока ( $r_1=0,36-0,62$ ). Для годового стока это может отражать аккумулирующую роль речного бассейна при существенном влиянии вечной мерзлоты и подземного стока. Автокорреляция в колебаниях максимального стока существенна в основном для самого Вилюя. Особенно велика корреляция между максимальным стоком смежных лет для постов на Вилюе в пос. Чернышевский и Сунтар (значения  $r_1$  равны 0,74 и 0,59 соответственно). Такие высокие значения  $r_1$  для Вилюя объясняются регулированием стока, также это может быть проявлением особенностей атмосферной циркуляции в регионе. Значительная автокорреляция минимального стока наблюдается в основном для небольших правых

притоков Вилюя, вызванная, вероятно, местными условиями формирования стока. В целом высокие значения коэффициента автокорреляции свидетельствуют о наличии цикличности в колебаниях стока, то есть тенденции к группировке лет повышенной и пониженной водности. В настоящее время практически для всех постов бассейна наблюдается в различной степени фаза повышенной водности, начавшаяся примерно с 1986–1988 гг.

#### **Антропогенное воздействие на сток Вилюя.**

Регулирование стока в бассейне Вилюя оказывает значительное влияние на водный режим реки, особенно на внутригодовое распределение стока. Однако введение в эксплуатацию Вилюйских ГЭС не оказало значительного влияния на общую среднюю водность Вилюя: для годового стока нижележащих от гидроузла постов (Сунтар и Хатырык-Хомо) не отмечено статистически значимых изменений ни среднего значения ( $M$ ), ни дисперсии ( $D$ ). Это объясняется как компенсирующими друг друга внутригодовыми изменениями стока, так и малыми дополнительными потерями водохранилищ на испарение и инфильтрацию в условиях вечной мерзлоты. Изменения во внутригодовом распределении стока статистически значимы: норма максимального стока весеннего половодья в результате регулирования водохранилищами уменьшилась на обоих постах: средний максимальный расход половодья для поста Сунтар – более чем на 50%, для Хатырык-Хомо – на 35%, что показывает распространение влияния водохранилища на максимальный сток до самого устья Вилюя. Также значительно (до 50%) уменьшилась дисперсия максимального стока. Среднее значение минимального стока летне-осеннего периода в результате регулирования практически не изменилось, для поста Сунтар на 70% сократилась дисперсия минимального стока. В замыкающем створе (Хатырык-Хомо) из-за влияния многоводных притоков Вилюя, впадающих в его нижнем течении – Мархи и Тюнга, изменения минимального летне-осеннего стока уже незаметны. В результате регулирования стока Вилюя водохранилищами произошло увеличение автокорреляции минимального летне-осеннего стока – от статистически незначимых значений до 0,3–0,5. Автокорреляция максимального расхода весеннего половодья и годового стока также несколько выросла, но в незначительных пределах. В результате регулирования стока Вилюя водохранилищами зимний меженный сток (с ноября по апрель), не рассматриваемый в настоящей работе, в п. Хатырык-Хомо увеличился в 44 раза [Магрицкий, 2008]; при этом средний расход воды за зимний период увеличился в 11 раз [Лебедев, Ноговицин, 2009].

**Климатические изменения стока.** Почти для всех выбранных гидрологических постов наблюдается стабильное увеличение стока, начиная с середины 1980-х годов (табл. 2). На суммарно-интегральных кривых годового стока большинства водосборов можно выделить единую для них дату (1987 г.), начиная с которой наблюдается заметное

