

УДК [556.16:556.535+627.8:628.1+551.583](282.256.67+282.256.66)

Д.В. Магрицкий¹**ФАКТОРЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА ВОДЫ, ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ И ТЕПЛОТЫ НА НИЖНЕЙ ЛЕНЕ И ВИЛЮЕ**

Рассмотрены особенности и закономерности сезонных и многолетних колебаний стока воды, взвешенных наносов и теплоты на нижней Лене и Вилюе, приведены новые оценки параметров распределения стока. Приведены результаты анализа климатических и антропогенных факторов пространственно-временной изменчивости характеристик речного стока и температуры воды, вклада в эти изменения процессов в верховьях и на нижнем участке р. Лены, в бассейнах рр. Алдан и Виллой. Для ряда основных гидрологических характеристик выполнена количественная оценка вклада в их изменчивость разных факторов. Рассмотрено влияние виллюйских водохранилищ на отдельные характеристики речного стока и температурные условия р. Виллой. Приводятся ряд расчетных и прогностического свойства эмпирических зависимостей.

Ключевые слова: река, бассейн, сток воды, наносов и теплоты, температура, климатические и антропогенные факторы, водохранилище, Лена, Виллой.

Введение. В последние десятилетия в гидрологии заметно усилилась актуальность оценок интегрального воздействия изменений климата и хозяйственной деятельности на водные объекты и их гидрологические характеристики. Композиция этих факторов генерирует значимые изменения гидрологического режима водных объектов, русловых и устьевых процессов, гидроэкологических условий, характеристик опасных гидрологических явлений, эффективности и безопасности водопользования и др. Трансформация величины и режима стока больших рек может влиять на приемные морские водоемы или на их части, а следовательно, на процессы в атмосфере. Особенно подвержен крупномасштабным текущим изменениям огромный сток рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана. Проблема состоит в том, что большинство проведенных в отношении арктических рек России исследований, во-первых, сводится к оценкам реакции лишь водного стока и качества воды на воздействия изменений климата; во-вторых, они часто базируются на устаревших или неполных данных; в-третьих, не отличаются комплексным подходом и детальностью. В ряду таких рек с недостаточно актуализированными оценками находится и р. Лена, несмотря на ее большие размеры, степень влияния на гидрологические процессы в восточном секторе Арктики и огромную важность для природной среды, экономики и населения Восточной Сибири. Отдельные аспекты современных изменений стока и режима реки рассмотрены в работах [Вода..., 2001; Водные..., 1995; Водные..., 2008; Магрицкий, 2001, 2009, 2010; Сценарная..., 2011; Шикломанов и др., 2005; Liu et al., 2005; Magritskii, 2008; Ye et al., 2003]. Результаты исследований, изложенные в статье и базирующиеся на самых последних данных, существенно дополняют и уточня-

ют имеющиеся сведения, охватывают не только сток воды, но и сток наносов и теплоты, температурный режим, содержат оценки вклада климатического и антропогенного воздействия в сезонную и многолетнюю изменчивость процессов в разных частях водосбора, обозначают важные закономерности, позволяют получить представление о дальнейшем характере изменений.

Материалы и методы исследований. Информационной основой для исследований послужили многолетние ряды наблюдений на 17 гидрологических постах (гп) Росгидромета с 1926 по 2013 г. в среднем течении и низовьях главной реки и на ее притоках (расход воды, Q ; температура воды, T ; мутность воды, s ; расход взвешенных наносов, R ; даты ледовых явлений) (табл. 1), а также данные измерений температуры воздуха (t) и слоя осадков на 28 метеостанциях. Источник метеоданных – Мировой центр данных в г. Обнинск [URL: <http://meteo.ru/data>, 2015]. В месячные суммы осадков внесены соответствующие поправки на смачивание и замену дождемеров (на осадкомеры). Кроме того, рассмотрены данные о водопользовании за 1980–2013 гг. из [Государственный..., 1980–2014 гг.], ежегодные сведения о водном балансе Виллюйского водохранилища (1967–2012), информация с официальных сайтов субъектов водохозяйственного комплекса, ряд важных результатов предыдущих исследований.

Во время исследования и обработки обширного массива данных применялись различные методы. Основными стали стандартные гидрологические расчеты (в соответствии с СП 33-101-2003 и другими нормативными документами), а также статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации с проверкой рядов характеристик стока воды на соответствие основным статистическим гипотезам (при 5%-ном уровне зна-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент; e-mail: magdima@yandex.ru

Т а б л и ц а 1

Основные сведения о гидрологических постах в нижней части бассейна р. Лена

Река	Пост	Удаление от устья, км	Площадь бассейна, км ²	Координаты	Тип поста
Лена	с. Табага	1527*	897 000	61,50 N 129,36 E	стоковый
	г. Якутск	1491*	904 000	62,02 N 129,45 E	уровенный
	с. Жиганск	754*	2 170 000	66,46 N 123,24 E	уровенный
	с. Кюсюр	211*	2 430 000	70,41 N 127,24 E	стоковый
Алдан	с. Охотский Перевоз	562	514 000	61,52 N 135,30 E	стоковый
	Верхоянский Перевоз	151	696 000	63,19 N 132,01 E	стоковый
Виллюй	р.п. Чернышевский (ГЭС-1,2)	1345	136 000	63,03 N 112,50 E	стоковый
	2,3 км выше р. Очугуй-Ботубуйа	1175	161 000	—	стоковый
	с. Сюльдюкар	1142	168 000	63,13 N 113,38 E	стоковый
	с. Виллючан	944	181 000	62,60 N 115,67 E	уровенный
	пос. Крестьях	883	188 000	62,16 N 116,09 E	уровенный
	с. Сунтар	740	202 000	62,09 N 117,39 E	стоковый
	с. Нюрба	565	234 000	63,17 N 118,20 E	уровенный
	с. Верхневиллюйск	435	360 000	63,27 N 120,19 E	уровенный
	г. Виллюйск	327	426 000	63,46 N 121,37 E	уровенный
	пос. Хатырык-Хомо	122	452 000	63,57 N 124,50 E	стоковый
	пос. Промышленный	19	454 000	64,12 N 126,23 E	уровенный

*От о. Столб в дельте.

чимости): однородности и стационарности – на базе критериев Диксона (D), Фишера (F, или *F-test*) и Стьюдента (St, или *t-test*) применительно к коррелированной во времени и асимметричной гидрологической информации [Магрицкий, 2014], независимости – с привлечением критериев Андерсена (*t(A)*) и числа серий (*t(u)*), наличие тренда – на основе критерия Спирмена (*r_s*, или *Spearman RCC*), и др. Построены разнообразные эмпирические зависимости и хронологические графики, оценены их теснота и достоверность. Часть статистического анализа выполнена в программах HydroStatCalc (разработчик ГТИ), Гидрорасчеты (НПО «Гидротехнологии») и Statistica (StatSoft). Расчет величины теплового стока W_T осуществлялся по формуле: $W_T = c_p \rho T W$, где c_p – удельная теплоемкость воды (кДж/(кг·°C)), ρ – плотность воды (кг/м³), T_d – средняя за декаду температура воды (°C), W – декадный объем стока воды (м³). Кроме того, выполнен сравнительный анализ многолетнего хода гидрологических и метеорологических характеристик, расчет кривых вдольрусловой трансформации среднемесячной температуры воды для характерных периодов и др.

Результаты исследований и их обсуждение.

Климатические изменения в бассейне р. Лена. В бассейне р. Лена, несмотря на его огромные размеры и контрастные природные условия, заметное увеличение значений среднегодовой температуры приземного воздуха (ТПВ) фиксируется на всей территории почти одновременно – с 1988 г. Этот момент предвещает (начиная с 1980–1981 гг.) период с близкими к средним климатическим условиям

значениями температуры воздуха, а на ряде метеостанций (мс) – даже с положительными аномалиями ТПВ (АТПВ). В 2000-х гг. на северо-востоке от условной линии пос. Ессей–с. Чагда отмечен новый, причем на ряде метеостанций скачкообразный рост годовых ТПВ, тогда как на юго-западе от этой переходной зоны (с неопределенной шириной) подобная тенденция в многолетних колебаниях ТПВ отсутствует. Предыдущее масштабное потепление зафиксировано во второй четверти XX в. В нижней части бассейна и на арктическом побережье оно было заметнее всего и продолжалось до 1950-х гг.

