

УДК 551.482.212(470)

© 1991 г.

ЗАЙЦЕВ А. А., КИРИК О. М., ЛОДИНА Р. В.,  
СИДОРЧУК А. Ю., ЧАЛОВ Р. С.**РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА Р. ЛЕНЕ В УСЛОВИЯХ  
ПЕРЕХОДА ОТ ВРЕЗАННОГО РУСЛА К ШИРОКОПОЙМЕННОМУ**

Рассмотрены вопросы динамики русловых форм в пределах морфологически однородного участка на основе детальных исследований русла р. Лены в районе пос. Мохсоголлох. Определены специфическая роль руслообразующих наносов в формировании твердого стока р. Лены и особенности их динамики в разные фазы гидрологического режима. Выявлена специфика русловых деформаций в результате перемещения отдельных русловых форм разных порядков с учетом взаимосвязи с циклами водности реки, и приведены результаты исследований по изучению формирования гряд в условиях дефицита наносов.

Русловые процессы крупнейших рек, таких, как среднее и нижнее течения Оби, Енисея, Лены, Амура изучены явно недостаточно. Имеются детальные описания или отдельных форм проявления русловых процессов — перекатов, узлов слияния рек, или конкретных участков [5, 7]. В последнем случае больше всего повезло р. Лене [3, 8, 11, 12], для которой впервые для рек подобного размера был дан полный анализ руслового режима [1, 10]. Вместе с тем вся совокупность проявлений русловых процессов не может быть освещена при таком масштабе региональных исследований. Поэтому для крупнейших рек, в том числе и для Лены, сохраняется актуальным детальное изучение всей иерархии русловых форм, их взаимосвязи и динамики в пределах морфологически однородных участков. В этом отношении представляют интерес результаты исследований на участке р. Лены в районе пос. Мохсоголлох (1986—1987 гг.): Этот участок, располагаясь на границе двух геоморфологических районов — Приленского увалисто-холмистого плато и Лено-Вилуйской равнины [2], характеризуется сменой условий ограниченного развития деформаций во врезанном русле условиями свободного развития широкопойменного русла (рис. 1). В пределах плато река протекает в беспойменной долине и делится на два рукава цепочкой островов. Суммарная ширина реки достигает почти 5 км (на острова приходится 2 км), большая часть расхода воды (60—70%) сосредоточивается в правом рукаве. По классификации Р. С. Чалова [9], это врезанное русло с параллельно-рукавным разветвлением.

На участке исследований появляется пойма шириной до 4 км, расчлененная пойменными протоками (Качикатская и др.) на отдельные массивы. В межень эти протоки пересыхают, в половодье относительная водность Качикатской протоки достигает 13—15%. Главное русло реки приближается здесь к левому коренному берегу и далее следует вдоль него, ширина русла 3—3,5 км. Вдоль правобережной поймы находятся небольшие острова — Безымянный, Архипка-Ключевский, Алах, создающие односторонние разветвления русла [9]. Наибольшую водность имеет протока за о-вом Архипка-Ключевский — 25—35% в зависимости от фазы режима и переформирования русла.