Таблица 2

## Выявленные статистически достоверные изменения характеристик стока рек бассейна Вилюя после 1987 г.

Река	Пост	Среднегодовой		Максимальный		Минимальный	
		<i>M</i> , %	<i>D</i> , %	<i>M</i> , %	<i>D</i> , %	<i>M</i> , %	<i>D</i> , %
Вилюй	Усть-Амбардах	+32	–	+22	–	+57	–
	Чернышевский	+24	–	–	–	–	–
	Сюльдюкар	+33	–	–	–	+74	–
	Сунтар	+34	–	–	–	+37	–
	Хатырык-Хомо	+31	–	+37	–	–	–
Чуркуо	Лавинда	–	–	+25	–	–	–
Чона	Чона	–	–	–	–	–	–
Ичода	Майский	–	–	–	–	–	–
Батыр	Ясный	–	–	+21	–	–	–
Кемпендяй	Кемпендяй	+47	–	+53	–	+75	–
Ыгыатта	Хампа	+57	–	–	–	–	–
	Шалагонцы	+20	–	+54	+200	–	–
Марха	Чумпурук	+16	–	+25	–	–	–
	Малыкай	+22	–	+26	+59	+35	–
Моркока	Хабардино	+28	–	–	–	–	–
Чилии	Чилии	–	–	–	–	–	–
Чай	Чай	–	–	–	–	–	–

Примечание. *M* – среднее значение, *D* – дисперсия. Прочерк – отсутствуют статистически значимые изменения.

увеличение среднегодовых расходов воды. Этот же период является «переломным» и в многолетнем ходе метеозаписей: на графиках многолетних колебаний среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков он отмечает начало более интенсивного увеличения обеих характеристик. Нарушение однородности рядов среднегодовой температуры воздуха отмечено для всех выбранных метеорологических станций, увеличение за период 1987–2013 гг., по сравнению с предшествующим периодом, составило 0,9–1,7 °С. Максимальный рост температуры почти на всех выбранных станциях наблюдается в холодный период (с ноября по апрель). Так, на станции Чумпурук среднемесячные температуры в январе–марте повысились на 1,5–2 °С. На станциях Сунтар и Ербогачен отмечаются максимальные изменения за отдельные месяцы: среднемесячная температура февраля на них увеличилась на 2,6 и 2,7 °С соответственно, января и марта – примерно на 1,5 °С. В то же время изменения в летних температурах на рассмотренных метеостанциях либо гораздо менее интенсивны, либо незаметны.

Значимое увеличение годовых сумм осадков отмечается для трех из восьми метеостанций – Ербогачен, Витим и Вилюйск – и составляет около 15%. При этом станции Ербогачен и Витим относятся к области Приленского плато – возвышенной юго-западной части бассейна, являющейся одним из очагов выпадения осадков на территории бассейна.

Внутри года увеличение сумм осадков не тяготеет к отдельным месяцам, распределяясь достаточно равномерно. Для станции Шалагонцы, являющейся репрезентативной для другой горной области бассейна, охватывающей его северную часть (Среднесибирское плоскогорье), гипотеза однородности рядов осадков не отвергается выбранными статистическими критериями.

В среднем увеличение нормы годового стока (*M*) за период 1987–2013 гг. для рек бассейна Вилюя составляет около 20–30%. Максимальное увеличение наблюдается в бассейнах рек Кемпендяй и Ыгыатта – около 50%.

Для реки Мархи на постах Шалагонцы и Малыкай отмечается значимое увеличение после 1987 г. дисперсии максимального стока весеннего половодья, для остальных постов Вилюйского бассейна нарушение однородности рядов максимального стока по дисперсии не выявлено. Увеличение нормы максимального стока выражено на большем числе постов. Наиболее подвержены изменениям максимального стока оказались бассейны рек Вилюя и Мархи, а также рек Чуркуо, Батыр и Кемпендяй. Увеличение максимального стока половодья для большинства постов составило около 25%, максимальные значения отмечены в верховьях Мархи и бассейне реки Кемпендяй (более 50%). Значительное увеличение максимального стока рек вероятно связано с более интенсивным весенним таянием снега и многолетней мерзлоты, вызванным потеп-

лением климата [Сценарная оценка ..., 2011; Beregovskaya et al., 2005]. После 1987 г. также произошло изменение внутрирядной связности максимального стока. В верховьях Мархи и Вилюя коэффициент автокорреляции значительно увеличился, а в среднем и нижнем течении Вилюя уменьшился и даже стал статистически незначимым. Это говорит о возрастающем циклическом характере колебаний максимального стока половодья в северной горной части бассейна и ослаблении в результате изменения климата роли водохранилищ в увеличении характера цикличности колебаний максимального стока. Также можно отметить некоторые изменения в датах прохождения максимального стока весеннего половодья: для большинства постов бассейна Вилюя максимум половодья за последние десятилетия смещается на более ранние даты. Это может быть связано с более ранним наступлением весны из-за потепления климата и ее большей дружностью. В то же время низовья Мархи и реки равнинной части бассейна (Чилии, Тангнары) не испытывают изменений в датах прохождения максимального стока, что объясняется вероятно меньшей интенсивностью проявлений климатических изменений на равнинных территориях.

