

УДК 556.01:556.53(282.256.66)
DOI 10.17513/use.38292

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РУСЛОВОГО ДОБЕГАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО И ЗАРЕГУЛИРОВАННОГО СТОКА Р. ВИЛЮЙ

Ноговицын Д.Д., Никулин К.В., Сергеева Л.П.

ФИЦ ЯНЦ СО РАН Институт физико-технических проблем Севера, Республика Саха (Якутия),
Якутск, e-mail: dmitry-nogovitzyn@yandex.ru

Цель исследования – выявление перераспределения величины стока внутри года на р. Вилюй для учета фоновых показателей экосистемы под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов. Материалами и методами послужили многолетние ряды наблюдений на гидрологических постах Росгидромета, расположенных в бассейне р. Вилюй, данные Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Для расчета внутригодового распределения стока использованы географо-гидрологические и статистические методы. После введения в эксплуатацию Вилюйской ГЭС было установлено отсутствие синхронности колебаний уровня воды на реке. При расчете скорости и времени руслового добегаания очевидным является тот факт, что такие параметры, как площадь водосбора реки, рельеф местности, разная степень наполнения русла, играют существенную роль, но при этом скорость и время добегаания на зарегулированных участках р. Вилюй в зимний период в основном зависят от метеоусловий и спуска водной массы. В ходе работы было установлено, что на реках со снеговым питанием, расположенных в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, основными факторами, определяющими перераспределение стока в течение года, являются повышение температуры воздуха и зарегулирование рек.

Ключевые слова: р. Вилюй, водохранилище, скорость добегаания, естественные условия, зарегулированные условия

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWRS-2024-0031 «Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учетом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных энергетических систем в труднодоступных изолированных территориях Севера и Арктики».

STUDY OF CHANNEL UPSTREAM VELOCITY UNDER CONDITIONS OF NATURAL AND REGULATED FLOW OF THE VILYUI RIVER

Nogovitsyn D.D., Nikulin K.V., Sergeeva L.P.

Yakut Scientific Center Institute of Physical and Technical Problems of the North, Yakutsk,
e-mail dmitry-nogovitzyn@yandex.ru

The object of this paper is to identify the redistribution of the annual runoff rate on the Vilyui River to take into account the background indicators of the ecosystem under the influence of both natural and anthropogenic forces. The long-term observations at the hydrological stations of Roshydromet located in the Vilyui basin, the data from the Yakut Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring became the materials and methods of this work. The geographical-hydrological and statistical methods were used to calculate the intra-annual flow distribution. After setting into operation of the Vilyui HPP it turned out that there was no synchronicity in the water-level fluctuations on the river. When calculating the speed and time of channel travel, it is obvious that parameters such as the river basin, the land configuration, and the different degree of channel fill play a significant role, but at the same time the speed and time of channel travel in the regulated sections of the Vilyui River in winter mainly depend on weather conditions and the emptying of water mass. During the work, it was found that on snow-fed rivers located in the permafrost zone, the main factors determining the redistribution of runoff during the year are an increase in air temperature and river control.

Keywords: Vilyui River, reservoir, run-up rate, natural conditions, regulated conditions

The work was carried out within the framework of the project of the state task (No. FWRS-2024-0031) ‘Comprehensive research of energy priorities of the Republic of Sakha (Yakutia) taking into account the environmental impact and development of approaches and methods of increasing the energy efficiency and reliability of local energy systems in remote isolated areas of the North and the Arctic’.

Введение

Вилюйская ГЭС – первая гидроэлектростанция в зоне многолетней мерзлоты. Водоохранилище полностью расположено в пределах Республики Саха (Якутия). Несмотря на низкий уровень освоённости ги-

дроресурсов на Дальнем Востоке, перспективы строительства традиционных ГЭС сохраняются.