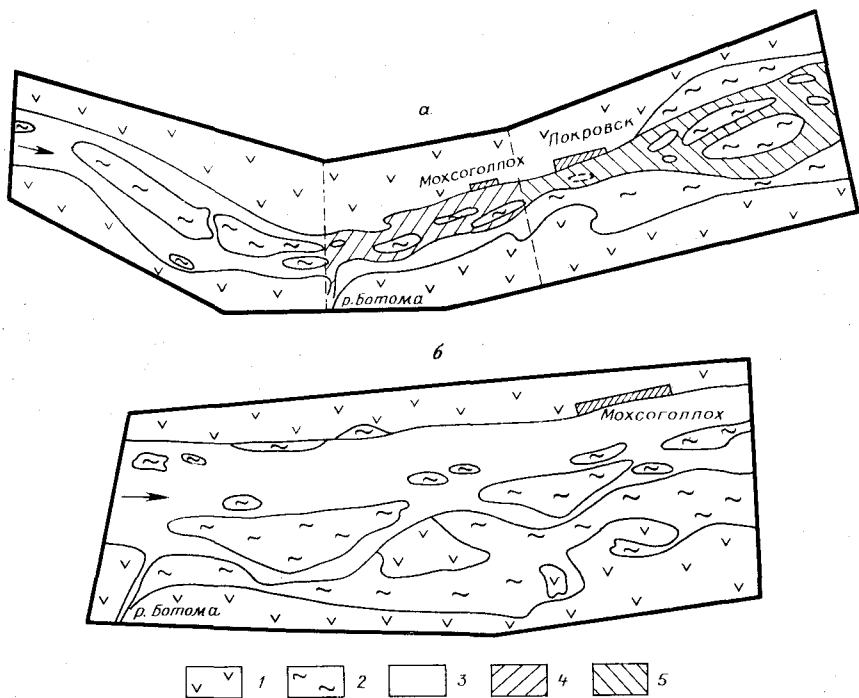


Рис. 1. Схемы условий формирования и распределения типов русла р. Лена в пограничной области Приленского плато и Лено-Вилуйской равнины (а), а также участка исследований у пос. Мохсоголлох (б)  
 1 – коренные берега, 2 – пойма. Участки русла: 3 – врезанное параллельно-рукавное, 4, 5 – односторонние и сопряженные разветвления

Еще ниже по течению (от пос. Покровск) на фоне продолжающегося расширения поймы русло представлено сопряженными разветвлениями, которые типичны для Лены вплоть до слияния с Алданом [1, 10].

Среднегодовой расход воды на средней Лене в районе пос. Мохсоголлох, превышает 7000 м<sup>3</sup>/с. В маловодный 1986 г. он составлял 4100 м<sup>3</sup>/с, в 1983 г. превышал 10 500 м<sup>3</sup>/с. Наибольшая часть стока проходит в весенний период. Половодье обычно наступает во второй половине мая и сопровождается бурным вскрытием реки. Уровни воды на пике половодья поднимаются на 10–11 м над зимними. Спад половодья более медленный, продолжается 1–1,5 мес с наложением нескольких дождевых паводков.

Летняя межень отличается крайне неравномерным стоком. В разные годы она может прерываться систематическими паводками или характеризуется длительным маловодьем. Осенью обычно на реке проходит небольшой паводок. Зимой сток реки по сравнению с летним минимумом вдвое меньше. Это приводит к обсыханию многочисленных отмелей, которые промерзают в течение 7 мес ледостава крайне суровой малоснежной зимы на глубину, превышающую мощность деятельного слоя грунта.

Выделяются 20- и 10-летние циклы с различной величиной стока. Период до 1938 г. в целом был многоводным, в 40-е годы и вплоть до 1955 г. наблюдался период маловодья; лишь 1949 г. отличался повышенной водностью. Следующий период (до 1984 г.) – многоводный; однако в середине его в течении ряда лет отмечался пониженный сток (особенно маловодные 1969 и 1972 гг.). 1985–1987 гг. – начальные годы в ожидаемом маловодном периоде, хотя 1988–1989 гг. отличались несколько повышенной водностью.

Максимальный расход наносов, измеренный по ближайшему водпосту Табага, достигает 7 т/с. Связь расхода наносов  $R$  со стоком воды  $Q$  показана на рис. 2.

Результаты расчета максимумов ежегодной эпюры стока наносов в зависимости от уровня воды за 1950—1987 гг. свидетельствуют о том, что

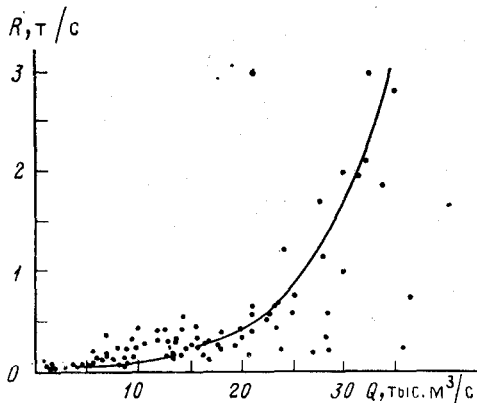


Рис. 2. Связь расхода воды и наносов по водпосту Табага (р. Лена) за 1979—1984 гг.

их наибольшее значение наблюдается в отдельные многоводные годы (1955—1966 и 1974—1984) при уровнях 6—8 м над меженью и расходах воды  $>45$ —50 тыс. м<sup>3</sup>/с. Как будет показано ниже, именно в это время русло реки на исследованном участке претерпевает наиболее существенные изменения.