Климатические изменения минимального летне-осеннего стока рассматриваемых рек выражены в меньшей степени, чем изменения максимального и годового стока. Статистически достоверное увеличение нормы минимального стока летне-осеннего периода наблюдается для всех постов на Вилюе, исключая пост Хатырык-Хомо, а также для реки Кемпендяй и замыкающего створа реки Мархи. Для постов Кемпендяй и Сьюльдюкар минимальный сток после 1987 г. вырос более чем на 70%, для остальных постов – более чем на 35%. Возможной причиной увеличения минимального летне-осеннего стока может быть возросшая в результате повышения температуры воздуха отдача воды из подземных горизонтов из-за таяния многолетней мерзлоты [Сценарная оценка ..., 2011]. По тому же источнику при увеличении за последние 30 лет в бассейне Лены среднегодовой температуры воздуха до 1–1,5 °С изменения толщины сезонно-талого слоя из вечной мерзлоты за счет влияния снежного покрова, гидрологических и почвенных факторов, и в особенности растительности, за этот период были менее выраженными. В ближайшее десятилетие прогнозируется увеличение сезонного слоя стаивания вечной мерзлоты в бассейне Вилюя в среднем до 30–40 см.

В результате климатических изменений произошло изменение характера автокорреляции минимального стока. Значимый коэффициент автокорреляции минимального стока на постах в бассейне Вилюя уменьшился и даже стал статистически незначимым. Причины таких сильных изменений можно выделить только при гораздо более детальном анализе факторов формирования стока и его внутригодового распределения. Даты наступления минимальных расходов воды рассматривались с дискретностью в пол-

месяца. Если максимальные расходы воды весеннего половодья, как правило, тяготеют для каждого поста к одной какой-либо декаде, то минимальный расход летне-осеннего периода может проходить почти с равной частотой в течение всего межлетнего периода, и значимых трендов, связанных с изменениями климата, выделить нельзя.

В целом в результате изменения климата происходит некоторое увеличение годового стока, максимального стока весеннего половодья и минимального стока летне-осеннего периода, несмотря на то, что в ряде случаев статистические критерии не отвергают гипотезы однородности. Единая направленность современных изменений стока показывает общность гидрологических процессов на всей территории бассейна.

Интересна картина пространственного распределения климатических изменений стока. Для ее определения было дополнительно проведено исследование на синхронность и синфазность в пределах территории бассейна многолетних колебаний годового стока. Вопреки многим работам по гидрологическому районированию территории [Кузин, Бабкин, 1979], многолетние колебания годового стока нельзя назвать синхронными для всего бассейна Вилюя. В бассейне наблюдаются области как крайне высокой скоррелированности колебаний годового стока, так и крайне низкой. Наступление фаз повышенной и пониженной водности также имеет значительные различия для разных частей бассейна. Поэтому была предпринята попытка выделить в пределах бассейна несколько районов с синхронными и синфазными колебаниями стока. Для этого были построены разностно-интегральные кривые для бассейнов средних рек (с площадью водосбора 2–50 тыс. км<sup>2</sup>) за общий для них период наблюдений (с 1975 по 2013 гг.), по которым оценивалась синхронность наступления на них фаз повышенной и пониженной водности. В результате среди рассматриваемых гидрологических постов были выделены 3 группы со схожей формой разностно-интегральных кривых за общий период наблюдений (рис. 2). При этом в пределах каждой группы значения коэффициента корреляции между рядами стока двух постов составляют более 0,6. На карте бассейна полученные группы рек можно выделить в 3 района, согласующихся с физико-географическим районированием бассейна: горные и полугорные территории Вилюйского плато на северо-западе бассейна, полугорья Приленского плато на юго-западе, Центрально-Якутская равнина в низовьях бассейна (рис. 3). Для этих районов характерна различная интенсивность проявления современных климатических изменений стока. Так, в первом районе (в северной части бассейна) наблюдается наиболее значительное увеличение максимального и минимального стока, а также рост годового стока. Реки второго и третьего районов, за исключением малой реки Кемпендяй, не испытывают современных изменений стока, подтверждающихся статистическими критериями.