Среднее по бассейну отклонение ТПВ в 1980–2013 гг. от нормы, относящейся к общепринятому базовому периоду 1961–1990 гг., составило ~0,6–1 °C. Величина потепления сначала возрастает в южном (от низовьев р. Лена и Верхоянского хребта к Центрально-Якутской равнине и Приленскому плато) направлении – от 0,7 до 0,9–1 °C (до 1,3 °C на мс Якутск), но дальше на юг, с повышением высоты местности, аномалии температуры опять уменьшаются до 0,6–0,8 °C. Коэффициент линейного тренда годовых ТПВ (1980–2013) достигает в нижней и средней частях бассейна Лены 0,40–0,55 °C/10 лет (с величиной вклада тренда в дисперсию 15–25%), в верховьях Лены и в бассейне р. Алдан уменьшается до 0,15–0,25 °C/10 лет (~2–10%). Аномалии ТПВ в 1988–2013 гг. в среднем на 0,2–0,3 °C превышают АТПВ за 1980–2013 гг.

Современный рост годовых ТПВ обусловлен потеплением во все сезоны года, но главным обра-

зом зимой (0,6–1,2 °C в 1980–2013 гг.) и весной (0,6–1,5 °C). В то же время после 1980–1990-х гг. рост зимних значений ТПВ практически прекратился, а на ряде мс фиксируется даже некоторое снижение. Так, на одних мс – с середины 1990-х гг., на других – в 2000-х гг. Значения АТПВ летнего сезона составили в среднем 0,6–0,8 °C, для осеннего – 0,4–0,8 °C.

Пространственная и временная структура изменчивости суммы осадков существенно более неоднозначна. В целом период 1980–2013 гг. в бассейне Лены характеризуется увеличением годовой суммы осадков (4–10% нормы/10 лет, величина вклада тренда в дисперсию составляет 3–19%), в основном за счет роста с конца 1990-х гг. и особенно с начала и середины 2000-х гг., что согласуется с оценками из работы [Доклад..., 2014]. Таким образом, осадки в регионе отреагировали на потепление намного позднее, чем ТПВ. Аномалии годовых сумм осадков равны для 1980–2013, 1990–2013 и 2000–2013 гг. 4–9 (или 22 мм), 8–11 и 10–20% соответственно. В последние 35 лет количество осадков в первую очередь увеличивалось в летний (~47%) и осенний (~34%) сезоны. Вклад весенней составляющей составил 15%, а зимней – всего 4%. В бассейне Лены на многих мс зафиксированы отрицательные аномалии количества зимних осадков. Другая выявленная особенность заключается в очень нечетких пространственно-временных закономерностях многолетнего колебания суммы количества осадков за весенний и зимний сезоны.

Антропогенное воздействие на водный сток рек Лена и Вилюй. В бассейне Лены антропогенные изменения величины и режима стока воды связаны в первую очередь с водопотреблением и эксплуатацией водохранилищ [Вода..., 2001; Магрицкий, 2001; Сценарная..., 2011; Magritskii, 2008]. Водопотребление достигло наибольшего объема в первой половине 1980-х гг. [Государственный..., 1982–2014]. Суммарный годовой забор воды составлял 0,45 км³, в том числе из подземных источников 0,08 км³/год. В речную сеть отводилось 0,36 км³/год, т.е. на 0,09 км³ меньше, чем отбиралось воды. К середине 1990-х гг. размеры водопотребления заметно снизились и впоследствии не испытывали направленных колебаний. Суммарный водозабор за период 2001–2013 гг. составил 0,3 км³/год (при доле подземных вод ~50%), сброс воды – 0,23 км³/год, т.е. величина безвозвратных изъятий, по сути, не изменилась, а при учете отвода использованных вод обратно в подземные источники (0,07 км³/год) практически близка к нулю.

Основными потребителями речных и подземных вод, источниками их загрязнения согласно «Схеме комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Лены» (СКИОВО, принята в 2014 г.) выступает промышленность (~53% всего объема), а вместе с теплоэнергетикой ее доля равна 61%. На жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) приходится ~27%, на сельское хозяйство – 5,3%, на другие отрасли водохозяйственного комп-

лекса – 7%. В территориальном отношении наибольший вклад в водозабор вносит хозяйственная деятельность в бассейнах рек Вилюй (~19%), Алдан (~24%) и Витим (~25%) [Сценарная..., 2011]. Значительно меньше водопотребление в бассейне р. Олекма (~3,5%).

Существенно больше на режим Лены влияют гидротехнические сооружения (ГТС), но и это воздействие не сопоставимо с влиянием климатических факторов. Сток Лены не зарегулирован, однако на ее левобережном крупном притоке р. Вилюй расположено Вилюйское водохранилище – одно из крупнейших в стране. Его площадь при нормальном подпорном уровне (НПУ) – 2176 км², полный и полезный объемы – 35,88 и 17,83 км³ соответственно [Magritskii, 2008]. Наполнение водохранилища происходило в 1967–1973 гг., период нормальной эксплуатации отсчитывают с 1974 г. С осени 2004 г. в 141 км от Вилюйских ГЭС–1,2 функционирует Светлинская ГЭС (или Вилюйская ГЭС–3), ее плотина подпирала водохранилище с площадью 104 км², полным и полезным объемом 1,08 и 0,19 км³ соответственно. Первое водохранилище осуществляет многолетнее и полное сезонное регулирование Вилюя, второе – недельное и суточное. Всего в бассейне Лены, по данным СКИОВО и сведениям из [Magritskii, 2008], создано 142 искусственных водоема общим объемом 37,5 км³ и площадью 2320 км².

Гидроэнергетическое строительство ведет к изменению гидрографических параметров водотоков, величины и режима стока. Связанные с эксплуатацией вилюйских гидроузлов суточные колебания уровня воды прослеживаются в Вилюе на расстоянии 300–400 км ниже плотины ГЭС–3, недельное регулирование – до 700–850 км от плотины, т.е. выше впадения в Вилюй рек Марха и Тюнг. Сезонное и межгодовое регулирование стока сохраняется вплоть до устья р. Вилюй, а отдельные его элементы прослеживаются на нижнем участке Лены.

До начала заполнения Вилюйского водохранилища на весенний (май–июль), летне-осенний (август–октябрь) и зимний гидрологические сезоны в створе ГЭС–1,2 приходилось 79, 20 и 1% годового стока воды соответственно (1959–1966). В период нормальной эксплуатации гидроузла распределение по сезонам составило 26, 18 и 56%. В 580 км от плотины ГЭС–1,2 (с. Сунтар) вместо 81, 18 и 1% оно стало 40, 15 и 45%; в 1200 км (пос. Хатырык-Хомо) – 77, 21 и 2% и 59, 17 и 24% соответственно. В абсолютных величинах зимний сток увеличился на трех гидропостях на ~700, 700 и 650 м³/с соответственно, сток весеннего половодья уменьшился на ~1450, 1500 и 1300 м³/с, а сток летне-осеннего сезона сократился на ~70, 130 и 280 м³/с. Поскольку сравниваемые периоды характеризуются схожей водностью и внутригодовым распределением стока на не зарегулированном участке Вилюя и его основных притоках, то полученные оценки характеризуют вклад именно антропогенного фактора. Особенности изменения стока р. Вилюй под воздействием всех факторов (климатического и антропогенного) и в гра-

Таблица 2

Характеристики месячного, сезонного и годового стока воды (W), взвешенных наносов (W_R), теплоты (W_T) и температуры воды (T) в среднем и нижнем течении р. Вилюй

