ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2023, том 50, № 3, с. 274–285

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 627.152.122

МОРФОЛОГИЯ РУСЛА И РАССРЕДОТОЧЕНИЕ СТОКА СРЕДИ ОСТРОВОВ СЛОЖНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНО-РУКАВНЫХ РАЗВЕТВЛЕНИЙ НИЖНЕЙ ЛЕНЫ И ИХ МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ[1]

© 2023 г. Р. С. Чалов[a], *, Г. Б. Голубцов[a], **, А. С. Завадский[a], *, П. П. Головлев[a], ****, С. Р. Чалов[a], *******

[a]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119899 Россия

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

***e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

****e-mail: az200611@rambler.ru*

*****e-mail: pavel_golovlev@list.ru*

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

Поступила в редакцию 24.02.2022 г.
После доработки 24.02.2022 г.
Принята к публикации 14.12.2022 г.

Впервые дана полная морфолого-гидрологическая характеристика сложных параллельно-рукавных разветвлений нижней Лены, сформировавшихся при суммарной (вместе с островами) ширине русла в отдельных звеньях от 12.6 до 28 км и их протяженности от 36 до 45 км. Количество островов в звеньях разветвлений: 29 в верхнем Монастырском и более 40 в Черпальском. Показано, что на всем протяжении выделяется два основных по водности рукава – левый и правый, из которых последний, судоходный во всех звеньях, более многоводный, проходит вдоль или вблизи правого коренного берега. Левый рукав сосредотачивает в себе сток воды и наносов из левого притока Лены – р. Вилюй, что вместе с его наносоотсасывающей ролью обеспечивает его мелководность и повышенную вторичную разветвленность. Звенья разветвлений разделены короткими сужениями русла до 5–8 км, в которых сохраняется двухстрежневой поток. Показано, что группы островов (архипелаги) посередине реки между основными рукавами разделены сравнительно маловодными субпараллельными им центральными рукавами (суммарно в пределах 10–15% стока реки), многочисленными поперечными межостровными протоками и на две части (верхнюю и нижнюю) – диагональными рукавами, по которым осуществляется частичное перераспределение стока между основными рукавами. Установлено, что в многолетнем плане и при сезонных изменениях стока водность основных и субпараллельных рукавов практически неизменна, тогда как в диагональных периодически колеблется от 10–15 до 30–35% в зависимости от переформирований русла правого основного рукава. Это совпадает с периодическим перераспределением расходов воды, развитием и обмелением проток во вторичных разветвлениях основного рукава, находящихся возле ответвлений от них диагональных рукавов. Выявленные закономерности впервые дают представления о русловом режиме сложных параллельно-рукавных разветвлений русла крупнейшей реки, что имеет большое значение для совершенствования водного пути на нижней Лене.

Ключевые слова: русловые процессы, параллельно-рукавные разветвления, рассредоточение стока, острова, рукава, потоки, водность рукавов, нижняя Лена.

DOI: 10.31857/S0321059623030070, **EDN:** CYOJSK

ВВЕДЕНИЕ

Рассредоточение стока воды – важнейшая характеристика русел рек, разветвленных на рукава, особенно больших и крупнейших, которые отличаются наиболее сложной разветвленностью, характеризуются большим количеством островов, осередков, многообразием их морфометрических параметров, значительной суммарной шириной русла. Чрезвычайно важны сведения о распределении расходов воды по рукавам в разные фазы водного режима и в многолетнем плане при ре-

[1] Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ им. М.В. Ломоносова при поддержке РНФ (проект 18-17-00086П – натурные исследования, русловой анализ рассредоточения стока; переформирования русла – проект 21-17-00181).

шении водохозяйственных и воднотранспортных задач. Данные регулярных наблюдений на гидрологических постах недостаточны для оценки рассредоточенности стока по многочисленным рукавам и протокам и ее временно́й трансформации. Проблема усугубляется малым количеством гидрологических постов, на которых проводятся измерения расходов воды, особенно на крупнейших реках. Так, на нижней Лене расходные гидропосты находятся в районе г. Якутска выше ее слияния с р. Алдан (г.п. Табага) и уже близь устья намного ниже впадения р. Вилюй (г.п. Кюсюр) – на расстоянии >2000 км друг от друга. При этом на указанном промежутке величина водности реки увеличивается более чем двукратно – среднегодовой расход составляет 7070 (г.п. Табага) и 16800 м^3/с (г.п. Кюсюр). Гидрологические посты, на которых проводятся измерения расходов, находятся в сужениях днища долины, где поток собирается в едином неразветвленном русле, и не только не отражают реальную картину водности рукавов, но и недостаточны для использования в расчетах по существующим методикам [3, 6, 8, 9, 19, 23]. Натурные измерения расходов воды в рукавах разветвлений проводятся лишь при специальных русловых исследованиях и связаны в основном с оценками их переформирований. Собственно закономерностям распределения расходов воды, особенно для рек со сложноразветвленным руслом при многообразии его форм, посвящены единичные публикации [17], известны работы по исследованию изменения степени разветвленности при трансформации распределения расходов воды [20, 21], его сезонной динамики в рукавах и роли в развитии осередков и островов [3, 4].

На нижней Лене, особенно ниже устья р. Вилюй, суммарная ширина реки (вместе с островами) достигает 28 км, русло разделяется островами разных размеров на 10–15 проток и рукавов в одном поперечнике, водность даже самых многоводных не превышает трети общего расхода воды в реке. В водохозяйственном отношении река интенсивно используется как водный путь, обеспечивающий “северный завоз” и транспортную связь с Северным морским путем и отдаленными районами Якутии. Для обеспечения его устойчивого функционирования необходимо учитывать рассредоточение стока воды по рукавам, его возможные изменения и происходящие русловые деформации.