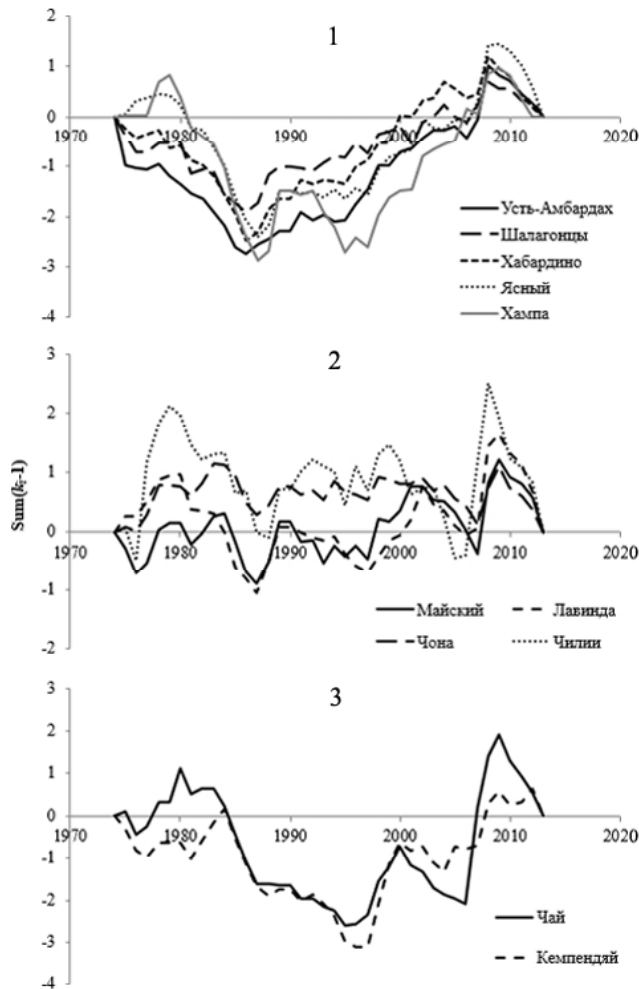


Рис. 2. Разностно-интегральные кривые годового стока рек бассейна Вилюя в пределах выделенных районов с синфазными колебаниями стока 1–3 – объяснение в тексте

Fig. 2. Difference-integral curves of average annual river runoff in the Viluy River basin within the regions with synchronous runoff

**Связь годового стока с климатическими факторами.** Для большинства постов удалось составить линейные эмпирические зависимости среднегодового расхода воды от основных метеорологических факторов. В состав зависимостей вошли 1–3 независимых предиктора, коэффициенты корреляции которых с годовым стоком были максимальны. При этом учитывалась взаимная независимость предикторов: например, расположенные в одной области формирования осадков метеостанции Чумпурук, Мирный, Сунтар, Вилюйск и Хатырык-Хомо имеют между собой коэффициенты парной корреляции 0,45–0,7, что часто не позволяет использовать их вместе при построении зависимости. Наиболее удачными предикторами оказались суммы осадков за гидрологический год (с ноября предыдущего года по октябрь текущего года) по различным станциям, а также среднегодовая температура воздуха ( $T^-$ ) и сумма положительных температур ( $\Sigma T^+$ ) по метеостанции Витим (табл. 3). Сумма положительных тем-