Строительство и эксплуатация ГЭС на реках приводят к коренным изменениям природных условий реки. Результаты ис-

следования показывают, что регулирование стока крупными водохранилищами является основным фактором антропогенных нарушений в объеме стока и водном режиме арктических рек. На сегодняшний день многообразные последствия изменения режима рек после строительства ГЭС на территории многолетней мерзлоты ни в проектных, ни в перспективных плановых разработках полностью не учитываются. О важности учета и изучения последствий регулирования стока можно судить по сложным хозяйственным проблемам, которые возникли после сооружения гидроузлов в европейской части России. В связи с этим всестороннее изучение изменения природных условий на территории распространения многолетнемерзлых пород после зарегулирования стока рек крупными водохранилищами представляется одной из важнейших задач.

Цель исследования – сравнение колебания уровня воды на предмет синхронности и синфазности после введения в эксплуатацию Вилюйской ГЭС.

Материалы и методы исследования

В качестве исходной информации использованы многолетние данные Росгидромета о среднемесячных расходах и уровнях воды, расположенных в бассейне р. Вилюй, а также данные Якутского управления

по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Основные методы исследования – свод правил СП 33-101-2003 [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Вилюйская ГЭС – первая гидроэлектростанция в зоне многолетней мерзлоты. Создание крупных ГЭС на северных реках приводит к коренным изменениям природных условий реки [2]. Результаты исследования показывают, что регулирование стока крупными водохранилищами является основным фактором антропогенных нарушений в объеме стока и гидрологическом режиме.

Каскад гидроэлектростанций на р. Вилюй представлен двумя гидроузлами: Вилюйскими ГЭС-I-II и Вилюйской (Светлинской) ГЭС-III (рис. 1).

Определяющую роль в изменении стока реки играют многолетние колебания осадков и испарения, а также типы циркуляции воздушных масс. В течение длительного периода времени происходит изменение среднегодовых значений расходов воды в виде отклонений от нормы стока. Данные отклонения выражены в виде чередования многоводных и маловодных ритмов, которые отличаются по продолжительности и отклонением от нормы стока за данный период.

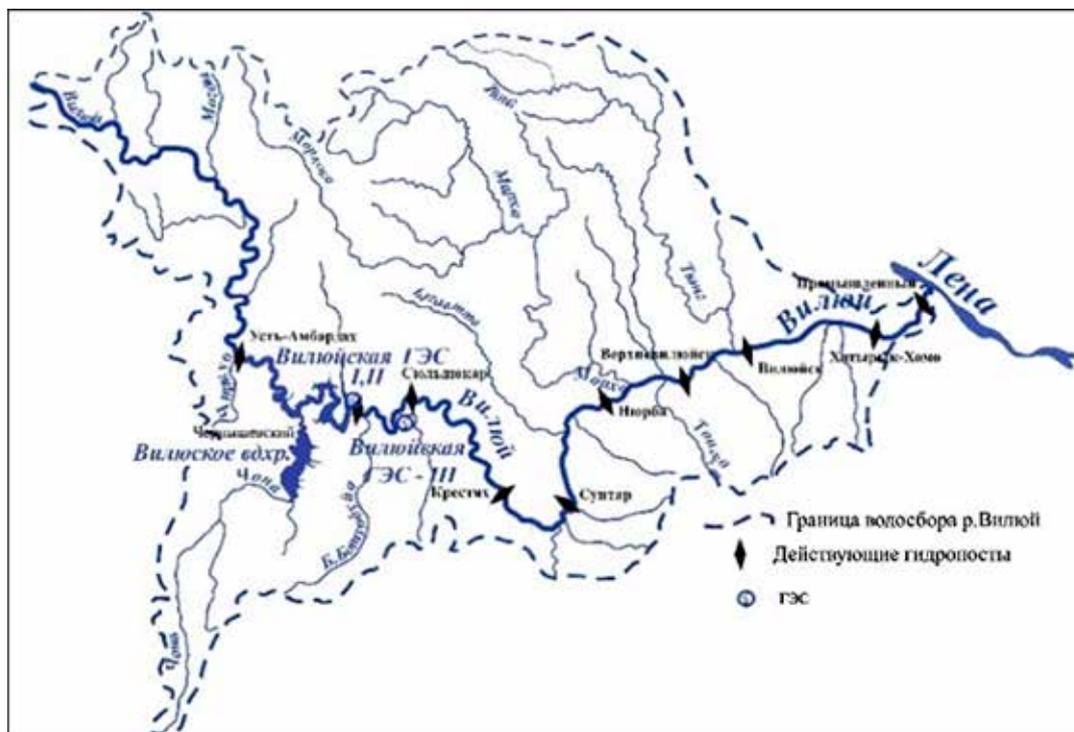


Рис. 1. Расположение гидроэлектростанций и действующих гидрологических постов на р. Вилюй