Задача статьи – на основе анализа материалов русловых исследований, выполненных в разные годы с 1970-х гг. [2, 10, 18], а также экспедиционных работ в навигации в 2020–2021 гг. выявить основные закономерности рассредоточения стока среди островов, образующих сложные по морфологии параллельно-рукавные разветвления, и его изменчивости во времени. Это позволит учитывать их как важнейший фактор переформирований русла для обоснования мероприятий по обеспечению безопасности судоходства, определения габаритов трассы фарватера, ее положения среди островов и необходимости выполнения дноуглубительных работ (других водопользователей здесь нет).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования был участок нижней Лены ниже устья левого притока – р. Вилюй, характеризующийся очень сложной разветвленностью, обусловливающей рассредоточение стока по многочисленным рукавам и протокам, значительной шириной поймы и самого русла. Большая часть стока реки сосредотачивается в двух основных – лево- и правобережном – рукавах параллельно-рукавных разветвлений [14, 15]. Правый рукав – судоходный и несколько более многоводный, протягивается вдоль или вблизи правого коренного берега (хребет Омулаган), в свою очередь характеризуется разветвлениями 2-го порядка. Такие разветвления еще более характерны для левого рукава, где они образованы бо́льшим количеством островов. Острова и их группы между левым и правым рукавами в центральной части русла разделены субпараллельными им, меньшими по водности рукавами, различными по ширине и длине, между ними и основными рукавами осуществляется гидравлическая связь; отдельные рукава посередине реки (их три на участке) по диагонали расчленяют группы островов в центральной части русла, создавая условия для частичного перемещения расхода воды из правого основного рукава в левый. Ниже выступов и мысов правого коренного и левого пойменного берегов находятся группы прибрежных островов, разделенных маловодными протоками, обусловливающими извилистость верхней части основных рукавов (в правых рукавах – усиливающими отклонение их от коренного берега).

Участок Лены представлен тремя следующими друг за другом звеньями разветвлений: Монастырским (1240–1195 км), Черпальским (1195–1135 км) и Сахам (1135–1095 км), каждое из них образовано десятками больших и малых островов (рис. 1). Общая длина участка по судовому ходу – 145 км.

Лена ниже слияния с Вилюем обладает значительной водностью, которая по сравнению со среднегодовыми велечинами у г. Якутска (г.п. Табага) возрастает почти в 2 раза (главным образом, за счет слияния с Алданом) и составляет 12900 м^3/с; максимальный зафиксированный расход в половодье ~80000 м^3/с. Средний расход воды на спаде половодья (при срезке уровня 320–350 см во время исследований в 2021 г.) составляет 35000–40000 м^3/с. Сток р. Вилюй в зависимости от вод-

Рис. 1. Общая схема (космоснимок) разветвленного русла нижней Лены ниже устья Вилюя. *1* – границы звеньев разветвлений; *2* – положение стрежневой зоны потока в левом и правом основных рукавах и во вторичных разветвлениях основных рукавов; *3* – то же в субпараллельных рукавах; *4* – то же в диагональных рукавах.

ности – 10–12% общего стока Лены (среднегодовой расход в устье – 1520 м^3/с). На спаде половодья по 26.06.2021 на нем зафиксирован расход 4272 м^3/с, что при стоке Лены ~41000 м^3/с также составляет 10%.

Наиболее водный на протяжении всего периода водотранспотного освоения реки (с конца XIX в.) – правый основной рукав. Воды левого притока – р. Вилюй – сосредотачиваются в левом рукаве Лены, в который поступают в полном объеме выносимые им наносы, обусловливая его мелководность и, несмотря на соразмерность со стоком воды правого рукава, формирование вторичных разветвлений и отмелей [2, 10]. Большей водности и меньшей разветвленности правого рукава способствует наличие ведущего коренного берега. Водность обоих основных рукавов существенно меняется по их длине из-за отвлечения части стока или, наоборот, впадения в них рукавов между островами в центральной части русла, также этому способствуют прибрежные разветвления, отвлекающие часть стока в протоки, и разделение потока внутри рукавов на разветвления 2-го порядка. Это сказывается на формировании здесь перекатов, а в правом рукаве – на регулярном изменении положения фарватера, что осложняет условия судоходства.

Во всех трех звеньях разветвлений были измерены расходы воды (положение расходных створов – на рис. 2–4), позволяющие оценить рассредоточение стока как по основным, так и второстепенным рукавам и протокам. Измерения расходов проводились 3–5 июля 2021 г. при уровне 573–544 см по г.п. Жиганск, что соответствует срезке (превышению текущего уровня над меженным – проектным) 353–324 см. Скорость течения и расход воды измерялись акустическим допплеровским определителем скорости течения воды ADCP (“Acoustic Doppler Current Profiler”) типа “RiverRay” (погрешность определения расхода воды ≤5%). Запись и обработка данных измерений ADCP осуществлялись с помощью компьютерной программы, положение створов фиксировалось GPS-навигатором как в ручном, так и в автоматическом режиме. Благодаря автоматизированному методу измерения в короткий срок выполнено большое количество измерений при мало изменяющемся уровне воды. Всего с учетом повторных (контрольных) измерений получены данные по 36 створам, дающим полное представление о распределении расходов воды.

Для выявления многолетних тенденций рассредоточения стока в разветвлениях использовались измерения расходов воды, выполненные в разные фазы режима в 1971–2020 гг. За исключением 2020 г., измерения проводились методами традиционной гидрометрии (гидрометрические вертушки, геодезические засечки с берегов).

Вся система разветвлений Монастырских–Черпальских–Сахам составляет единое параллельнорукавное разветвление нижней Лены [1, 2, 13, 18] вплоть до с. Жиганск. На границах звеньев разветвлений, особенно между Монастырским и Черпальским, в общей акватории между ухвостьем верхнего звена и приверхом нижнего сохраняются и четко прослеживаются (на космических снимках – и при анализе скоростей потока) две динамические оси – левая, выходящая из левого рукава Монастырского узла, направляющаяся затем в левый рукав нижележащего Черпальского, и правая, направляющаяся в правый рукав. Визуально это хорошо подчеркивается цветом водной поверхности из-за разницы мутности воды левой вилюйской ветви потока и правой ленской.