Характеристика	Весеннее половодье, месяцы			Летне-осенняя межень с паводками, месяцы			Зимняя межень, месяцы	За год
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI-IV	
Гп Сюльдюкар, 175 км ниже ГЭС-1,2 и в 1145 км выше устья р. Вилюй								
W , км ³	<u>н.д.</u> 3,55	<u>н.д.</u> 3,32	<u>н.д.</u> 2,80	<u>н.д.</u> 1,58	<u>н.д.</u> 1,56	<u>н.д.</u> 1,60	<u>н.д.</u> 11,3	<u>н.д.</u> 25,7
W_T , 10 ¹² кДж	<u>н.д.</u> 50	<u>н.д.</u> 119	<u>н.д.</u> 120	<u>н.д.</u> 76	<u>н.д.</u> 52	<u>н.д.</u> 16	<u>н.д.</u> <1,5	<u>н.д.</u> 435
T , °C	<u>н.д.</u> 3,0	<u>н.д.</u> 9,3	<u>н.д.</u> 12,0	<u>н.д.</u> 12,7	<u>н.д.</u> 8,2	<u>н.д.</u> 2,4	<u>н.д.</u> <0,2	<u>н.д.</u> 4,0
Гп Сунтар, 580 км ниже ГЭС-1,2 и 740 км выше устья р. Вилюй								
W , км ³	<u>6.40</u> 5,20	<u>9.50</u> 3,85	<u>2.87</u> 3,14	<u>1.44</u> 1,72	<u>1.65</u> 1,57	<u>0.93</u> 1,50	<u>0.34</u> 11,5	<u>23.1</u> 28,5
W_R , тыс. т *	<u>211</u> 89,6	<u>237</u> 35,0	<u>21,1</u> 22,0	<u>11,5</u> 13,2	<u>4,5</u> 8,5	<u>1,9</u> 3,4	<u>0,2</u> 22,9	<u>487</u> 195
W_T , 10 ¹² кДж	<u>47</u> 67	<u>443</u> 204	<u>224</u> 201	<u>100</u> 106	<u>59</u> 56	<u>4</u> 9	<u>~0</u> ~0	<u>877</u> 644
T , °C	<u>1.3</u> 2,5	<u>11.7</u> 13,7	<u>19.0</u> 17,2	<u>16.8</u> 16,3	<u>8.6</u> 8,9	<u>0.9</u> 1,2	<u>~0</u> ~0	<u>4.9</u> 5,0
ГП Хатырык-Хомб, 1200 км ниже ГЭС-1,2 и 122 км выше устья р. Вилюй								
W , км ³	<u>7.72</u> 8,70	<u>21.1</u> 16,2	<u>7.60</u> 7,64	<u>3.50</u> 3,80	<u>3.82</u> 3,70	<u>2.10</u> 2,30	<u>1.00</u> 11,9	<u>46.8</u> 54,2
W_R , тыс. т **	<u>293</u> 293	<u>1350</u> 650	<u>169</u> 164	<u>65.6</u> 56,8	<u>45.5</u> 59,3	<u>27.2</u> 16,8	<u>3.0</u> 45,5	<u>1953</u> 1285
W_T , 10 ¹² кДж ^{3***}	<u>19(40)</u> 102	<u>1070(980)</u> 826	<u>608(570)</u> 591	<u>226(220)</u> 257	<u>106(120)</u> 116	<u>6(5)</u> 9	<u>~0</u> ~0	<u>2035(1935)</u> 1900
T , °C ^{***}	<u>0.5</u> 1,4	<u>11.2</u> 13,0	<u>17.7</u> 18,6	<u>14.9</u> 16,0	<u>6.0</u> 7,7	<u>0.4</u> 0,7	<u>~0</u> ~0	<u>4.2</u> 4,8

Примечания. Над чертой приведены данные за 1935–1966 гг., под чертой – за 1974–2012 гг. за исключением:
* над чертой – за период 1957–1966 гг., под чертой – без учета данных за 1997 г.; ** над чертой – за период 1957–1966 гг., под чертой – без учета данных за 1996–1998, 2002, 2011–2012 гг.; *** над чертой – за 1953–1966 гг.; в скобках – приведены к периоду 1935–1966 гг.

ницах всего многолетнего ряда наблюдений охарактеризованы в табл. 2. Согласно данным табл. 2, фиксируемое на водосборе с 1986–1988 гг. и климатически обусловленное увеличение стока в весенний и летне-осенний гидрологические сезоны и в целом годового стока в некоторой мере компенсировало влияние Вилюйского водохранилища.

Кроме того, вилюйские водохранилища влияют на годовой сток Вилюя. Изменения были связаны, во-первых, с заполнением мертвого объема водохранилищ (18,05 км³/5 лет для первого водоема и 0,9 км³/1–2 года для второго) и первоначальным водонасыщением грунтов его ложа. Это единовременные потери, увеличивающие стационарные водные ресурсы бассейна. К ежегодному воздействию относят потери на испарение воды (E) с акваторий водохранилищ и подтопленных прибрежных территорий, а также многолетнее регулирование стока. Для Вилюйского водохранилища E составляет 0,85 км³/год (1976–2012) и еще 0,1 км³/год испаряется с зоны подтопления [Magritskii, 2008]. Для всего бассейна Лены общее испарение с искусственных водоемов, по-видимому, не превышает 0,9 км³/год. Из них ~0,2 км³/год – так называемые потери на

дополнительное испарение (реальные потери), создаваемые превышением E с акватории водохранилища над E с этой же территории, но до его создания. Многолетнее регулирование речного стока почти не изменяет его норму, но влияет на годовые значения стока и межгодовую изменчивость. Для р. Вилюй величина этого регулирования изменялась от –8,5 до +5,6 км³/год.

Закономерности изменчивости водного стока в низовьях Лены. Гидрологические условия в низовьях Лены и на речной границе ее дельты характеризуются данными наблюдений на замыкающем створе – гп Кюсюр ($F=2430$ тыс. км²). Пост расположен перед вхождением реки в Ленскую трубу, на 145 км выше вершины дельты и в 361 км от моря, или на расстоянии 2220 км от Вилюйской ГЭС-1,2. Пост функционирует с 1934 г., осуществляя весь комплекс гидрологических измерений. Но полноценные измерения Q завершены в 2012 г., а расходов взвешенных наносов – в 2010 г.

За 1927–2013 гг. (с учетом приведения к более длительному ряду постов Табага и Якутск) средний многолетний Q нижней Лены у с. Кюсюр составил 17 200 м³/с, а годовой объем стока (W_p) – 542 км³/год.

К морю W_r , благодаря боковой приточности и выпадению осадков в огромной дельте, увеличивается приблизительно на 10 км^3 . Сопоставление нормы стока с максимальной величиной водохозяйственной нагрузки ($\Delta W_{\text{хоз}}$), состоящей из полного водозабора и потерь стока на испарение с водохранилищ, позволяет говорить об отсутствии значимого влияния хозяйственной деятельности как на годовой сток нижней Лены, так и на его многолетний ход: $\Delta W_{\text{хоз}} \approx 1,25 \text{ км}^3/\text{год}$, или $0,23\%$ от $W_r = 552 \text{ км}^3/\text{год}$, или $0,28\%$ от $W_{r,95\%} = 447 \text{ км}^3/\text{год}$. В действительности это воздействие еще меньше ($\sim 0,35 \text{ км}^3/\text{год}$), если учитывать только безвозвратное водопотребление и дополнительное испарение с водохранилищ. Воздействие возрастает лишь в отдельные годы при учете межгодового перераспределения стока и изъятия большого объема речных вод на заполнение мертвого объема водохранилищ.

Межгодовая изменчивость W_r сравнительно невелика ($C_v \approx 0,13$), а коэффициент внутрирядной связи статистически значим ($r(1) = 0,34$; $t(A) = 3,16 > t_{\text{крит}} = 1,96$), что закономерно для очень больших рек. Многолетние колебания W_r нижней Лены отличаются, во-первых, нечеткой цикличностью ($t(u) < 1,96$) и чередованием периодов разной продолжительности и водности (рис. 1, а). К многоводным периодам можно отнести 1927–1938 ($k_{\text{ср}} = 1,05$) и 2004–2013 гг. ($k_{\text{ср}} = 1,13$), к маловодному – 1939–1957 гг. ($k_{\text{ср}} = 0,91$), к среднему по водности – 1958–2003 гг. ($k_{\text{ср}} = 0,99$).