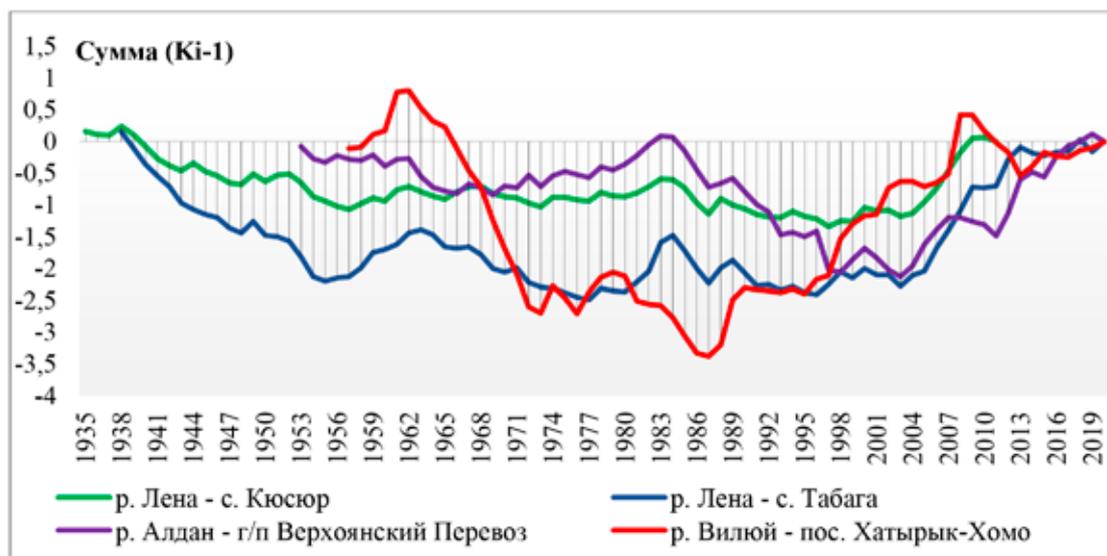


Рис. 2. Разностные интегральные кривые среднегодовых расходов воды в бассейне реки Лены

Для анализа водности реки Вилюй во времени построены разностные интегральные кривые (рис. 2). Эти кривые представляют собой отклонения модульных коэффициентов от среднего значения. По оси ординат показаны $\sum(K_i - 1)$, а по оси абсцисс – T (годы). Кривые интегральных разностей показывают изменения суммы отклонений от среднего многолетнего значения. Участки положительных значений соответствуют многоводной фазе, а участки отрицательных значений – маловодной фазе [3].

На совмещенном графике разностных интегральных кривых в период 1935–2020 годов видно, что период наблюдений в бассейне реки Лены включает полный цикл колебаний водности.

Сравнение разностных интегральных кривых позволило проанализировать исследуемые участки на предмет синхронности и синфазности изменения водности годового стока на реке Лене и двух основных притоках: правом – Алдан и левом – Вилюй. В результате установлено, что на реке Вилюй изменение периода водности отличается от Алдана и самой Лены. На графике отчетливо видно, что период заполнения водохранилища приходится на конец 1960-х – начало 1970-х годов и начиная с 1990-х годов река Вилюй синхронизируется с нижним течением Лены. В то же время после ввода в работу гидроэлектростанции на реке произошло внутригодовое перераспределение стока. Основными факторами, определяющими перераспределение стока в течение года на реках со снеговым питанием, явля-

ются повышение температуры воздуха и зарегулирование рек [4].

Цикличность многолетних колебаний речного стока является важным индикатором изменчивости климата. Как видно из таблицы 1, за последние 20 лет температура воздуха на территории бассейна реки Вилюй повысилась на 1–1,5°C.