Суммарный сток наносов по годам был определен интегрированием кривой ( $Q=f(RP)$ ). Его величина довольно изменчива. Например в 1950—1953 гг. сток наносов был почти в 6,5 раза меньше, чем в 1959—1983 гг.

Неравномерность стока наносов более выражена, чем неравномерность стока воды. Более

90% стока проходит в период половодья. Особую роль в стоке наносов играют руслообразующие наносы, слагающие основные формы рельефа и выстилающие большую часть русла. Лишь возле левого коренного берега часто наблюдаются выходы скальных пород — известняков, доломитов, мергелей. Они также иногда встречаются вдоль стержня меженивого потока, там, где происходит размыв дна. Таким образом, коренное ложе реки располагается на глубине плесовых ложиц, определяя размер вертикальных деформаций русла и создавая неразмываемую кровлю, на поверхности которой происходит образование, перемещение и стабилизация форм транспорта наносов. Выше по течению выходы коренного ложа часто определяют морфологию русла; ниже по течению скалы в русле уже не встречаются. Донные руслообразующие наносы в пределах участка представлены песками и галькой (рис. 3). Галечный материал диаметром 40—45 мм сравнительно малоподвижен; наибольшую площадь в русле занимают средне- и крупнозернистые пески (0,46 мм).

Песчаные наносы, сосредоточиваясь преимущественно на побочных, осередках и прилегающих к ним мелководным участкам русла, характеризуются высокой степенью сортированности. На дне огибающих осередки проток толщина слоя песка мала и они зачастую полностью вымываются потоком, обнажая подстилающие базальные галечники. В осенний период после длительной летней межени наблюдается увеличение (по сравнению с весенним половодьем) площади русла, занятого скальным ложем, с 20 до 30—40%.

На подъеме половодья, когда затапливаются еще промерзшие отмели, поток взвешивает частицы пылеватых фракций и тонкодисперсный материал. После быстрого прохождения фронта паводочной волны, в период продолжительного спада половодья, при существенных расходах воды по мере оттаивания отмелей начинается активное перемещение донных наносов. Поверхностные скорости течения в половодье достигают на стрежне потока 2 м/с и более; над затопленным осередком они составляют немногим более 1 м/с. В этом время наибольший процент частиц во взвеси имеют пески диаметром 0,2—0,5 мм. В результате в русле происходят наибо-

лее существенные переформирования, а все его ложе покрывается подвижными песками. Аналогичная картина наблюдается и при прохождении высоких летних паводков в многоводные годы.

По мере дальнейшего спада половодья среднезернистые пески аккумулируются на побочных и осередках. В то же время вынос среднезернистого материала продолжается в стрежневой зоне потока, где скорости течения еще достаточны для переноса руслообразующих наносов, что приводит к укрупнению здесь наносов и обнажению на дне базальных галечников или даже коренного скального ложа.

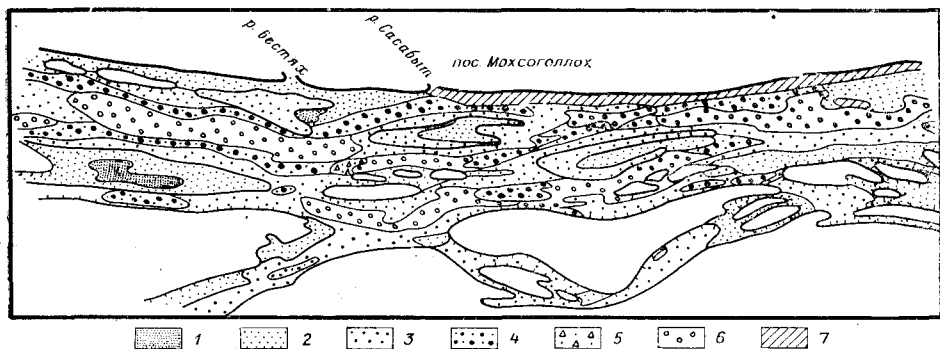


Рис. 3. Схема распределения руслообразующих наносов (по съемке в июне 1986 г.) Пески: 1 — тонкозернистые; 2 — мелко- и мелкосреднезернистые; 3 — среднезернистые; 4 — средне-крупно- и крупнозернистые; 5 — гравелистые и гравий; 6 — галька; 7 — скала