Первое Монастырское разветвление имеет протяженность 36 км (по судовому ходу 40.1 км) при наибольшей ширине русла (с островами) 12.6 км. В нем насчитывается 29 островов разных размеров, из которых 15 расположено в центральной части русла между левым и правым основными рукавами. Остальные острова формируют вторичные разветвления основных рукавов и на заходе в них. Между Монастырским и Черпальским разветвлениями, где русло сужается более чем в 2 раза (до 5.1 км), расположена единая акватория без островов длиной 4 км. Черпальский узел дли-

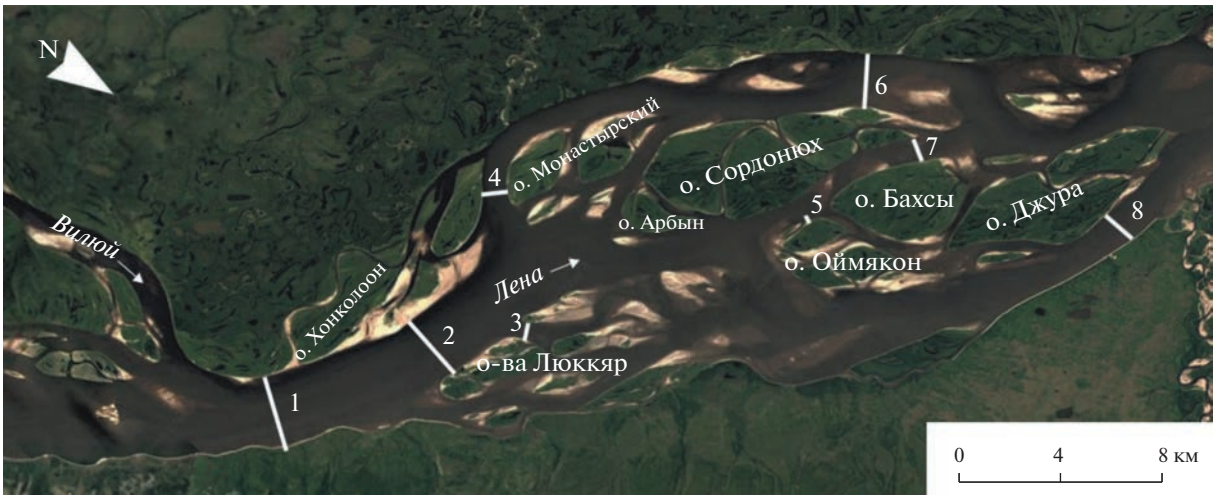

Рис. 2. Монастырское разветвление (1240–1195 км по судовому ходу) и расположение створов измерения расходов воды в июле 2021 г.

Рис. 3. Черпальское разветвление (1195–1135 км по судовому ходу) и расположение створов измерения расходов воды в июле 2021 г.

ной 55 км имеет наибольшую ширину – 28 км, это абсолютный максимум для всей Лены. В центральной части между левым и правым основными рукавами – более 40 островов, образующих более 15 разветвлений рукавов (из них 6 – в их периферийной части). В разветвлении Сахам наибольшая суммарная ширина реки – 16.6 км при длине участка – 43.3 км, по судовому ходу – 46 км. Количество островов между левым и правым рукавами – 36, из них образующих разветвления 2-го порядка в рукавах – 5, прибрежных – 8. Между разветвлениями Черпальским и Сахам ширина русла сокращается до 11 км, но в отличие от сужения перед Черпальским разветвлением, здесь сохраняются прибрежные разветвления как с левой, так и с правой сторон русла, образованные несколькими островами. Кроме того, между прибрежными разветвлениями в единой акватории на заходе в левый и правый рукава разветвления Сахам не происходит сближения и дальнейшего разделения основных по водности рукавов, и заход в левый рукав разветвления Сахам находится выше ухвостья последнего острова Черпальского звена – Булун-Станаах.

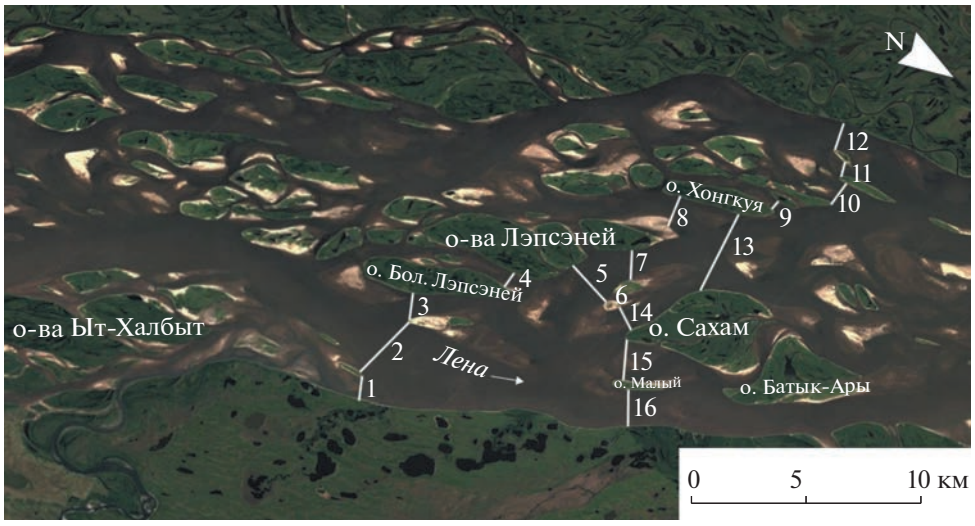

Рис. 4. Разветвление Лэпсэней–Сахам (1135–1095 км по судовому ходу) и расположение створов измерения расходов воды в июле 2021 г.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ ПО РУКАВАМ