ператур на метеостанции Витим была использована как предиктор для постов Чона и Майский, среднегодовая температура воздуха – только для поста Хатырык-Хомо. Из рядов по осадкам наиболее часто среди предикторов встречаются данные станций Шалагонцы, Витим и Ербогачен, которые расположены в наиболее высотных областях и являются очагами формирования осадков. Для рек северной части бассейна (Мархи и верховья Вилюя) главным предиктором является сумма осадков по станции Шалагонцы, для других рек – Витим и Ербогачен, что соответствует картине формирования стока рек и показывает гидрологическую обоснованность составленных зависимостей. Коэффициенты зависимостей были получены методом наименьших квадратов. Множественный коэффициент корреляции ( $R$ ) для всех построенных зависимостей превышает 0,6, во многих случаях достигая 0,7 и более, однако среднеквадратическая погрешность расчета ( $S$ ) почти во всех случаях оказалась очень велика. Только для замыкающего створа Вилюя – Хатырык-Хомо – эффективность методики расчета можно признать удовлетворительной со значением показателя  $S/\sigma < 0,8$ , где  $\sigma$  – это стандартное среднеквадратическое отклонение. Для остальных построенных зависимостей величина  $S/\sigma$  находится в пределах 0,8–1. Это показывает явную недостаточность имеющихся сведений о метеорологических характеристиках для точного расчета и прогноза стока. Только для наиболее крупной территории (весь бассейн Вилюя) осреднения по имеющимся метеостанциям достаточно для каких-либо вычислений.

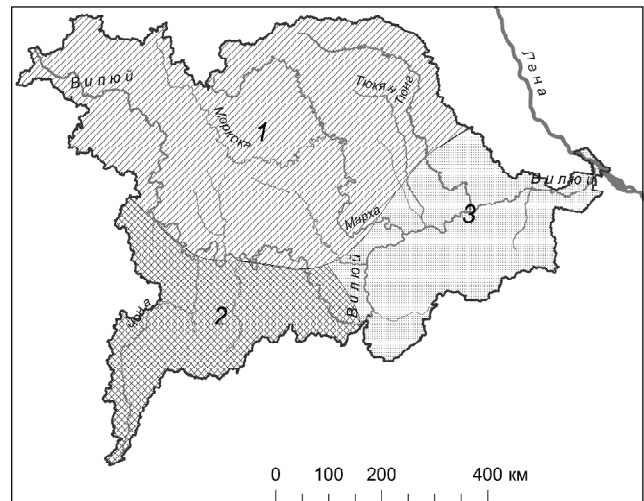


Рис. 3. Районы синфазных колебаний годового стока рек бассейна Вилюя: 1 – горные и полугорные территории Вилюйского плато на северо-западе бассейна; 2 – полугорные территории Приленского плато на юго-западе бассейна; 3 – Центрально-Якутская равнина в низовьях бассейна

Fig. 3. Regions of the Viluy River basin with synchronous annual river runoff: 1 – highlands of Viluy plateau in the north-western part of the basin; 2 – highlands of Lena plateau in the south-eastern part of the basin; 3 – Central Yakutia plain in lower parts of the basin

Таблица 3

**Параметры построенных эмпирических зависимостей годового стока от климатических факторов**

Река	Пост	Коэффициенты регрессионной зависимости									R	
		свободный член	годовая сумма осадков на метеостанции							$\Sigma T^+$		$T^-$
			Сунтар	Виллойск	Шалагонцы	Витим	Ербогачен	Хатырык-Хомо	Витим			
Виллой	Усть-Амбардах	-122	0,49	-	0,63	-	0,49	-	-	-	0,61	
	Сунтар	-523	1,68	-	1,34	1,07	-	-	-	-	0,69	
	Хатырык-Хомо	-965	-	-	2,49	3,64	-	-	-	-31,1	0,68	
Марха	Шалагонцы	6,81	-	-	0,32	-	-	-	-	-	0,67	
	Чумпурук	-88,6	-	0,50	1,21	-	-	-	-	-	0,75	
	Малькай	-181	-	-	1,24	-	0,75	-	-	-	0,78	
Моркока	Хабардино	-39,9	-	0,075	-	0,11	0,26	-	-	-	0,64	
Чона	Чона	101	-	-	-	0,12	0,10	-	-1,80	-	0,70	
Чуркуо	Лавинда	-17,7	-	-	0,018	0,034	0,040	-	-	-	0,70	
Ичода	Майский	5,46	0,023	-	-	0,025	-	-	-0,20	-	0,60	
Батыр	Ясный	-12,5	-	-	-	0,052	0,020	-	-	-	0,76	
Ыгыатта	Хампа	-21,0	-	-	-	0,062	0,045	-	-	-	0,64	
Чилии	Чай	-3,90	0,017	-	-	0,92	-	0,042	-	-	0,65	