В начале исследованного участка поток, переваливая от правого берега и соединяясь с достаточно многоводным левым рукавом, образует единое течение реки. Однако изгиб левого коренного берега в районе соединения рукавов отклоняет его вправо, и динамическая ось (стрежень) оказывается расположенной посередине русла, не прижимаясь к левому ведущему берегу. Как известно, в таких условиях движение потока является неустойчивым [4, 6]. Вследствие этого распластаный поток Лены при его значительной ширине и небольшой глубине рассредоточивается на несколько ветвей течения, разделенных кулисообразно расположенными осередками. Правая из них следует вдоль о-ва Архипка-Ключевский, левая формируется вдоль высокого коренного берега. В межень осередки обсыхают, и ветви течения превращаются в самостоятельные протоки. Распределение расходов воды по этим протокам меняется как в разные фазы режима, так и в многолетнем плане, определяясь переформированиями русла. При общей тенденции выравнивания доли расходов по протокам возле осередка в створе о-в Архипка-Ключевский — пос. Мохсоголлох в половодье со временем происходит перераспределение стока в пользу левой ветви, которая за 3 года стала забирать более половины всего расхода воды в реке. Одновременно активизировалась правобережная протока за о-вом Архипка-Ключевский. Все это привело к снижению водности правой ветви главного течения, вдоль которой проходит трасса судового хода.

Основной сток взвешенных наносов в половодье следует вдоль судовой протоки, что способствует на спаде половодья аккумуляции наносов благодаря снижению величины удельного расхода воды по длине протоки. Мутность воды в ней на спаде половодья достигала 120 мг/л, в то время как вдоль левобережной ветви за о-вом Архипка-Ключевский не превышала 70 мг/л.

Русло в целом на рассматриваемом участке достаточно стабильно благодаря его расположению вдоль левого коренного берега, сложенного трудноразмываемыми породами. Его деформации носят направленный характер, очень медленно смещаются влево при одновременном образовании правобережной поймы за счет последовательного причленения к ней островов и проявляются на протяжении столетий. На этом фоне происходит иногда временная активизация пойменных проток подобно отмеченной выше за о-вом Архипка-Ключевский. В таких условиях, соответствующих переходу от врезанного русла к широкопойменному, его текущие и периодические деформации связаны со смещением гряд разного размера. Осередки, разделяющие ветви течения потока, — наиболее типичные формы транзита песчаных наносов в русле. Вместе с побочными, прилегающими к берегам, они представляют собой подвижные, соразмерные с островами песчаные гряды, длиной от нескольких сотен метров до нескольких километров. Они имеют выраженную грядовую структуру в плане и осложняются несколькими более подвижными и более мелкими песчаными грядами. Если перемещение всего крупного песчаного массива проис-

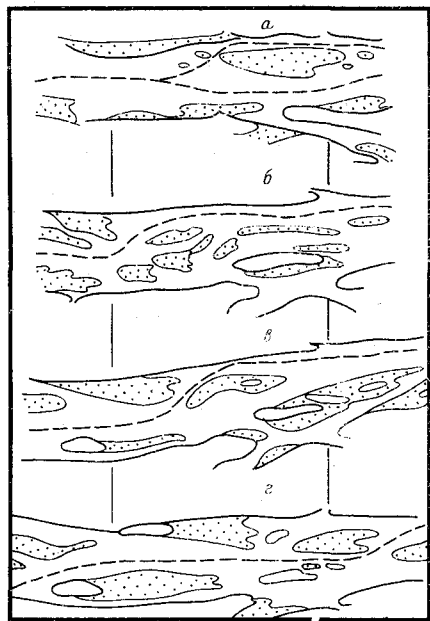


Рис. 4. Сопоставленные планы участка русла р. Лены у пос. Мохооголлох в 1929 (а), 1951 (б), 1975 (в) и 1986 г. (г)

ходит в многоводные периоды, то более мелкие гряды деформируются ежегодно, несколько изменяя этим общую конфигурацию крупных песчаных массивов. Средняя скорость смещения таких гряд в русле — до 200–300 м/год, в отдельные многоводные годы — до 600–1000 м/год.