Монастырское разветвление

Монастырское разветвление, начинающееся непосредственно ниже устья Вилюя, образовано группой центральных островов – Джура, Оймякон, Бахсы, Сордоннох и др. (рис. 2). Их положение и водность левого и правого (судоходного) рукавов в ретроспективном плане менялись незначительно (табл. 1). Острова разделяют реку на два основных рукава, между которыми гидравлическая связь осуществляется по маловодным межостровным протокам, водность наиболее крупной из них (диагональной между островами Сордоннох и Оймякон) составляет сейчас 12.9% (створ 5). Водность основных рукавов – левого и правого – в узле разветвления перед оголовком центральных островов составляет ~40 и 60% (створы 6 и 8). В левый рукав из диагональной протоки (створ 7) поступает всего 6% воды, остальная часть по протокам между островами Оймякон, Бахсы и Джура частично возвращается в правый рукав. В прибрежные протоки за о-вами Люккяр перед разделением русла на основные рукава поступает не более 8–10%, в отдельные годы 2–3% основного расхода даже при относительно высоких уровнях воды. На заходе левый рукав (у о. Монастырского) делится на две приблизительно равные по водности протоки (~18% – створ 4). Но ниже по течению в нем находится цепочка островов и осередков, образующих сопряженные разветвления 2-го порядка; в результате весь расход левого рукава собирается лишь в створе 6 между звеньями этих разветвлений. Правый рукав представлен практически неразветвленным руслом, отдавая лишь незначительную часть стока (или принимая его) в межостровные или прибрежные протоки.

Особенность разветвления – изменение соотношения водности в основных рукавах в разные фазы водного режима. По измерениям в 2006 г., на пике половодья относительная водность левого рукава в его низовьях достигает 70%, тогда как правого ~30%. По мере снижения уровней водность рукавов выравнивается с небольшим преобладанием доли правого (55–57%). Очевидно, это связано с активным функционированием в половодье межостровных проток посередине реки и диагонального рукава между островами Сордоннох и Бахсы, по которым осуществляется переток из левого рукава в правый. При этом их водность меняется при смене фаз водного режима, как и водность рукавов 2-го порядка у о. Монастырского на заходе в левый основной рукав. Этому способствуют: 1) прохождение правого рукава вдоль ведущего коренного берега, вследствие чего возникает поперечный уклон от него в сторону центральных островов, левого рукава и затопленной левобережной поймы; 2) направляющее воздействие прибрежных о-вов Люккяр, отклоняющих течение к узлу разветвления (островам Арбын и Сордоннох); 3) половодье на р. Вилюй, весь сток которого направлен в это время в левый рукав. В этой ситуации наиболее водными оказываются диагональный и левый за о. Монастырским рукава (до 15%), хотя в последнем к межени доля стока снижается до 2.9% (1974 г., срезка 188 см), так как в это время его истоки становятся ориентированными почти под прямым углом к оси потока в правом основном рукаве. Правый рукав проходит вдоль коренного берега, в основном имеет плесовый характер и более благоприятен для судоходства. Левобережные и цен-

Таблица 1. Измеренные расходы воды в Монастырском разветвлении (1240–1195 км)

Створ (рис. 2)	Рукав, протока	24.06.1974–01.08.1974		05.07.2021	
		Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см
1	Единое неразветвленное русло ниже устья р. Вилюй	23589 (100)	297	29478 (100)	324
2	Основной рукав между прибрежными о-вами Люккяр (справа) и безымянными (слева)	20994 (89.0)	257	28229 (95.8)	324
3	Прибрежные протоки среди о-вов Люккяр	355 (1.5)	244	2489 (8.4)	324
4	Левая протока у о. Монастырского на заходе в левый основной рукав	2601 (11.0)	244	5468 (18.5)	324
5	Субпараллельный рукав между островами Оймякон и Сордоннох	675 (2.9)	261	3812 (12.9)	324
6	Левый основной рукав	10412 (42.1)	188	10703 (36.3)	324
7	Субпараллельный (центральный) рукав между островами Бахсы и Сордоннох	556 (2.1)	188	1751 (6)	324
8	Правый основной (судоходный) рукав	14272 (59.5)	188	17195 (58.3)	324

тральные рукава выполняют наносоотсасывающую роль, аккумулируя в том числе и наносы, поступающие из Вилюя. Такое положение стрежня потока и благоприятные условия для развития правого рукава даже при низких уровнях остаются неизменными в течение последних 60 лет (с конца 1950-х гг.).

Черпальское разветвление

Черпальское разветвление находится ниже Монастырского после того, как стрежни потока сближаются в единой акватории и вновь расходятся по двум основным рукавам (рис. 3; табл. 2). Центральная часть русла, во многом определяющая внешний облик и динамику всего разветвления, заполнена крупными и многочисленными малыми островами, представляя собой своеобразный архипелаг, расчлененный на части как маловодными пойменными протоками, так и более крупными продольными, субпараллельными и диагональным рукавами, разделяющим весь островной массив на верхнюю (острова Чарпалар, Уэс-Станаах) и нижнюю (острова Большой Соболиный, Булун-Станаах, Хара-Ары и др.) части. В прибрежной части русла, за выступом (мысом) правого коренного берега и конусом выноса р. Лямпушки расположены крупные острова Тополиный (Тирэх), Тисэнгдэ на заходе в правый рукав; в левом рукаве от захода в него и в центральной части расположена цепочка о-вов Тыатенгелилях и ряд других, меньших размеров, которые составляют в нем систему сопряженных разветвлений 2-го порядка.