Самый высокий пик периодограммы соответствует периоду продолжительностью $\sim 7,8$ лет; в 2 раза меньше по высоте пики – к периодам 5,7; 14,3 и 43 года. Во-вторых, многолетние колебания W_r характеризуются возрастающим трендом ($r_s = 0,35 > r_{s,\text{крит}} = 0,22$), особенно явным с 1988 г. В 1980–2012 гг. (начало выбранного периода соответствует началу потепления в бассейне) W_r на гп Кюсюр составил $560 \text{ км}^3/\text{год}$ и превысил сток в 1935–1979 гг. на $39 \text{ км}^3/\text{год}$. Около 45% этого роста обеспечено увеличением водности рек в верхней части водосбора, замыкаемого гп Табага ($F = 897 \text{ тыс. км}^2$) (рис. 1, а), 20% пришлось на р. Алдан (729 тыс. км^2), 14% – на р. Вилюй (454 тыс. км^2), 21% – на остальную боковую приточность ($F = 350 \text{ тыс. км}^2$). Абсолютная невязка ($\sum \Delta W_i - \Delta W_{\text{Кюсюр}}$), распределенная пропорционально между водотоками, велика ($\sim 15,6 \text{ км}^3$), поэтому снова встает проблема точности измерений Q на постах рассматриваемого участка Лены, увязки руслового водного баланса, упоминавшейся в работе [Магрицкий, 2001] и так называемых Гидрологических ежегодниках. В отношении сезонной структуры 42% роста годового стока обеспечено увеличением водности половодья (май–июль), 13 и 45% – за счет летне-осеннего и зимнего сезонов (рис. 1, б–г).

Годовой сток нижней Лены сложным образом реагирует на потепление в регионе. При 5-летнем осреднении величин связь между W_r и среднегодовой ТПВ (по 11 метеостанциям) содержит положительную

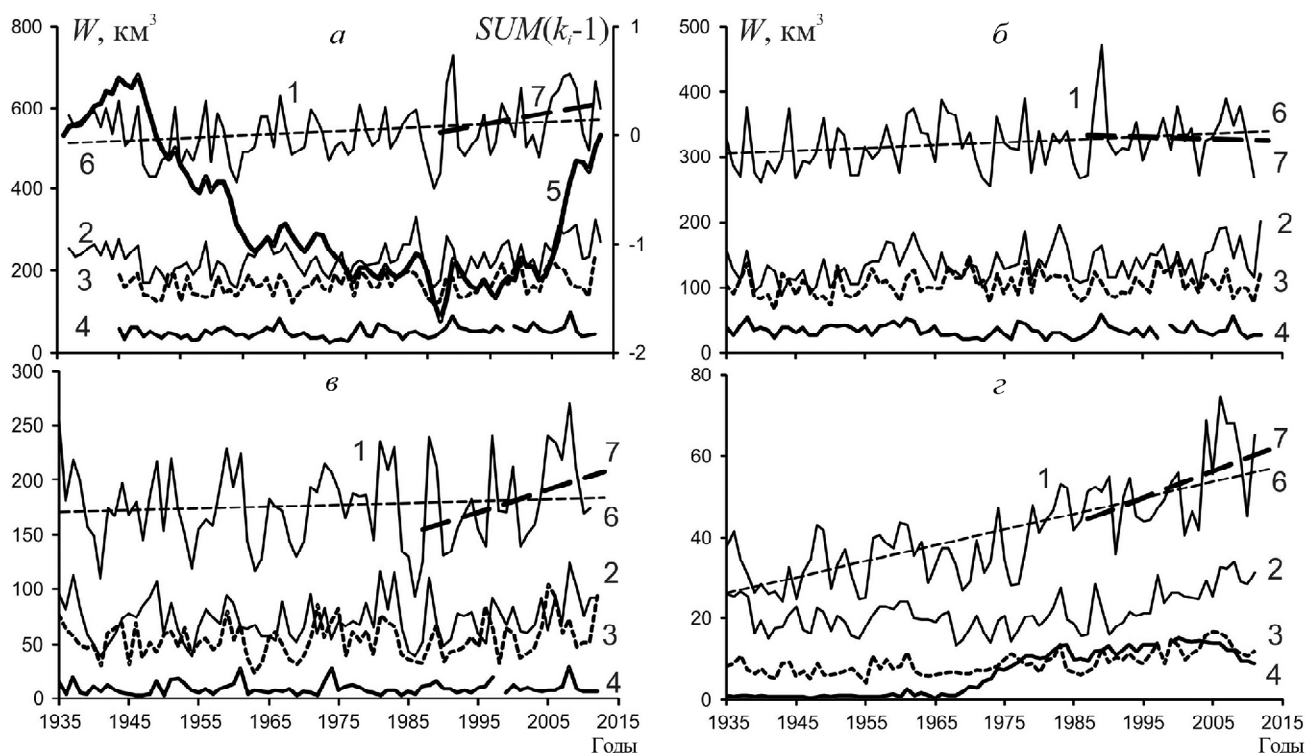


Рис. 1. Многолетние колебания стока воды за год (а), весеннего половодья (б) летне-осенней межени с паводками (в) и зимней межени (г) на реках Лена (1 – гп Кюсюр, 2 – гп Табага), Алдан (3 – гп Верхоянский Перевоз) и Вилюй (4 – гп Хатырык-Хомо) с линейными трендами (6 – за весь период, 7 – за 1988–2012 гг.) и разностная интегральная кривая годового стока нижней Лены (5)

Fig. 1. Long-term fluctuations of water runoff during the year (a), spring flood (b), summer-autumn low water with occasional rainfall floods (c) and winter low water (d) for the Lena River (1 – the Kyusur gauge, 2 – the Tabaga gauge), the Aldan River (3 – the Verkhoyansky Perevoz gauge) and the Vilyui River (4 – the Khatyryk-Khomo gauge); the residual mass annual runoff curve for the lower reaches of the Lena River (5); the linear trends (6 – for the whole period, 7 – for 1988–2012)

трендовую и гармоническую составляющие, причем у последней с ростом t увеличивается амплитуда.

В течение года колебания водного стока соответствуют восточносибирскому типу водного режима. Во время половодья, длящегося в среднем с 18 мая по 31 июля, проходит около 60% годового объема стока (в мае 3,9; в июне 36,2 и в июле 19,4%). Пик половодья соответствуют максимальные за год Q со средней датой 7 июня. На летне-осенний меженно-паводочный период приходится 32,8%: 13,4 (август), 12,2 (сентябрь) и 7,2% (октябрь); на зимнюю межень, начинающуюся в среднем с 3-й декады октября, – 7,7% и наименьшие за год Q (табл. 3). последние фиксируются в конце апреля – начале мая.

периода, среднемесячные с июня по октябрь) проверку на стационарность ряда проходят. Минимальные значения Q лета–осени возросли с 17 000 до 18 200 м³/с и обнаруживают хорошую связь со среднегодовыми значениями Q ($R^2=0,47$). Максимальные значения Q половодья, напротив, уменьшились с 136 000 до 133 000 м³/с, тогда как объем стока увеличился с 315 до 330 км³/год, т.е. волна половодья становится более размытой. Это подтверждают и данные об изменении сроков начала и окончания половодья. Стационарность стока в мае оказалась нарушенной – сток явно увеличился.

Сток наносов. Мутность воды в нижней Лене мала, поскольку эрозионные процессы в бассейне и поступление продуктов размыва в речную сеть ог-

Таблица 3

Основные характеристики стока нижней Лены (гп Кюсюр)

Характеристика	Период	Сток			C_v (C_s/C_v)
		средняя величина ¹	наибольший дата	наименьший дата	
Среднегодовой расход воды, м ³ /с	1927–2013	17 200(2,0)	<u>23 100</u> 1989	<u>12 700</u> 1986	0,13 (4,0)
Максимальный расход воды, м ³ /с	1935–2012	135 000(3,0)	<u>220 000</u> 4.06.1989	<u>78 000</u> 6.06.1935	0,18* (5,5)
Минимальный зимний расход воды, м ³ /с	<u>1935–1979</u> 1980–2012	<u>992(7,5)</u> 1 950(5,3)	<u>2 920</u> 30.04.2007	<u>366</u> 27.04.1940	<u>0,22 (–2,5)</u> 0,23 (0)
Минимальный летне-осенний расход воды, м ³ /с	1935–2011	17 500(4,5)	<u>26 800</u> 22.08.1983	<u>9 800</u> 20.09.1964	0,25 (2,5)
Среднегодовой расход взвешенных наносов, кг/с	1936, 1944, 1960–2010	712** (9,4)	<u>1 700</u> 2005	<u>240</u> 1984	0,43 (3,5)
Тепловой сток, 10 ¹² кДж/год	1935–2012	15 590(2,2)	<u>22 320</u> 1938	<u>10 620</u> 1986	0,19

Примечания. В скобках – среднеквадратическая относительная (%) погрешность расчета среднемноголетних значений; * для множества значений с обеспеченностью <50% лучший результат дает усеченное распределение Крицкого–Менкеля при $C_v=0,22$ и $C_s/C_v=3,5$; ** с учетом значений, восстановленных за 7 лет.