Помимо водности года подвижность гряд зависит от размеров, конфигурации и места расположения. Высокие и массивные гряды, находясь в течение длительной зимы вне зоны воздействия потока (обсыхающие), промерзают на глубину до нескольких метров, образуя цементирующее их криогенное ядро. В летние месяцы с низкой меженью высокие отмели покрываются кустарником. Благодаря этим двум факторам ряд маловодных лет обычно сопровождается «консервацией» основных форм руслового рельефа, заметным снижением скоростей их смещения. С другой стороны, следствием этого является превращение со временем осередков в острова. Так, например, за последние 60 лет образовались острова, составляющие современные разветвления, тогда как ранее существовавшие причленились к правобережной пойме и вошли в ее состав (рис. 4).

Следующая обычно за маловодьем серия многоводных лет смещает акцент в деятельности потока: меняется направление стрежня и соответственно область максимальных размывов. Это приводит к перемещению массивных побочней и осередков. Размываются приверхи и нарастают косы в ухвостьях, происходит уничтожение растительности на их поверхности. Конфигурация и высота перемещающихся отмелей претерпевают существенные изменения.

Наиболее подвижны мелкие гряды — рифели и дюны. Их высота сильно зависит от глубины потока и места расположения, а скорость смещения

составляет десятки метров в сутки. В местах достаточного количества наносов для их формирования (обычно на периферии крупных песчаных массивов) рифели достигают высоты нескольких десятков сантиметров. Дюны — более крупные гряды, встречаются реже. Они наиболее развиты в местах аккумуляции наносов — обычно в подвальях крупных гряд. По мере удаления от мест их образования при перемещении вниз по течению они постепенно замещаются более мелкими грядами — рифелями.

Наиболее ощутимые деформации русла происходят благодаря перемещению крупных гряд — массивных побочней и осередков. Имеющиеся сопоставленные планы русла (рис. 4) показывают, что в 1929 г. их расположение было примерно таким же, как и в 1985—1987 гг.: фарватер находился вдоль правого пойменного берега в верхней половине участка и отклонялся к левому берегу в районе пос. Мохсоголлох. Следующий за этим цикл многоводных лет, продолжавшийся до 1938 г. включительно, явился одной из причин трансформации русловых форм.

План реки 1951 г. отражает русло, сформировавшееся к концу длительного маловодного периода, в течение которого обычно образуются и перемещаются гряды сравнительно малых размеров, а основные формы русла консервируются. В это время межженный поток переваливал к высокому левому берегу в центральной части и далее следовал вдоль него, оттесняя массивные песчаные гряды к о-ву Архипка-Ключевский и правобережной пойме. Такая картина практически не менялась вплоть до начала следующего многоводного периода (конец 50-х — начало 60-х годов). В этот период происходило повсеместное смещение песчаных массивов вниз по течению. При этом песчаные гряды в левобережной части русла сместились на большее расстояние, поскольку здесь сосредоточивается основной сток реки.

1967—1975 гг. (многоводный цикл) характеризуются увеличением объема и высоты левобережного побочня, что способствовало оттеснению в начале участка основного течения к правому берегу. Это привело к искривлению фарватера, огибающего побочень на подходе к левому пойменному берегу, быстрому смещению и удлинению правобережного побочня, разработке в его корневой части протоки и образованию острова (очевидно, растительность на побочне поселилась в маловодные 1969—1972 гг.). Ухвостье побочня сместилось на расстояние  $>3000$  м. Прошедшие изменения в свою очередь вызвали в нижней части участка раздвоение течения осередком, причем постепенно увеличивалась водность правобережной ветви, проходящей вдоль о-ва Архипка-Ключевский. Разделяющее эти годы маловодье предопределило образование сравнительно невысокого и небольшого острова, занявшего центральную часть осередка. Этот остров просуществовал  $\sim 10$  лет (весь маловодный период), не изменяя своего положения. Объединение возле него песчаных гряд способствовало дальнейшей разработке правосторонней ветви течения. Таким образом, были подготовлены условия для развития правобережного направления фарватера, которые смогли реализоваться в следующий цикл многоводья в конце 70-х — начале 80-х годов. При этом, как и в предыдущие подобные циклы, наибольшее смещение русловых гряд произошло в левосторонней части русла. Сформировавшийся ранее остров был размыт, а весь массив осередка сместился вниз по течению к пос. Мохсоголлох, причем ухвостье его в среднем перемещалось со скоростью 500—700 м/год. Еще более активно смещался левобережный побочень, что привело к частичному ограничению стока в левостороннюю часть русла и преимущественному развитию правобережной ветви течения, вдоль которой стал проходить судоходный фарватер. В результате произошло обмеление левобережной протоки возле осередка (подвергся заносимости расположенный здесь про-

мышленный водозабор), и оживление протоки за о-вом Архипка-Ключевский.