Основные особенности Черпальского разветвления, как и Монастырского, – его значительная ширина (до 28 км), преобладание водности правого основного рукава (42.2%) и его расположение вдоль высокого коренного берега. Продольные рукава посередине реки в верхней части архипелага (между островами Черпальскими, Чарпалар и Уэс-Станаах) сравнительно маловодны (их водность – 4.5 и 9.2%). Левый рукав сосредотачивает 31.2% воды, но из-за большого количества островов и осередков в нем такая водность достигается лишь в нижней части (ниже о. Тыатенгелилях). Диагональный рукав, отходящий влево у оголовка о. Большой Соболиный, забирает 14.5% стока, но 12% уходит в продольный рукав в нижней части архипелага (между островами Большой Соболиный и Хара-Ары).

Островами 2-го порядка (Митька-Беляга и Рысий) правый основной рукав на перевале потока к правому коренному берегу разделяется на три протоки, между которыми в многолетнем плане происходит периодическое перераспределение стока (и изменяется трасса судового хода).

Протока между островами Рысьим и Митька-Беляга (створ 11) посередине правого основного рукава мало меняет свою водность, практически всегда маловодная (4.5–7.3%) и мелкая. Периодические изменения водности левого и правого рукавов возле этих островов совпадают по времени с большим или меньшим отвлечением части

Таблица 2. Измеренные расходы воды в Черпальском разветвлении (1195–1135 км)

Створ (рис. 3)	Рукав, протока	5.081974–6.09.1974		19.07.1993–20.07.1993		25.06. 2020		04.07.2021	
		Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см
1	Правый между о. Большой Соболиный и правым берегом (судоходный)	13742 (51.6)	294	8100 (36.1)	180	16401 (39.7)	379	13402 (42)	333
2	Между островами Рысий и Большой Соболиный	–	–	–	–	7038 (17.1)	379	5841 (18.3)	333
3	Диагональный рукав у о. Большой Соболиный	6837 (25.7)	294	2450 (11.0)	190	3095 (7.5)	379	1996 (6.3)	333
4	Лавровая протока	3503 (13.1)	294	2485 (11.0)	190	5345 (12.9)	379	4062 (12.7)	333
5	Левый рукав (протока справа от о. Тыатенгелилях)	6508 (24.4)	294	8290 (36.9)	180	8555 (20.7)	379	6912 (21.7)	333
6	Протока слева от о. Тыатенгелилях	1501 (5.6)	294	710 (3.1)	180	3700 (9.0)	379	3022 (9.5)	333
7	Центральный рукав между островами Уэс-Станаах и Черпальскими	2408 (9.0)	294	–	–	4292 (10.4)	379	2936 (9.2)	333
8	Центральный рукав между островами Черпалар и Черпальскими	–	–	–	–	1617 (3.9)	379	1106 (3.5)	333
9	Левая протока на заходе в диагональный рукав	1444 (5.4)	243	–	–	3648 (8.8)	379	2621 (8.2)	333
10	Правый рукав (протока между островами Митька-Беляга и Черпальскими	7473 (28.1)	231	5800 (26.0)	190	8479 (20.5)	379	6996 (22)	333
11	Между островами Митька-Беляга и Рысий	1484 (5.6)	231	1601 (7.3)	190	1848 (4.5)	379	1728 (5.4)	333
12	Между островами Рысий и Тисэнгдэ	4719 (17.7)	231	6100 (26.2)	190	5826 (14.2)	379	5146 (16.1)	333
13	Единое русло перед Черпальским разветвлением	26622 (98.5)	231	22400 (99)	190	41035 (99.5)	379	31897 (99.9)	333

стока в диагональный рукав перед о. Большой Соболиный (створ 3) и из него в субпараллельную Лавровую протоку (створ 4). В годы, когда возрастает водность протоки справа от о. Рысьего (вдоль правого коренного берега – створ 12), заход в диагональный рукав мелеет, доля стока в нем сокращается в 2–2.5 раза. Эти колебания водности рукавов и периодическое их развитие связаны со смещением кос и отмелей в ухвостье правобережных островов Тисэнгдэ и Тирэх, перекрывающих заход в правый рукав у о. Рысьего, превращая его в длинную затонину вдоль правого коренного берега, и последующим их отторжением, благодаря чему поток вновь перемещается в правую протоку

у о. Рысьего. Одновременно на заходы в диагональный рукав и на протоку слева от о. Митька-Беляга надвигается массивный побочень, смещающийся вдоль верхней части центральной группы островов, перекрывая и способствуя их обмелению. Такие переформирования во второй половине XX в. происходили каждые 10–12 лет, но начиная с 1990-х гг. цикл продолжается в среднем 7–9 лет. В развитии диагонального рукава эта периодичность сказывается на колебаниях водности правого основного рукава в пределах от 36.1 (1993 г.) до 51.6% (1974 г.), в 2021 г. она составила 42%. Это рассредоточение стока воды в нижней части правого основного рукава на его подходе к правому коренному берегу приводит к формированию перекатов – одних из самых затруднительных для водного транспорта, требующих проведения регулярных дноуглубительных работ для обеспечения нормального судоходства.

В многолетнем плане и в разные фазы водного режима водность именно субпараллельных рукавов колеблется незначительно. По данным измерений 1971–2020 гг. доля стока в Лавровой протоке менялась в пределах 11.0–13.1%. Величина оттока воды в диагональный рукав (створ 3) из правого рукава перед оголовком о. Большой Соболиный меняется весьма значительно: максимальная доля расхода в нем была зафиксирована в 1971 г. – 31% с учетом отвлечения до 13% расхода воды в Лавровую протоку, что обеспечивало перераспределение стока между основными рукавами в пределах 18%. Это – следствие описанных переформирований русла правого рукава.