Крупномасштабные климатические изменения в бассейне и эксплуатация Вилкойского водохранилища (добавочный сток зимой ~700 м³/с) заметно улучшили гидрологические условия зимней межени в низовьях Лены: объем стока за ноябрь–апрель вырос с 34,1 (1935–1979) до 51,5 км³/год (1980–2012), т.е. на 51%, а минимальный Q – с 992 до 1950 м³/с (рис. 1, б, табл. 3). Начало первого значимого роста пришлось на 1978–1979 гг., второго – на 2004 г. Роль естественных и антропогенного факторов в этом процессе оказалась почти равнозначной. В итоге стационарность стока зимней межени оказалась нарушенной ($F=5,18 > F_{\text{крит.}}=2,77$ для $Q_{\text{мин}}$; то же – в отношении $Q_{\text{мес}}$ с ноября по апрель). Кроме того, доля зимнего сезона в $W_{\text{г}}$ увеличилась примерно на 2,7%. Сроки начала зимней межени не изменились, поскольку различие между датами появления первых ледовых явлений, а также замерзания реки для двух сравниваемых периодов не превышает 1–2 сут.

Другие характерные Q (средние годовые, максимальные за год, минимальные летне-осеннего

раничены большой длительностью периода с отрицательными ТПВ, размещением бассейна в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП), значительной долей равнинных и залесенных территорий, прохождением половодья в период еще мало оттаявших почвогрунтов и др. [Магрицкий, 2010; Ресурсы..., 1972]. На гп Кюсюр средняя за год величина s составляет ~40 г/м³. В течение года она варьирует от максимальных значений в половодье (в среднем 35–90 г/м³ до 2010 г.) и летне-осенние паводки (35–65 г/м³) до минимальных значений в зимнюю межень (1,5–4,5 г/м³). В периоды между паводками она снижается (20–30 г/м³). Максимальная измеренная величина s составила 790 г/м³ (18.08.2004).

Небольшую мутность компенсирует огромный по величине водный сток, поэтому сток взвешенных наносов (W_R) нижней Лены сравнительно велик и равен 22,5 млн т/год (табл. 3). К вершине дельты поступает примерно такой же объем взвешенных наносов. В дельту транспортируются также влекомые наносы, величина которых (W_G), по оценкам

Н.И. Алексеевского [Алексеевский, Магрицкий, 2007], может составлять $\sim 5,4$ млн т/год.

В многолетнем ходе W_R видны определенное совпадение с колебаниями стока воды и две долговременные тенденции: снижение W_R до 1986–1987 гг. и рост в последующие годы (рис. 1, а; 2, а). Невысокая корреляция между межгодовыми колебаниями стока воды и наносов ($r \approx 0,5$) объясняется зависимостью W_R не только от водности года, но и от внутригодового распределения стока воды, от числа и мощности дождевых паводков, а также влиянием других факторов [Магрицкий, 2001]. На уровне среднемесячных величин и для периода открытого русла теснота связи между Q и R выше, но сама связь нелинейная (вида $R=aQ^b$) и несколько отличается для периода до 1988 г. и после него. В 1960–1987 гг. для мая–июня $a=9,65 \cdot 10^{-7}$, $b=1,98$ ($R^2=0,78$; $S/\sigma=0,65$), для июля–октября $a=1,56 \cdot 10^{-9}$, $b=2,6$ ($R^2=0,80$; $S/\sigma=0,44$). В 1988–2010 гг. для мая–июня $a=5,35 \cdot 10^{-6}$, $b=1,8$ ($R^2=0,92$; $S/\sigma=0,53$), для июля–октября $a=1,09 \cdot 10^{-6}$, $b=2,02$ ($R^2=0,60$; $S/\sigma=0,82$).

Статистически незначимое увеличение W_R с конца 1988 г. (на 5,85 млн т/год; нарушение стационарности подтверждает лишь *U-test* Манна–Уитни, остальные *t-test*, *F-test*, *Spearman RCC* – не подтверждают) совпадает с ростом водности реки, причем W_R вырос главным образом за счет летне-осеннего сезона (рис. 2, б) и количества наносов нижнего участка реки. Это объясняется тем, что в летне-осенний сезон факторы формирования и транспортировки наносов в районах распространения многолетнемерзлых пород чувствительны не только к увеличению количества осадков и стока воды, но и температуры воздуха и речных вод. Реакцией таких пород на повышение температуры становится ослабление их прочности и увеличение мощности размываемого слоя и как следствие усиление эрозионных процессов. Интенсивность последних увеличивается с ростом объемной льдистости ММП и появлением погребенных льдов, что служит отличительной особенностью именно в нижнем течении Лены.

Поэтому согласно данным экспедиционных измерений высокие значения s и ее увеличение отмечены ниже впадения в Лену ее крупных притоков – Алдана и особенно Вилюя. Так, в июле–августе 1994 г. s у г. Якутск составила 17 мг/л, на участке реки между устьями рек Алдан и Вилюй – ~ 30 мг/л, а ниже по течению – 55–77 мг/л и больше [Rachold et al., 1995]. С 5 по 9 августа 2008 г. зафиксировано многократное увеличение мутности воды на протяжении ~ 600 км ниже устья р. Алдан, почти расстроченное к гп Кюсюр [Чаркин и др., 2009]. В свою очередь результаты экспериментальных исследований зависимости скорости эрозии речных берегов ($V_{\text{эп}}$) от T и Q , адаптированные к гидрологическим и

криолитологическим условиям Центральной Якутии и нижней Лены, аппроксимированные эмпирической формулой, показывают, что на $V_{\text{эп}}$ (и соответственно на поступление наносов в реку) в основном влияют значения T и ее изменчивость [Costard et al., 2003]. При условии быстрого освобождения контактирующего с речным потоком берега от продуктов размыва и постоянстве других предикторов $V_{\text{эп}}$, по сути, прямо пропорциональна T , а увеличение T на 1°C увеличивает $V_{\text{эп}}$ приблизительно на 1 мм/мин (с постепенным нарастанием при более высоких значениях T). Вклад Q и механической эрозии в несколько раз меньше и тоже возрастает при увеличении T .

В результате указанных тенденций доля стока половодья снизилась с 82,7% в 1936, 1944 и 1960–1987 гг. до 64,8% в 1988–2010 гг., а доля летне-осеннего сезона увеличилась с 16,8 до 34,9%. Однородность ряда летне-осенних значений R с 1988 г. была нарушена и по дисперсии, и по среднему.