Расчет внутригодового распределения стока в данной работе выполнен методом «реального года» с выделением основных сезонов, лимитирующих периодов и лимитирующих сезонов [1]. В качестве исходных данных для расчетов используются среднемесячные расходы воды в створе с. Хатырык-Хомо, как для естественного и зарегулированного режимов [5]. Расчеты выполнены для гидрологических лет, начиная с сезона половодья. Даты сезонов назначались едиными для всех лет наблюдений и округлялись до целого месяца, результаты расчетов представлены на рисунке 3.

В средний по водности год до заполнения Вилюйского водохранилища (1950–1965 гг.) на замыкающем створе р. Вилюй на гидростворе Хатырык-Хомо распределение стока выглядело следующим образом: на долю весеннего стока приходилось 60%, летне-осеннего – 38% и зимнего – 2%. В условиях зарегулированного стока сезонное распределение (1980–2020 годы) составило 47, 28 и 25% соответственно. Наибольшие изменения произошли в период зимней межени. Величина стока в зимний период в условиях полного развития гидроэлектростанции увеличилась в 13 раз в средний по водности год ($P=50\%$) [1].

Таблица 1

Средние месячные и годовые температуры воздуха в п. Чернышевский (2000–2022 гг.)

Год	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.	За год
2000	-30,6	-25,2	-16,7	-5,2	4,2	15,4	16,1	13,3	3,4	-10,2	-24,7	-38,7	-8,2
2001	-33,1	-32,6	-18,7	-9,6	4,4	16,3	20,4	13,8	3,6	-7,1	-15,3	-29,1	-7,3
2002	-28,8	-23,8	-11,3	-5,2	6,0	14,4	18,8	14,4	3,4	-7,3	-20,4	-33,6	-6,1
2003	-29,0	-23,6	-12,1	-4,9	2,1	13,6	18,5	12,7	6,3	-7,2	-21,7	-21,6	-5,6
2004	-29,9	-29,4	-18,6	-5,9	2,3	12,1	14,4	11,9	5,0	-8,2	-16,0	-33,8	-8,0
2005	-27,9	-27,5	-14,8	-3,9	7,6	14,2	17,3	11,9	7,6	-6,5	-20,5	-27,0	-5,8
2006	-35,2	-26,5	-17,2	-8,2	4,6	14,0	17,9	12,8	6,2	-10,1	-24,3	-23,6	-7,5
2007	-21,1	-30,6	-16,1	-0,6	4,3	14,2	15,4	13,6	5,7	-5,7	-18,6	-26,0	-5,5
2008	-30,6	-20,8	-10,5	-8,3	4,6	15,6	14,9	12,4	4,1	-3,5	-23,7	-32,7	-6,5
2009	-26,5	-33,8	-20,5	-1,7	2,8	15,3	16,1	14,2	6,4	-4,9	-25,4	-34,8	-7,7
2010	-30,6	-28,5	-16,5	-6,1	6,4	13,4	17,4	12,8	2,3	-7,8	-17,2	-35,7	-7,5
2011	-28,4	-27,7	-11,8	-1,5	7,8	14,7	18,0	15,0	4,2	-4,1	-20,8	-26,2	-5,1
2012	-29,8	-24,2	-18,8	-6,0	6,1	14,5	19,8	12,5	7,1	-9,4	-23,8	-31,2	-6,9
2013	-32,2	-28,3	-19,4	-3,7	9,0	16,4	16,5	14,2	4,2	-5,6	-17,4	-23,2	-5,8
2014	-38,4	-33,3	-11,9	-0,4	6,0	14,2	20,3	13,7	3,3	-6,7	-22,1	-27,9	-6,9
2015	-28,5	-21,8	-13,4	-5,4	4,5	14,7	18,3	14,3	5,0	-6,1	-19,8	-24,5	-5,2
2016	-24,1	-23,7	-12,1	-2,2	1,5	15,6	17,3	12,5	8,1	-8,8	-23,3	-29,2	-5,7
2017	-26,6	-21,3	-8,9	-3,7	1,8	17,3	15,8	15,7	3,5	-6,1	-23,0	-30,8	-5,5
2018	-28,3	-27,5	-15,6	-3,7	4,4	18,9	15,6	14,4	6,6	-0,2	-21,6	-29,3	-5,5
2019	-26,8	-20,5	-10,6	-3,4	4,5	18,5	18,9	15,5	5,8	-4,5	-23,2	-30,2	-4,7
2020	-21,0	-19,2	-13,0	0,1	7,0	16,9	16,6	15,9	8,6	-5,0	-14,9	-27,9	-3,0
2021	-36,6	-31,2	-15,5	-6,6	6,9	17,5	20,2	15,4	7,0	-2,5	-18,2	-31,0	-6,2
2022	-28,5	-24,4	-13,7	-3,5	7,5	17,1	19,4	11,0	2,8	-2,3	-21,1	-28,0	-5,3