Таким образом, при относительно малой изменчивости во все фазы водного режима распределения стока Лены в Черпальском разветвлении между левым и правым основными рукавами (60–70 и 40–30%) постоянство водности субпараллельных (центральных) сравнительно маловодных рукавов, существенные колебания водности, связанные с местными переформированиями русла, наблюдаются только в диагональном рукаве, в отходящем от него центральном рукаве нижней части звена – Лавровой протоке и, особенно, в разветвлениях 2-го порядка, образованных островами Митька-Беляга и Рысий.

Разветвление Сахам

Разветвление Сахам, расположенное ниже Черпальского, по морфологическому строению аналогично ему, продолжает параллельно-рукавные разветвления и составляет их следующее звено. Русло здесь после незначительного сужения ниже ухвостьев островов Большой Соболиный, Хара-Ары и Булун-Станаах снова разделяется на два основных (разделенных в центральной части группой островов) и на субпараллельные им рукава, а также на многочисленные межостровные маловодные протоки посередине русла. Среди них выделяется диагональный рукав между островами Большой Лэпсэней и Сахам, подобный таковому у о. Большого Соболиного в Черпальском разветвлении. Ниже этого рукава слева от о. Сахам группы островов посередине реки вновь разделены субпараллельными рукавами. Соотношение расходов воды двух основных рукавов, как и выше по течению, – с небольшим преобладанием стока в правом основном судоходном рукаве (55–60%). Соответственно, левый рукав в сумме с субпараллельными рукавами в центральной части русла и межостровными протоками забирает до 40–45%. Суммарная (с островами) ширина русла достигает 13–17 км, количество островов и рукавов в одном створе – более 10. Наиболее крупными островами (или группами островов) являются Большой Лэпсэней и Хонгкуя в верхней части звена (выше ответвления диагонального рукава) Сахам и Батык-Ары в нижней части с маловодной (3–5%) протокой между ними длиной более 10 км; нижнюю часть разветвления в левой стороне реки составляют безымянные острова (рис. 4).

Основным и наиболее важным фактором, определяющим морфодинамику русла, как и выше по течению, является разделение потока на два основных рукава, в каждом из которых формируются острова и осередки, в свою очередь разделяющие их на протоки 2-го порядка. Но в отличие от Монастырского и Черпальского разветвлений, водность основных рукавов здесь различается почти в 3 раза: левый рукав (створы 10–12) – 17.8%, правый (створы 1, 2, 3) – 65.5%. Такому перераспределению стока в пользу правого основного рукава способствует направляющее воздействие вогнутости левого берега в Черпальском звене и образование цепочки островов посередине русла, перекрывающих заход в левый рукав в разветвлении Сахам. В результате по все трем звеньям происходит последовательное увеличение водности правых и снижение водности левых рукавов. В правой ветви течения перераспределение расхода воды по рукавам разветвлений 2-го порядка, смещение и надвижение на заходы в рукава побочней на фоне сезонных и многолетних колебаний стока реки, как и в Черпальском разветвлении, приводят к периодическому изменению положения динамической оси потока (и трассы судового хода) и такой же периодичности в активизации диагонального рукава у о. Сахам.

Анализ данных измерений расхода воды за различные годы (табл. 3) показывает относительное постоянство рассредоточения стока в диагональном рукаве, в том числе на фоне его активизации (в определенные периоды в нем располагался судовой ход, огибающий о. Сахам) при ее колебаниях в зависимости от переформирований русла правого основного рукава. В периоды по-

вышенной водности (конец 1940-х, начало 1970-х, начало 2000-х гг.) доля стока в нем была >35% (в половодье – до 50%), и тогда же увеличивалась водность центрального (субпараллельного) рукава у о. Сахам. В другие годы только при высоких уровнях она составляла ≤30%, а в низкую межень поток разделялся по протокам между осередками (до трех), водность каждой протоки – 7–9%, и лишь суммарная доля расхода воды в диагональном рукаве составляет ~30% (створы 5, 6, 14), тогда как в начале 1970-х гг. она была равна 41%. Соответственно, увеличилась доля стока в правом рукаве – 40% в 2021 г. против 32% в 1974 и 1994 гг. Правый рукав (в нижней части звена) у о. Сахам, подобно правому рукаву в Черпальском разветвлении, разделяется на две ветви о. Малым (створы 15, 16). В 1989–1995 гг. слева от о. Малого сосредотачивалась большая часть расхода воды, но к 2020 г. эта протока обмелела, ее водность составила 4–5%. В это же время протока справа от о. Малого (створ 16), куда был переведен судовой ход в 2010-е гг., забирает ~32%.

Сохранению повышенной водности диагонального рукава способствует увеличение доли стока в створе 3 (до 20%), и в некоторые годы здесь был судовой ход, который, огибая отмели в ухвостье о. Лэпсэней, направлялся в диагональную протоку. Эти изменения в рассредоточении стока связаны с формированием побочней и кос в верхней части правого основного рукава, в ухвостье правобережных островов Ыт-Халбыт и в их периодическом отторжении (аналогично деформациям в Черпальском разветвлении). С другой стороны, повышенной водности правого основного рукава способствует его расположение вдоль высокого коренного берега. Это же обстоятельство – одна из причин меньшей водности левого рукава и формирования поперечного уклона между двумя основными рукавами, что наряду с деформациями русла в верхней части правого рукава создает условия для развития диагонального рукава у о. Сахам.