Сходные закономерности в отношении W_R летне-осеннего сезона отмечены и для низовьев Вилюя, расположенных в схожих геокриологических условиях. Вообще характеристики стока наносов

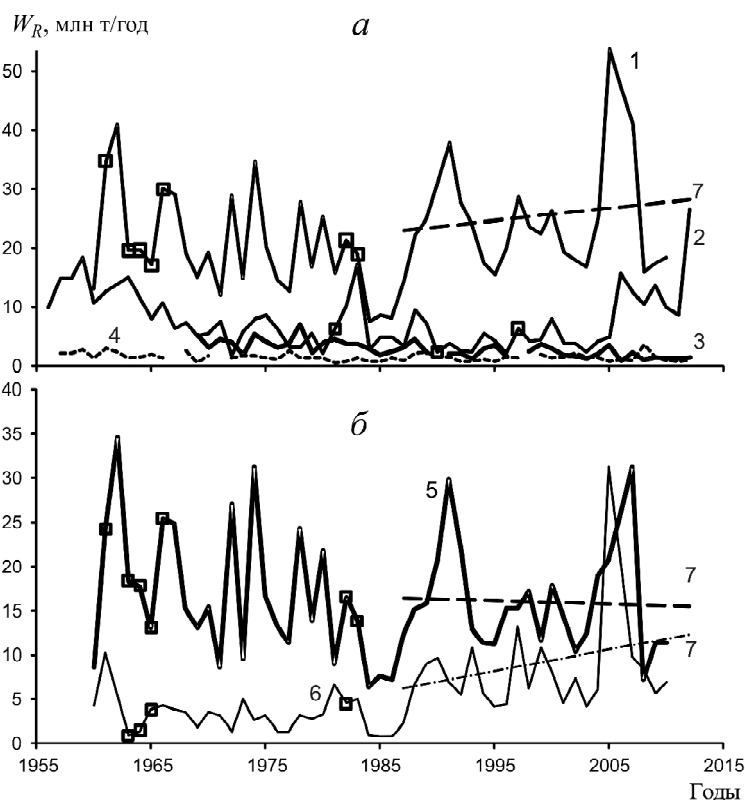


Рис. 2. Многолетние колебания стока взвешенных наносов за год (а), весеннего половодья (б, 5) и летне-осеннего периода (б, 6) на реках Лена (1, 5, 6 – гп Кюсюр, 2 – гп Табага), Алдан (3 – гп Охотский Перевоз) и Вилюй (4 – гп Хатырык-Хомо) с линейными трендами за 1988–2012 гг. (7). Квадратики указывают на годы с восстановленными значениями стока

Fig. 2. Long-term fluctuations of suspended sediment runoff during the year (a), spring flood (b, 5) and summer-autumn period (b, 6) for the Lena River (1, 5, 6 – the Kysyur gauge, 2 – the Tabaga gauge), the Aldan River (3 – the Okhotsky Perevoz gauge) and the Vilyui River (4 – the Khatyryk-Khomo gauge); the linear trends for 1988–2012 (7). Boxes indicate the years with reconstructed runoff values

этого притока испытали значительные антропогенные изменения. В Вилуйском водохранилище s снижается от верховьев к плотине с $10\text{--}15\text{ г/м}^3$ до исчезающе малых значений. На 175 км ниже плотины ГЭС-1,2 s в зарегулированных условиях равна 3 г/м^3 (гп Сюльдюкар). На гп Сунтар s уменьшилась с 18 г/м^3 (1957–1966) до 7 г/м^3 (1974–2012), а W_R – с 490 до 195 тыс. т/год (табл. 2). На гп Хатырык-Хомо величина s составила в эти периоды 39 и 24 г/м^3 соответственно, W_R – 1950 и 1285 тыс. т/год .

Таким образом, во-первых, хотя и отмечается продольное нарастание s и W_R , они не достигают фоновых значений. Во-вторых, разность естественной и измененной величин стока наносов к устью р. Вилуй, напротив, лишь возрастает, что объясняется значительным снижением максимальных величин Q (на 40 и 20% на гп Сунтар и Хатырык-Хомо) и уменьшением водности половодья в целом, а также в отдельные летне-осенние месяцы. В-третьих, произошло существенное внутригодовое перераспределение стока наносов – доля половодья сократилась с 93 до 86% , доля зимней межени возросла с близких к нулю значений до $3,5\%$.

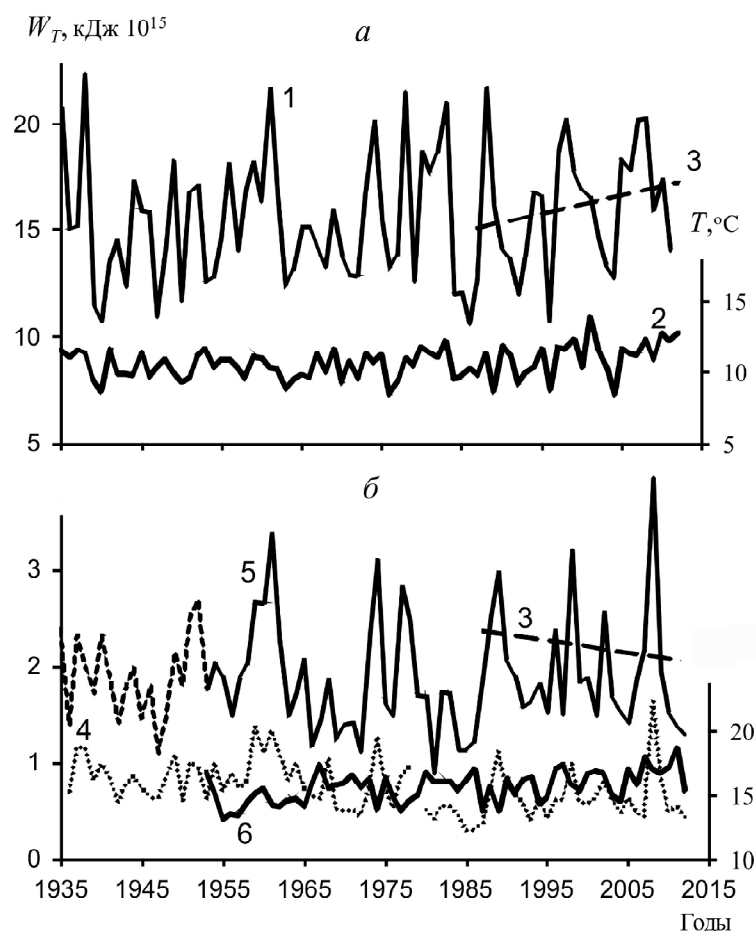


Рис. 3. Многолетние колебания годового стока теплоты (1, 4–5) и средней за летний сезон температуры воды (2, 6) на нижней Лене (а, гп Кюсюр) и Вилуе (б) с линейными трендами за 1988–2012 гг. (3): 4 – гп Сунтар; 5, 6 – гп Хатырык-Хомо

Fig. 3. Long-term fluctuations of the annual heat runoff (1, 4, 5) and the mean summer water temperature (2, 6) for the lower reaches of the Lena River (a – the Kyusyur gauge) and the Vilyui River (b); the linear trends for 1988–2012 (3): 4 – the Suntar gauge; 5, 6 – the Khatyryk-Khomo gauge

Некоторые из упомянутых нарушений естественного режима стока наносов р. Вилуй влияют на W_R части нижней Лены, но в силу недостаточности и ненадежности исходных данных количественно оценить этот фактор невозможно. Кроме того, не выявлено и статистически значимое влияние горнодобывающей промышленности, русловых работ (вне зависимости от их локализации) на W_R в конечном участке нижней Лены. В отношении стока наносов Алдана, средней Лены и верхнего участка нижней Лены подобное утверждать нельзя.

Тепловой сток. Тепловой сток (W_T) Лены очень велик (табл. 3), несмотря на относительно низкие значения температуры воды ($T_{\text{июнь}} \sim 5,1$, $T_{\text{июль}} \sim 14,2$, $T_{\text{авг.}} \sim 12,6$, $T_{\text{сент.}} \sim 6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) и короткий период года с $T \geq 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в среднем с 4.06. по 13.10.). Этому феномену способствуют огромный водный сток реки и повышенная водность именно в период года с высокими значениями T . На ведущую роль водного стока указывает и тесная связь между значениями W и W_T ($r \approx 0,73$). Еще более надежную зависимость можно получить, введя в уравнение температуру воды ($R \approx 0,85$):

$$W_T (\text{кДж} \cdot 10^{15}) = 0,028 W_R + 1,416 \bar{T}_{\text{VI-IX}} - 12,9.$$

Отмечу, что между $\bar{T}_{\text{VI-IX}}$ и соответствующими ГПВ существует надежная связь вида: $\bar{T}_{\text{VI-IX}} (\text{Кюсюр}) = 0,584 \bar{t}_{\text{VI-IX}} (\text{Жиганск}) + 0,231 \bar{t}_{\text{VI-IX}} (\text{Кюсюр}) + 1,19 (R \approx 0,81)$. К вершине дельты Лены W_T практически не изменяется [Магрицкий, 2009].