Наступившее в 1985 г. маловодье снизило темпы русловых деформаций. Осередок возле пос. Мохсоголлох прекратил свое смещение вниз по течению, перестали также вытягиваться косы в ухвостье левобережного побочня. Стабилизация русловых форм в маловодный период способствовала развитию истоков левобережных проток. Глубокая плесовая лошина возле высокой левобережной террасы играла при этом роль приемного бассейна, формируя перекосы водной поверхности в сторону левого берега. Это привело к постепенному развитию левобережной протоки и создало условия для перевода сюда фарватера. В дальнейшем можно ожидать постепенного отмирания правобережной ветви течения, что вызвано, с одной стороны, гидравлической невыгодностью прямолинейного направления в период маловодья, а с другой — наметившимся развитием левобережной протоки и отвлечением в нее части стока. Обе причины будут способствовать аккумуляции наносов на перекате в ухвостье осередка, что в свою очередь вызовет подпор на выпележащем отрезке и перемещение основного течения к левому берегу. Поскольку в многоводные циклы, как показано выше, преимущественное развитие получает левобережная часть русла, с наступлением очередного из них следует ожидать окончательного ее размыва вплоть до коренного ложа и сосредоточения возле левого берега большей доли расхода воды.

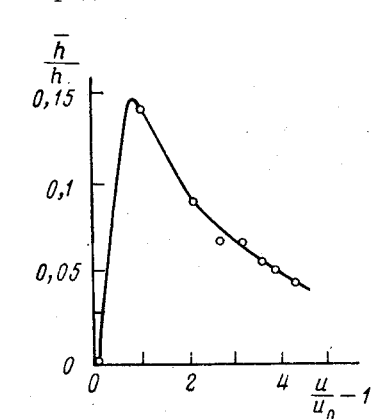


Рис. 5. Связь относительной высоты рифелей  $\bar{h}/h$  с относительной скоростью потока  $u/u_0 - 1$

Морфологические параметры донных гряд — рифелей и дюн — определяются гидравликой потока и свойствами его ложа и характеризуются большой стохастичностью. При одной и той же глубине и скорости потока изменчивость высот гряд описывается распределением Вейбулла — Гнеденко (таблица).

Существенное влияние на характер распределения длин рифелей оказывает мощность слоя песка на дне потока. В условиях дефицита влекомых наносов на скальном дне у левого берега реки гряды формируются на пятнах песка, откладывающегося в скоростной тени за выступами коренного ложа. При этом полного развития рифелей не происходит, но образуются наиболее длинные гряды, и кривая распределения оказывается усеченной. Это отражается на средних длинах рифелей, которые в пределах скального грунта на больших глубинах не больше, чем на меньших глубинах на песчаном осередке. В результате связь средних длин рифелей с гидравлическими характеристиками потока не выявляется; они составляют 3,0–3,5 м.

Дефицит влекомых наносов в меньшей степени сказывается на высоте рифелей; кривые их распределения одинаково соответствуют теоретическим на всех диапазонах глубин русла. Средняя высота рифелей в зависимости от средней скорости потока приведена на рис. 5.

Скорости смещения рифелей на спаде половодья и в межень составляют 2–3 м/ч и описываются формулой

$$C_p = 3,7 \cdot 10^{-4} \frac{u}{H},$$

где  $u$  — средняя скорость потока над рифелями,  $H$  — глубина.