Внутригодовые колебания стока также несущественно сказываются на перераспределении расхода по рукавам в разветвлении Сахам: относительная водность правого рукава в его верхней части уменьшается по мере спада половодья (снижение уровней более чем на 3 м) всего с 31.8 до 28.8%.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАССРЕДОТОЧЕНИЯ СТОКА

Приведенные данные свидетельствуют о наличии общих закономерностей в морфологии и рассредоточении стока в трех звеньях (Монастырский, Черпальский, Сахам) параллельно-рукавных разветвлений русла нижней Лены протяженностью 145 км. При огромной ширине реки (12, 28, 16 км) в звеньях, ограниченных сужениями русла (до 4–5 км), каждое звено представляет собой архипелаг островов посередине реки, разделяющий левый и правый наибольшие по водности (от 30 до 70% общего стока) рукава, причем во всех звеньях разветвлений более многоводный – правый рукав, проходящий вдоль или вблизи правого коренного (горного) берега. Это во многом определяет поперечную асимметрию в распределении расходов воды между основными рукавами. Начало каждого звена разветвлений приурочено к выступам правого коренного берега, оказывающего на поток направляющее воздействие, которое между узлами Монастырским и Черпальским, Черпальским и Сахам усиливается конусами выноса горных рек и сформировавшимися непосредственно ниже их прибрежными островами, в протоки между которыми отвлекается до 10% расхода воды. Наименее выражены выступы ведущего правого берега перед Монастырским звеном разветвления, что определяет как меньшую суммарную ширину реки в нем, так и степень его разветвленности.

Архипелаги островов посередине реки разделяются на две (Монастырское разветвление) – три (Черпальское и Сахам) части центральными, субпараллельными основным рукавами, относительная водность которых находится в пределах 10–15%, а в Черпальском и Сахам – также диагональными рукавами на верхнюю и нижнюю части (максимальная по водности – в разветвлении Сахам). Каждая часть состоит из многочисленных больших и малых островов, разделенных межостровными маловодными протоками. Диагональные рукава, берущие начало в правых основных рукавах каждого звена, осуществляют перемещение части стока из него в левый рукав. Диагональный рукав в Черпальском разветвлении забирает из правого рукава 18% воды, но в левый поступает лишь 6% – остальная часть расхода уходит в центральные субпараллельные рукава в нижней части архипелага (наиболее водная из них – Лавровая протока). В разветвлении Сахам доля стока диагонального рукава больше – до 30%, причем в левый основной рукав уходит большая часть расхода, существенно увеличивая его водность и выравнивая его распределение между основными рукавами. В Монастырском звене из-за его меньших размеров и близкой водности левого и правого рукавов (42 и 58% соответственно) диагональный рукав между ними отсутствует. В нижележащих звеньях разница в водности возрастает, чему, по-видимому, способствует образование поперечного перекоса водной поверхности: чем больше разница в водности рукавов (наибольшая в разветвлении Сахам), тем больше отвлекаемая в диагональный рукав часть стока. Определяющую роль в этом играет расположение рукава вдоль коренного высокого – “ведущего” берега [7], осо-

Таблица 3. Измеренные расходы воды в разветвлении Сахам (1135–1095 км)

Створ (рис. 4)	Рукав, протока	26.06.1971–11.07.1971		28.07.1994–29.07.1994		24.06. 2020		03.07.2021	
		Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см
1	Прибрежная протока за безымянным островом	440 (0.7)	512	–	290	1200 (2.9)	379	863 (2.5)	353
2	Правый (судоходный) основной рукав	19010 (28.1)	498	19215 (62.7)	290	17997 (43.2)	379	15757 (45.1)	353
3	Левая протока перед заходом в диагональный рукав между безымянным островом и о. Большой Лэпсэней	8060 (11.9)	498	–	–	6935 (16.6)	379	6599 (18.9)	353
4	Субпараллельный рукав между островами Большой и Малый Лэпсеней	2290 (3.4)	471	1100 (3.6)	290	1480 (3.6)	379	1014 (2.9)	353
5	Квазипоперечный рукав между островами Сахам и Лэпсэнэй (левая протока)	17250 (25.3)	544	10700 (34.9)	290	9035 (21.6)	379	7130 (20.4)	353
6	Диагональный рукав между островами Сахам и Лэпсэнэй (центральная протока)					1140 (2.7)	379	1067 (3)	353
7	Диагональный рукав между островами Сахам и Лэпсэнэй (левая протока)	–	–	–	–	7895 (18.9)	379	6672 (19.1)	353
8	Субпараллельный рукав между островами Хонгкуя и Лэпсэней	3170 (4.6)	547	4300 (14.0)	290	3390 (8.1)	379	2735 (7.8)	353
9	Межостровная протока слева от о. Хонгкуя	–		–	–	1367 (3.3)	379	319 (0.9)	353
10	Правая протока в левом основном рукаве	–	–	–	–	–	379	1039 (3)	353
11	Центральная протока в левом основном рукаве	–	–	–	–	–	379	810 (2.3)	353
12	Левая протока в левом основном рукаве	26410 (38.8)	565	6070 (20)	290	7721 (18.5)	379	5424 (15.5)	353
13	Диагональный рукав между островами Сахам и Хонгкуя	19270 (28.3)	547	14990 (48.9)	270	16312 (39.1)	379	13264 (38)	353

Таблица 3. Окончание

Створ (рис. 4)	Рукав, протока	26.06.1971–11.07.1971		28.07.1994–29.07.1994		24.06. 2020		03.07.2021	
		Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см	Q, м^3/с (%)	срезка, см
14	Диагональный рукав (правая протока вдоль о. Сахам)	–	–	–	–	3758 (9.0)	379	3089 (8.8)	353
15	Правый основной рукав (протока между островами Сахам и Малым)	21560 (31.7)	547	9920 (32.3)	270	2281 (5.6)	379	1775 (5)	353
16	Правый судоходный рукав (протока между о. Малый и правым берегом)					13502 (32.4)	379	12291 (35)	353

бенно в половодье, когда затоплены острова и левобережная пойма [3, 16].