Больше всего теплоты закономерно проходит в летние месяцы – $23,7$ (июнь), $39,7$ (июль) и $24,9\%$ (август). На долю сентября и октября приходится $10,9$ и $0,8\%$, в мае – $W_T \approx 0,1\%$. В многолетнем масштабе, под влиянием увеличения водности реки и T , тепловой сток Лены растет (рис. 3, а). До 1980 г. величина W_T составила $15,26 \cdot 10^{15}$, в 1980–2012 гг. – $16,04 \cdot 10^{15}$ кДж. Таким образом, тепловой сток вырос на $0,78 \cdot 10^{15}$ кДж (или $5,1\%$) в основном за счет летних месяцев ($\Delta W_T \approx 0,76 \cdot 10^{15}$ кДж). Одновременно произошло увеличение на 8 сут продолжительности периода с $T \geq 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. На гп Табага ΔW_T $1,04 \cdot 10^{15}$ кДж (или $11,3\%$), в низовьях Алдана и Вилуя $-0,36 \cdot 10^{15}$ (или $5,3\%$) и $-(0,05 \pm 0,1) \cdot 10^{15}$ кДж соответственно. По сути, к замыкающему створу реки за счет продольного снижения T и поступления холодных вод с водосбора нижней Лены часть положительного изменения ΔW_T исчезает.

Отмеченные в низовьях Лены изменения теплового состояния реки не связаны с эксплуатацией Вилуйских водохранилищ, тогда как температурный режим самого притока претерпел заметные антропогенные изменения (рис. 3, б; 4; табл. 2). Вблизи плотины Вилуйской ГЭС-1,2 отмечено значительное понижение температуры в летние месяцы (в среднем на $7\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ее увеличение в большинстве остальных месяцев,

вплоть до положительных значений зимой. Это не могло не сказаться на ледовом режиме реки [Назаренко, Сахарова, 1982]. Возвращение значений T к условно-естественным происходит на разном удалении от плотины и зависит от месяца, первоначальной величины ΔT , сбрасываемых в нижний бьеф расходов воды и степени их антропогенного нарушения, боковой приточности и др. Закономерности этого процесса иллюстрируют кривые вдольруслового изменения среднемесячных значений T , полученные для трех периодов, отличающихся по уровню антропогенной нагрузки, но схожих по температурным условиям, водности реки и приточности в теплый сезон года (рис. 4). До ввода в строй ГЭС-3 температура в июне достигала естественных значений приблизительно на 350 км ниже плотины ГЭС-1,2, в августе – на 800–900 км, в октябре – на 400–800–900 км. В июле T восстанавливалась лишь к устью реки. В мае и сентябре различия были незначительными, но наблюдаемое превышение T сохранялось на значительном протяжении (до 900 км). В третий период, после создания второго водохранилища, исходная величина ΔT уменьшилась, и естественных значений температура стала достигать раньше, особенно в июле (рис. 4). Для мая, июня и сентября кривые не рассчитаны из-за невозможности подобрать многолетние периоды, схожие по влиянию естественных факторов на T и достаточно продолжительные.

Вследствие уменьшения Q и T в теплый сезон года сток теплоты Вилы уменьшился почти в 2 раза у плотины ГЭС-1,2, на 26,5% у гп Сунтар и всего на 2% в замыкающем створе (табл. 2), т.е. воздействие водохранилища на W_T существенно в среднем течении Вилы и почти исчезает (под влиянием естественных факторов и их изменений в последние десятилетия) к устью реки. Отмечено внутригодовое перераспределение W_T Вилы (табл. 2).

Выводы:

– величина и режим стока Лены в последние 30–40 лет испытывают значительные изменения, реагируя на климатические изменения. Установлено, что средняя по бассейну положительная аномалия ТПВ составила в 1980–2013 гг. $\sim 0,6\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а осадков – 4–9%. Сток воды нижней Лены увеличился во все сезоны и в целом за год (на $39\text{ км}^3/\text{год}$), сток наносов – на 5,85 млн т/год, сток теплоты – на $0,8 \cdot 10^{15}$ кДж/год; отмечен рост температуры воды. Основное увеличение стока наблюдается с 1988 г. Особенно существенно увеличился сток воды зимней межени (вплоть до нарушения стационарности ряда) и наносов в летне-осенний сезон. Различен

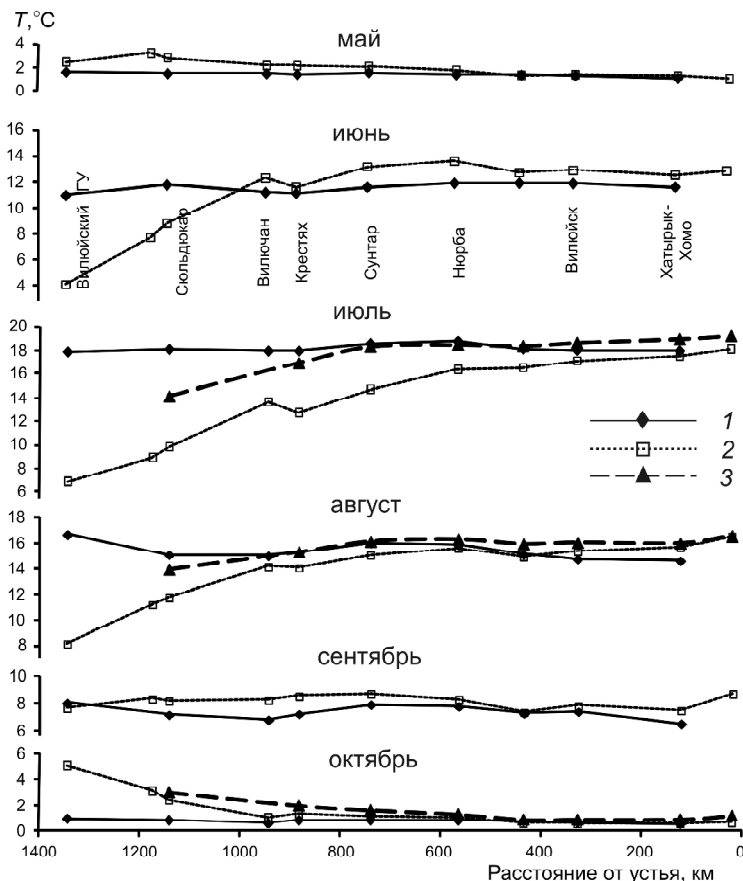


Рис. 4. Особенности продольного изменения среднемесячных значений температуры воды в р. Виле: 1 – 1947–1957; 2 – 1973–1980, 1988–1992; 3 – 2004–2009 гг.

Fig. 4. Changes of the mean monthly water temperatures along the Vilyui River course: 1 – 1947–1957; 2 – 1973–1980, 1988–1992; 3 – 2004–2009

вклад разных частей водосбора и притоков в выявленные изменения. Водопотребление (при суммарном водозаборе $0,3\text{ км}^3/\text{год}$) и создание водохранилищ почти не влияют на водные ресурсы реки, оцениваемые в $552\text{ км}^3/\text{год}$, но нарушают естественные условия зимней межени;

– режим стока воды и наносов, ледово-термические условия среднего и нижнего участков Вилы, наоборот, сильно изменены водохранилищами – произошло уменьшение стока весеннего половодья и частично летне-осенних паводков в пользу зимней межени: стока наносов – на 34%, теплового стока на значительном протяжении реки – до 25–50%, нарушены и температурные условия и др. Современные гидроклиматические изменения в определенной мере нивелируют это воздействие, особенно в отношении некоторых видов стока, но пока не компенсируют его;