Рис. 3. Распределение стока по сезонам для среднего по водности года (а – 1950–1965 гг., б – 1980–2020 гг.)

При зарегулировании стока происходят изменения морфологии реки, увеличение глубин, появление протяженных полыней ниже ГЭС, уменьшение толщины ледяного покрова. Все эти условия ведут к уменьшению коэффициента льдистости при зарегулировании стока, а также способствуют увеличению зимнего стока [2].

На зарегулированных участках реки скорость руслового добегаания очень велика, особенно это заметно в зимний период, когда из-за метеорологических факторов увеличиваются потребление энергии, сброс воды, а длина полыни соответственно растягивается. В естественных условиях, когда река полностью покрыта ледяным

покровом, синхронность колебания уровня воды прослеживается до самого устья. Время добегаия определялось по методу, предложенному Г.П. Калининым [6]. Для этого был построен график соответственных уровней воды. Гидроствор Сюльдюкар на реке Виллой является верхней точкой, соответственно г/с Хатырык-Хомо – нижней. Расстояние между рассматриваемыми створами по реке составляет 1020 км. Выбранный участок реки является почти бесприточным в зимнее время, поскольку притоки в это время года имеют минимальный сток или вовсе замерзают.

Скорости добегаия рассчитываются по формуле:

$$V = L / t,$$

где L – расстояние между станциями, км. $L = 1142 - 122 = 1020$ км.

Расчеты представлены в табличной форме (табл. 2).

В зимний период при верхнем уровне 75 см (г/с Сюльдюкар) и при нижнем уровне 116 см (г/с Хатырык-Хомо) максимальная скорость добегаия в естественных условиях равнялась 1,31 м/с, а минимальная скорость добегаия составляла 0,33 м/с при верхнем уровне 76 см и при нижнем уровне 105 см. В зимний сезон максимальные

скорости добегаия наблюдаются в ноябре месяце (рис. 4).

После зарегулирования реки на рассматриваемом участке в этот период времени в верхней и нижней точках отсутствует связь, это связано с тем, что в верхнем створе происходят постоянные колебания уровня воды, вызванные водохранилищем (рис. 4).

На рисунке 5 показаны изменения скорости и времени руслового добегаия в период весеннего половодья, когда наблюдаются ярко выраженные подъемы уровня воды и максимальные скорости в нижних бьефах водохранилищ.

На графике показано изменение уровня воды в период высоких вод, включающий три створа (Сюльдюкар, Крестях, Сунтар) ниже Светлинской ГЭС. По результатам расчета на рассматриваемом отрезке максимальная скорость достигает 3 м/с, а минимальная – в пределах 1 м/с (табл. 3).

Расстояние на данном отрезке реки от рассматриваемого первого створа до с. Сунтар составляет 402 км по реке, а уклон реки – 36,5 м. Недельное регулирование уровня воды на р. Виллой, связанное с работой гидроэлектростанций, наблюдается на расстоянии 700–850 км от плотины Светлинской ГЭС, а суточное колебание – на расстоянии 300–400 км ниже плотины [7].