Наличие у правых рукавов во всех звеньях разветвлений ведущего коренного берега определяет на значительном их протяжении (в нижней части) плесовый характер русла. Но в верхней части рукавов (почти половина их длины), где рукава огибают прибрежные острова, формируются перекаты, разветвления 2-го порядка в основных рукавах (осередковое в Монастырском разветвлении, острова Митька-Беляга и Рысий в Черпальском, Малый в разветвлении Сахам), в которых происходит вторичное рассредоточение стока и периодическое развитие проток слева и справа от них. Эти переформирования, вместе с тем, способствуют периодической активизации или снижению водности диагональных рукавов (у о. Большой Соболиный в Черпальском узле и у о. Сахам). В результате в этих местах в правом рукаве располагаются одни из самых затруднительных для водных путей перекатов.

В отличие от правых, более многоводных, рукавов, левые рукава во всех звеньях параллельно-рукавных разветвлений характеризуются на всем протяжении вторичными разветвлениями и формированием многочисленных перекатов. Этому способствует их наносоотсасывающая функция из-за поперечного перекоса водной поверхности во время половодья от правого коренного берега и сосредоточения в них вод левого притока – р. Вилюй. Это подтверждается распределением расходов взвешенных наносов по рукавам: правый рукав, не испытывающий на себе влияния притока, характеризуется расходом наносов 223 кг/с, в то время как левые рукава в сумме имеют расход взвешенных наносов 360 кг/с (при меньшей водности по сравнению с правым).

Для всей системы параллельно-рукавных разветвлений в многолетнем плане характерно относительное постоянство водности основных субпараллельных и/или диагональных рукавов, испытывающих незначительные колебания в связи с сезонными и многолетними изменениями стока и местными русловыми деформациями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования сложных параллельно-рукавных разветвлений нижней Лены, сформировавшихся при максимальной суммарной ширине реки, и полученные результаты впервые дают полноценную морфологическую характеристику и оценку закономерностей рассредоточения стока крупнейшей реки с этим типом русла, отличающейся самой высокой из всех рек России и, возможно, Евразии степенью разветвленности (многорукавности).

По-видимому, аналогичные особенности морфологии русла и рассредоточения стока свойственны 100-километровому участку верхней Оби ниже слияния Бии и Катуни [11, 12]. Однако здесь река по водности в 10.5 раз, а по суммарной ширине русла в 12 раз меньше нижней Лены, хотя по относительной сложности разветвленности с учетом этих показателей гидролого-морфодинамические связи оказываются едиными [4, 5].

Рассредоточение стока в разветвленном русле – важный фактор для решения вопросов водохозяйственного и водотранспортного освоения рек, поскольку параметры русла и форм руслового рельефа и инженерные мероприятия определяются водностью рукавов.

Авторы благодарят администрацию “Ленводпути”, А.И. Сахарова за содействие в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беркович К.М., Борсук О.А., Гаррисон Л.М., Кирик О.М., Лодина Р.В., Рулева С.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Русловой режим и регулирование русла средней и нижней Лены // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1981. Вып. 8. С. 125–156.
2. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
3. *Войнович П.А.* К вопросу о распределении расхода по разветвлениям открытого русла // Изв. НИИ гидротехники. Т. V. Л., 1932. С. 73–105.
4. *Голубцов Г.Б., Чалов Р.С.* Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 80–90.
5. *Голубцов Г.Б., Чалов Р.С.* Сравнительный гидролого-морфологический анализ островов сложноразветвленных русел верхней Оби и средней Лены // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30. Вып. 2. С. 164–174.
6. *Иванов В.В.* Метод гидравлического расчета элементов водного режима в дельтах рек // Тр. ААНИИ. 1968. Вып. 283. С. 30–63.
7. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.
8. *Михайлов В.Н.* Динамика потока и русла в неприливных устьях рек // Тр. ГОИН. Вып. 102. М.: МО Гидрометеоиздата, 1976. 260 с.
9. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 39. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
10. Русловой режим средней и нижней Лены. М.: Деп. ВИНИТИ № 2224-76, 1976. 184 с.
11. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
12. Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.: МГУ, 1996. 243 с.
13. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
14. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
15. *Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулева С.Н., Завадский А.С., Головлев П.П., Голубцов Г.Б.* Формирование, эволюция и временная трансформация параллельнорукавных разветвлений речных русел // Географический вестн. 2020. № 4 (55). С. 110–125.
16. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н.* Параллельно-рукавные разветвления речных русел; условия формирования, морфология и динамика // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 166–174.
17. *Чалов Р.*С., *Камышев А.А., Куракова А.А., Завадский А.С.* Особенности рассредоточения стока воды и взвешенных наносов в половодье в раздвоенном русле нижней Оби // Вод. ресурсы. 2021. Т. 48. № 1. С. 23–33.
18. *Чалов Р.С., Кирик О.М.* Ленские “разбои”: ретроспективный анализ переформирований, прогнозные оценки и регулирование русла // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Геогр. ф-т. МГУ, 2015. Вып. 19. С. 294–338.
19. *Чернышов Ф.М.* Повышение эффективности путевых работ на многорукавных участках рек. Новосибирск.: Изд-во НИИВТ, 1973. 324 с.
20. *Egozi R., Ashmore P.* Experimental analysis of braided channel pattern response to increased discharge // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2009. P. 941–962.
21. *Evrard O., Poulenard J., Némery J., Ayrault S., Gratiot N., Duvert C., Prat C., Lefèvre I., Bonté P., Esteves M.* Tracing sediment sources in a tropical highland catchment of central Mexico by using conventional and alternative fingerprinting methods // Hydrol. Process. 2013 V. 27. P. 911–922.
22. *Nicholas A.P.* Modelling the continuum of river channel patterns // Earth Surf. Process. Landforms. 2013. V. 438. Iss. 170. P. 1187–1196.
23. *Schuurman F., Kleinhans M.G.* Bar dynamics and bifurcation evolution in a modelled braided sand-bed river // Earth Surf. Process. Landforms. 2015. V. 40. Iss. 10. P. 1318–1333.