**Выводы:**

- в результате регулирования стока Виллой каскадом водохранилищ, начиная с 1967 г., отмечено значительное уменьшение среднего значения дисперсии максимального стока весеннего половодья (около 50%), достигающего устья реки, а также уменьшение дисперсии минимального стока летне-осеннего периода, распространяющегося на меньший участок;
- в многолетнем ходе характеристик стока и метеоэлементов выделен единый для всех водосборов год начала нарушения однородности рядов 1987;
- для всех рассмотренных рек бассейна Виллой в результате климатических изменений после 1980-х

годов наблюдается направленное увеличение годового, максимального и минимального стока, связанное с изменениями климата, достигающее в отдельных случаях 50% и более;

- выявлена пространственная неоднородность климатических изменений стока рек бассейна Виллой; выполнено районирование территории бассейна по синхронности колебаний годового стока и единому характеру проявления климатических изменений стока;

- для большинства постов составлены эмпирические зависимости годового стока от осадков и температуры воздуха, позволяющие проводить оценочные расчеты.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Аржакова С.К. Зимний сток рек криолитозоны России. СПб.: РГМУ, 2001. 209 с.

Георгиади А.Г., Какутина Е.А. Региональные особенности изменений во времени притока речных вод в Северный Ледовитый океан // Полярная криосфера и воды суши. М.: Paulsen, 2011. С. 252–264.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Какутина Е.А., Бородин О.О. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: МАКС Пресс, 2011. 180 с.

Кузин П.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 200 с.

Лебедев М.П., Ноговицын Д.Д. Зимний сток реки Виллой // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. № 1–3. Т. 11. С. 307–309.

Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Водные ресурсы. Т. 35. № 1. 2008. С. 3–16.

Магрицкий Д.В. Речной сток и гидрологические расчеты: практические работы с выполнением при помощи компьютерных программ. М.: Триумф, 2014. 184 с.

Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Виллой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 85–95.



*Ноговицын Д.Д.* Водные ресурсы Якутской АССР и их использование. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. 124 с.

*Семенова О.М.* Исследование процессов формирования стока на малоизученных водосборах (на примере бассейна р. Лены) // Вестн. Санкт-Петербургского гос. ун-та. 2008. Сер. 7. № 3. С. 89–97.

*Чистяков Г.Е.* Водные ресурсы рек Якутии. Наука, 1964. 253 с.

*Berezovskaya S., Yang D., Hinzman L.* Long-term annual water balance analysis of the Lena River // *Global and Planetary Change*. 2005. V. 48. P. 84–95.

*Ye B., Yang D., Kane D.L.* Changes in Lena River streamflow hydrology: Human impacts versus natural variations // *Water Resources Research*. 2003. V. 39(7). 1200 p.

Поступила в редакцию 21.06.2016

Принята к публикации 09.06.2017

**N.M. Yumina<sup>1</sup>, M.A. Tereshina<sup>2</sup>**

### ESTIMATING LONG-TERM CHANGES OF RIVER RUNOFF IN THE VILUY RIVER BASIN

To better understand recent long-term runoff variations in the Viluy River basin and more efficiently plan human activities within its drainage area we conducted the spatio-temporal analysis of long-term river runoff fluctuations basing on the newest hydrometeorological data. The analysis also helps to evaluate the human impact on water resources of the region under study. Dates and the most probable causes of heterogeneity in time-series of annual mean, maximum and minimum runoff of the Viluy River and its tributaries in 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> centuries were identified. Results of the research based on the most complete data on runoff fluctuations for different rivers of the basin, made it possible to reveal the intensity of recent changes in stream flow hydrology in the Viluy River basin and update their quantitative estimates. The zoning of the basin area in terms of the long-term runoff fluctuation patterns was accomplished and the empirical relationships between mean annual runoff and precipitation and air temperature were suggested allowing the estimates of future runoff changes.