Таблица 2

Расчет скорости руслового добегаия (г/п Сюльдюкар, г/п Хатырык-Хомо)

№ точек	1/1	2/2	3/3	4/4	5/5	6/6
г/п Сюльдюкар	75	69	76	80	79	81
г/п Хатырык-Хомо	116	99	105	111	111	115
t , сут.	9	23	36	24	11	11
t , час	216	552	864	576	264	264
V , м/с	1,31	0,51	0,33	0,49	1,07	1,07

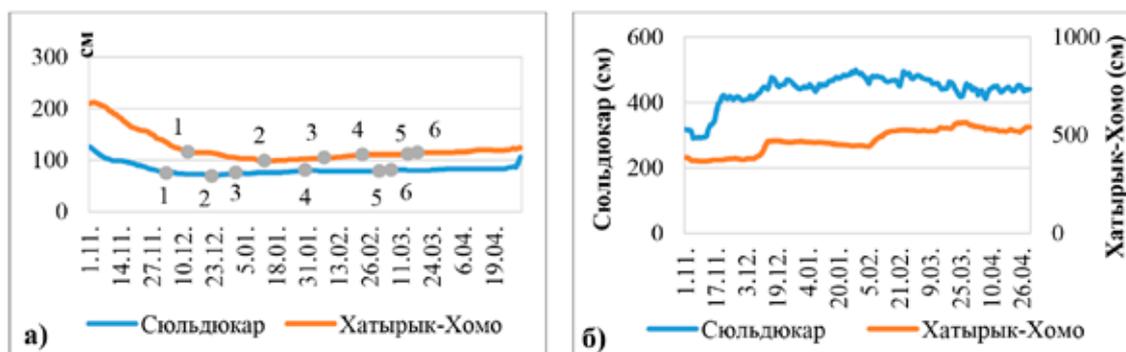


Рис. 4. Совмещенный график колебаний уровня воды р. Виллой в зимний период у с. Сюльдюкар и у с. Хатырык-Хомо до и после зарегулирования (а – 1960–1961 гг., б – 2020–2021 гг.)