Статистические характеристики рифелей в русле р. Лена (пос. Мохсоголлох)

Скорость течения, м/с	Глубина потока, м	Распределение рифелей, %, при их высоте, м								Средне-квадратичное отклонение	Коэффициенты в распределении Вейбулла — Гнеденко		Число рифелей
		0—0,09	0,10—0,19	0,20—0,29	0,30—0,39	0,40—0,49	0,50—0,59	0,60—0,69	средняя		μ	λ	
0,4—0,7	1—2	0,7 — 3,5	48,6 — 41,3	44,4 — 48,8	5,3 — 6,3	0,7 — 0,04	0,3 — —	— — —	0,208	0,067	3,6	145,3	284
0,7—0,95	2—3	0,6 — 3,0	36,1 — 30,7	45,9 — 47,6	15,0 — 17,5	2,1 — 1,1	0,3 — —	— — —	0,233	0,079	3,3	74,3	1265
0,95—1,15	3—4	1,3 — 2,9	32,6 — 29,7	48,0 — 47,3	15,4 — 18,7	2,5 — 1,3	0,2 — 0,01	— — —	0,236	0,080	3,3	62,2	1997
1,15—1,35	4—5	0,4 — 1,01	13,7 — 14,1	42,0 — 36,1	29,2 — 35,6	13,4 — 12,1	1,5 — 1,05	0,1 — 0,02	0,297	0,095	3,5	48,3	747
1,35—1,5	5—6	0,6 — 1,2	10,8 — 14,4	46,7 — 35,0	26,8 — 34,7	11,2 — 13,1	3,7 — 1,5	0,2 — 0,04	0,299	0,099	3,4	37,6	508
1,5—1,7	6—7	1,5 — 1,2	8,3 — 12,3	37,6 — 29,2	30,1 — 33,3	15,0 — 18,8	6,8 — 4,7	0,7 — 0,5	0,322	0,112	3,2	23,9	133
1,7—1,9	7—8	0,4 — 0,6	8,3 — 10,1	35,1 — 30,0	38,1 — 37,5	15,5 — 18,7	1,9 — 2,9	0,7 — 1,0	0,320	0,099	3,6	37,6	265

Примечание. В числителе — фактический повторяемость, в знаменателе — по распределению Вейбулла — Гнеденко.



Дюны формируются в русле р. Лены у пос. Мохсоголлох в подвальях крупных гряд и представляют собой редкое явление: их длина — 20—40 м, высота — 0,6—1,2 м на глубине 6—8 м. На большей части дна русла дюны отсутствуют; они возникают только в зонах повышенной вероятности формирования крупномасштабных турбулентных структур.

Размыв русла в той или иной его части и сокращение мощности аллювия сопровождается уменьшением размеров микроформ вплоть до их полного исчезновения и обнажения коренного ложа или базального галечникового горизонта.

Проведенные исследования позволили обосновать изменение трассы судового хода путем перевода ее в развивающуюся левобережную протоку. Кроме того, было установлено, что заносимость оголовков водозабора у пос. Мохсоголлох в конце 70-х — начале 80-х годов была обусловлена смещением осередка и непосредственным передвижением в районе их расположения песчаных рифелей и дюн. Происходящие переформирования русла естественным путем привели к прекращению этого процесса.

#### Список литературы

1. Беркович К. М., Борсук О. А., Гаррисон Л. М. и др. Русловой режим и регулирование русла средней и нижней Лены // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 8. М.: Изд-во МГУ, 1981. С. 125—156.
2. Геоморфологическая карта СССР. Л.: ВСЕГЕИ, 1966.
3. Зайцев А. А., Чалов Р. С. Русловые процессы и регулирование русла р. Лена в районе г. Якутска // Вод. ресурсы. 1989. № 5. С. 75—81.
4. Карасев И. Ф. Русловые процессы при переработке стока. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 161 с.
5. Лодина Р. В., Чалов Р. С. О влиянии притоков на состав наносов и деформации русла главной реки // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1971. № 4. С. 65—70.
6. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.
7. Соловьев И. А. Русловой процесс и водные пути нижнего Амура. Владивосток: Книж. изд-во, 1967. 234 с.
8. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
9. Чалов Р. С. Принципы типизации, морфология и деформация русел равнинных рек // Эрозионные и карстовые процессы на территории центра Русской равнины. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 3—27.
10. Чалов Р. С., Беркович К. М., Борсук О. А. и др. Русловой режим средней и нижней Лены. М., 1976. 185 с.— Деп. в ВИНТИ 08.06.76, № 2224-76.
11. Чернышев Ф. М. Повышение эффективности путевых работ на многорукавных участках судоходных рек. Новосибирск: НИИВТ, 1973. 328 с.
12. Чистяков Г. Е. Водные ресурсы рек Якутии. М.: Наука, 1964. 256 с.