*Key words:* spatio-temporal analysis of runoff; annual, maximum and minimum runoff.

#### REFERENCES

*Arzhakova S.K.* Zimniy stok rek kriolitozony Rossii [Winter runoff of Russian permafrost zone rivers] SPb.: RGGMU, 2001. 209 p. (in Russian).

*Berezovskaya S., Yang D., Hinzman L.* Long-term annual water balance analysis of the Lena River // *Global and Planetary Change*. 2005. V. 48. P. 84–95.

*Chistyakov G.Ye.* Vodnye resursy rek Yakutii [Yakutia river water resources]. Nauka, 1964. 253 p. (in Russian).

*Georgiadi A.G., Kashutina Ye.A.* Regionalnye osobennosti izmenenij vo vremeni pritoka rechnyh vod v Severnyj Ledovityj okean [Regional features of the time changes in river runoff to the Arctic Ocean] // *Polyarnaya kriosfera i vody sushi*. Moscow: Paulsen. 2011. P. 252–264 (in Russian).

*Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kislov A.V., Anisimov O.A., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Borodin O.O.* Scenarnaya ocenka veroyatnyh izmenenij rechnogo stoka v bassejnah krupnejshih rek Rossii. Chast' 1. Bassejn reki Leny [Scenario-based assessment of likely changes of river runoff in the basins of the largest rivers of Russia. Part 1. The Lena River basin]. M., 2011. 180 p. (in Russian).

*Kuzin P.S., Babkin V.I.* Geograficheskie zakonomernosti gidrologicheskogo rezhima rek [Geographical patterns of river hydrologic regime]. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 200 p.

*Lebedeva M.P., Nogovitsyn D.D.* Zimnij stok reki Viluy [Winter run off of the Viluy river] // *Izv. Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2009. № 1–3. V. 11. P. 307–309 (in Russian).

*Magritskiy D.V.* Antropogennyye vozdeystviya na stok rek, vpadayuschih v morya Rossijskoj Arktiki [Human impact on river runoff to the Russian sector of the Arctic Ocean] // *Vodnye resursy*. V. 35. № 1. 2008. P. 3–16 (in Russian).

*Magritskiy D.V.* Faktory i zakonomernosti mnogoletnih izmenenij stoka vody, vzheshennyh nanosov i teploty Nizhney Leny i Viluya [Features and regularities of the long-term fluctuations of water flow, suspended sediment and heat runoff in the lower Lena and Viluy rivers] // *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2015. № 6. P. 85–95 (in Russian).

*Magritskiy D.V.* Rechnoj stok i gidrologicheskie raschety: prakticheskie raboty s vypolneniem pri pomoschi komp'yuternyh programm [River runoff and hydrological calculations: practical work using computer programs]. M.: Triumf, 2014. 184 p. (in Russian).

*Nogovitsyn N.N.* Vodnye resursy Yakutskoj ASSR i ih ispolzovanie [Water resources of the Yakut ASSR and their use]. Yakutsk: YAF AN SSSR, 1985. 124 p. (in Russian).

*Senenova O.M.* Issledovanie processov formirovaniya stoka na maloizuchennyh vodosborah (na primere bassejna r. Leny) [Studying run off formation processes in poorly gauged river basins (case study of the Lena River basin)] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gos. un-ta*. 2008. Ser. 7. № 3. P. 89–97 (in Russian).

*Ye B., Yang D., Kane D.L.* Changes in Lena River streamflow hydrology: Human impacts versus natural variations // *Water Resources Research*. 2003. V. 39(7). 1200 p.

Received 21.06.2016

Accepted 09.06.2017

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Hydrology, Senior Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: yuminanm@mail.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Hydrology, student; e-mail: sort.of.nickname@gmail.com