– в дальнейшем, с учетом имеющихся прогнозных оценок, следует ожидать дальнейшего увеличения стока р. Лена, причем превосходящего аналогичные изменения многих других рек России.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-0038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В. Поступление наносов в устья больших рек / Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. С. 165–179.
- Вода России. Речные бассейны / Под ред. А.М. Черняева. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. 536 с.
- Водные пути бассейна Лены / Под ред. Р.С. Чалова, В.М. Панченко, С.Я. Зернова. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
- Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГТИ, 2008. 600 с.
- Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. СПб., 1982–2014.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 г. М.: Росгидромет, 2014. 110 с.
- Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. 2010. № 6. С. 17–24.
- Магрицкий Д.В. Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев крупнейших рек Восточной Сибири: Автореф. канд. дисс. М., 2001. 22 с.
- Магрицкий Д.В. Речной сток и гидрологические расчеты: практические работы с выполнением при помощи компьютерных программ. М.: Триумф, 2014. 184 с.
- Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. 2009. № 5. С. 69–77.
- Назаренко С.Н., Сахарова Н.Б. Изменение ледо-термического режима р. Вилюй в нижнем бьефе Вилюйской ГЭС I–II // Гидротехническое строительство. 1982. № 8. С. 23–26.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Индиго-ский район. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 652 с.
- Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: МАКС-Пресс, 2011. 180 с.
- Чаркин А.Н., Федорова И.В., Семилетов И.П. и др. Масштабы пространственной изменчивости распределения взвеси в системе «Река Лена – море Лаптевых» // Геология, география и экология океана. Ростов-на-Дону: ЮНЦ, 2009. С. 351–354.
- Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Влияние климатических изменений на сток рек бассейна Лены // Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии. СПб.: Наука, 2005. С. 218–231.
- Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia) // Earth Surf. Process. Landforms. 2003. N 28. P. 1349–1359.
- Liu B., Yang D., Ye B., Berezovskaya S. Long-term open-water season stream temperature variations and changes over Lena River Basin in Siberia // Global and Planetary Change. 2005. N 48. P. 96–111.
- Magritskii D.V. Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean // Water Res. 2008. Vol. 35, N 1. P. 1–14.
- Rachold V., Hermel J., Korotaev V.N. Expedition to the Lena River July/August 1994 // Berichte zur Polarforschung. 1995. N 182. P. 181–195.
- Ye B., Yang D., Kane D.L. Changes in Lena River streamflow hydrology human impacts versus natural variations // Water Res. 2003. Vol. 39, N 71. P. 1–14.

Поступила в редакцию 22.07.2015
Принята к публикации 28.10.2015

D.V. Magritsky¹

FACTORS AND TRENDS OF THE LONG-TERM FLUCTUATIONS
OF WATER, SEDIMENT AND HEAT RUNOFF IN THE LOWER REACHES
OF THE LENA RIVER AND THE VILYUI RIVER

Specific features and trends of seasonal and long-term fluctuations of water, suspended sediment and heat runoff in the lower reaches of the Lena River and the Vilyui River are discussed. New estimates of runoff distribution parameters are presented. Both climatic and anthropogenic factors of the spatial and temporal variability of river runoff parameters and water temperature are analyzed, as well as the contribution of the processes characteristic of the upper and lower reaches of the Lena River, the Aldan and Vilyui rivers basins, to these changes. The contribution of different factors to the variability of a number of main hydrological parameters was quantified. The influence of reservoirs on some river runoff parameters and temperature characteristics of the Vilyui River is considered. A number of computational and prognostic empirical relationships are presented.

Key words: river, basin, water, sediment and heat runoff, temperature, climatic and anthropogenic factors, water reservoir, the Lena River, the Vilyui River.

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project No 14-37-0038).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: magdima@yandex.ru

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Magrickii D.V.* Postuplenie nanosov v ust'ja bol'shikh rek [The sediment transport to the mouths of large rivers], Geojekologicheskoe sostojanie arkticheskogo poberezh'ja Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya, Moscow, GEOS, 2014, pp 165–179 (in Russian).
- Charkin A.N., Fedorova I.V., Semiletov I.P.* et al. Masshtaby prostranstvennoi izmenchivosti raspredeleniya vzvesi v sisteme «Reka Lena – More Laptevykh» [The scales of the spatial variability of the distribution of suspended solids in the system «River Lena – the Laptev Sea»], Geologiya, geografiya i ekologiya okeana, Rostov-na-Donu: IUNTC, 2009, pp. 351–354 (in Russian).
- Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E.* Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia) // Earth Surf. Process. Landforms. 2003, no 28, pp. 1349–1359.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2013 g. [A report on the features of climate in the territory of the Russian Federation for 2013], Moscow, Rosgidromet, 2014, 110 p. (in Russian).
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Resursy poverhnostnykh i podzemnykh vod, ih ispol'zovanie i kachestvo. Ezhegodnoe izdanie [The state water cadastre. Resources of surface and underground waters, their use and quality. Annual publication], Leningrad, Sankt-Peterburg, 1982–2014 (in Russian).
- Liu B., Yang D., Ye B., Berezovskaya S.* Long-term open-water season stream temperature variations and changes over Lena River Basin in Siberia // Global and Planetary Change, 2005, no 48, pp. 96–111.
- Magritskii D.V.* Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean // Water Res. 2008, Vol. 35, no 1, pp. 1–14.
- Magrickii D.V.* Godovoj stok vzveshennykh nanosov rossijskikh rek vodosbora Severnogo Ledovitogo okeana i ego antropogennye izmeneniya [Annual suspended matter flow of the Russian rivers belonging to the Arctic ocean basin and its anthropogenic transformation], Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya, 2010, no 6, pp. 17–24 (in Russian).
- Magrickii D.V.* Estestvennye i antropogennye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima nizov'ev i ust'ev krupnejshikh rek Vostochnoj Sibiri [Natural and anthropogenic changes in the hydrological regime of the lower reaches and mouths of the largest rivers of Eastern Siberia], Moskovskij Gosudarstvennyj Universitet, Moscow, 2001, 22 p. (in Russian).
- Magrickii D.V.* Rechnoj stok i gidrologicheskie raschety: prakticheskie raboty s vypolneniem pri pomoshhi komp'yuternyh programm [River runoff and hydrological calculations: practical work using computer programs]. Moscow, 2014. 184 p. (in Russian).
- Magrickii D.V.* Teplovoj stok rek v morja Rossijskoj Arktiki i ego izmeneniya [Heat runoff to the Russian Arctic seas and its changes], Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya, 2009, no 5, pp. 69–77 (in Russian).
- Nazarenko S.N., Saharova N.B.* Izmenenie ledotermicheskogo rezhima r. Vil'uj v nizhnem b'eфе Vil'jujskoj GJeS I–II [Changes in ice and thermal regime of the Viluy river in downstream HPP I–II], Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo, 1982, no 8, pp. 23–26 (in Russian).
- Rachold V., Hermel J., Korotaev V.N.* Expedition to the Lena River July/August 1994 // Berichte zur Polarforschung, 1995, no 182, pp. 181–195.
- Resursy poverhnostnykh vod SSSR. T. 17. Leno-Indigirskij rajon [Surface water resources of the USSR. Vol. 17. Lena-Indigirka region], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972, 652 p. (in Russian)
- Scenarnaja ocenka verojatnykh izmenenij rechnogo stoka v bassejnakh krupnejshikh rek Rossii. Chast' 1. Bassejn reki Leny [Scenario-based assessment of likely changes in river runoff in the basins of the largest rivers of Russia. P. 1. The Lena river basin], Moscow, 2011, 180 p. (in Russian).
- Shiklomanov I.A., Georgievskij V.Ju., Shalygin A.L.* Vlijanie klimaticeskikh izmenenij na stok rek bassejna Leny [The impact of climate changes on river runoff in the Lena basin], Sovremennye problemy jekologicheskij meteorologii i klimatologii, SPb.: Nauka, 2005, pp. 218–231 (in Russian).
- Voda Rossii. Rechnye bassejny [Water Russia. River basins], Ekaterinburg, 2001, 536 p. (in Russian).
- Vodnye puti bassejna Leny [Waterways of the Lena river's basin], Moscow, 1995, 600 p. (in Russian).
- Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie [Water resources of Russia and their use], SPb.: GGI, 2008, 600 p. (in Russian).
- Ye B., Yang D. and Kane D.L.* Changes in Lens River streamflow hydrology human impacts versus natural variations // Water Res. 2003. Vol. 39, no 71, pp. 1–14.

Received 22.07.2015

Accepted 28.10.2015