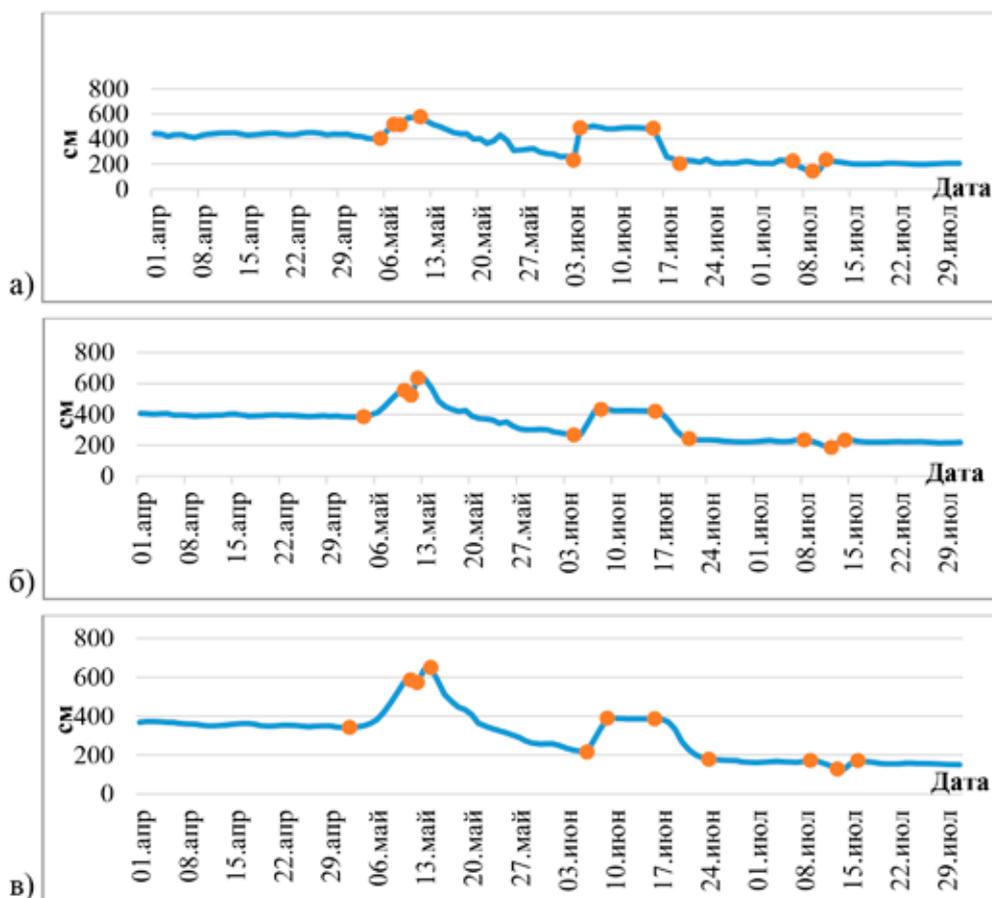


Рис. 5. График колебаний уровня воды р. Виллой у населенных пунктов Сюльдюкар (а), Крестях (б) и Сунтар (в) (после введения в эксплуатацию Виллойской ГЭС)

Таблица 3

Расчет скорости руслового добегаия

№ точек	1/1	2/2	3/3	4/4	5/5	6/6	7/7	8/8	9/9
г/п Сюльдюкар	6,78	5,50	5,65	4,97	4,98	3,09	6,71	2,69	2,99
г/п Крестях	6,58	5,29	6,60	4,60	4,64	3,15	5,77	2,90	2,98
г/п Сунтар	7,27	5,75	6,82	4,71	4,38	2,70	5,83	2,53	2,54
Скорость и время добегаия (г/п Сюльдюкар – г/п Крестях)									
<i>t</i> , сут.	1	2	2	1	1	2	1	3	3
<i>t</i> , час	24	48	48	24	24	48	24	72	72
<i>V</i> , м/с	3,0	1,5	1,5	3,0	3,0	1,5	3,0	1,0	1,0
Скорость и время добегаия (г/п Крестях – г/п Сунтар)									
<i>t</i> , сут.	3	1	1	2	1	1	1	2	2
<i>t</i> , час	72	24	24	48	24	24	24	48	48
<i>V</i> , м/с	1,0	3,0	3,0	1,5	3,0	3,0	3,0	1,5	1,5

Заключение

Сравнение колебания уровня воды позволило проанализировать исследуемые участки на предмет синхронности и синфазности

изменения после введения в эксплуатацию Виллойской ГЭС. В результате установлено, что на реке Виллой изменение периода колебания разделено на 2 участка. Первый

участок начинается от Светлинской ГЭС до с. Сунтар, а второй – ниже с. Сунтар до впадения в Лену. На первом участке отчетливо прослеживается влияние водохранилищ в период весеннего половодья. На втором участке влияние оказывают такие крупные притоки, как Ыгыатга, Марха, Тюкян и Тюнг, которые расположены ниже с. Сунтар.

На рассматриваемом участке в зимний период времени в верхней и нижней точках отсутствует связь, это связано с тем, что в верхнем створе происходят постоянные колебания уровня воды, вызванные водохранилищем.

Список литературы

1. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных гидрологических характеристик. М.: Гострой России, 2004. 72 с.
2. Штиль А.В., Пономарев Н.К., Грицук И.И. Влияние строительства Мотыгинской ГЭС на ледовые процессы в нижнем бьефе // Вестник РУДН. 2015. № 2. С. 52-57.
3. Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек // Известия Российской академии наук. 2016. № 5. С. 70-81.
4. Юмина Н.М., Терешина М.А. Многолетние изменения стока рек бассейна Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5. 2017. № 6. С. 62-70.
5. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Федеральное агентство водных ресурсов. [Электронный ресурс]: URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 15.03.2024).
6. Юмина Н.М., Магрицкий Д.В. Прогнозирование уровней воды в нижнем течении реки Урал // «Евразийский союз ученых». Серия: Географические науки. 2019. № 6(63), Ч. 7. С. 4-9.
7. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты на нижней Лене и Вилюе // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 6. С. 85-95.