

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.435.124:551.4.08

ПОКРОВСКО-ЯКУТСКИЙ ВОДНЫЙ УЗЕЛ НА РЕКЕ ЛЕНЕ:  
СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ  
РУСЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

© 2019 г. Р. С. Чалов\*, А. С. Завадский\*\*, Д. В. Ботавин\*\*\*,  
П. П. Головлев\*\*\*\*, Е. А. Морозова\*\*\*\*\*, В. В. Сурков\*\*\*\*\*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: rschalov@mail.ru

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

\*\*\*e-mail: dmitry\_botarin@mail.ru

\*\*\*\*e-mail: pavel\_golovlev@list.ru

\*\*\*\*\*e-mail: nam49@mail.ru

\*\*\*\*\*e-mail: vita.surkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.07.2018 г.; после доработки 01.02.2019 г.; принята в печать 19.07.2019 г.

В статье на примере Покровско-Якутского участка Средней Лены рассматриваются условия трансформации в XX в. единой системы сопряженных разветвлений в сложные по режиму деформаций и управлению русловыми процессами параллельно-рукавные разветвления. Показано, что это связано с общим увеличением водности р. Лены и оттаиванием мерзлых грунтов, слагавших мелководья и прирусловые отмели, а также с развитием рукавов, имеющих неустойчивое русло. Местные условия способствовали образованию сложного одиночного (трехрукавного) разветвления в начале расширения днища долины и русла ниже г. Покровска, сохранению прямолинейного неразветвленного русла выше по течению, русла того же типа ниже Табагинского мыса и чередующихся односторонних разветвлений в конце участка. Переформирования русла после происшедших изменений заключаются в трансгрессивном, т. е. вниз по течению, смещении пойменно-островных массивов, интенсивных размывах берегов, образовании зон аккумуляции наносов. Это привело к осложнениям в водохозяйственном и транспортном использовании реки, которые проявились в занесении водозабора, акватории порта, создании аварийной обстановки на объектах береговой инфраструктуры. Выявленные на основе многолетних исследований и гидродинамического моделирования закономерности позволили разработать комплексную схему управления русловыми процессами, реализация которой позволит снизить опасные их проявления.

**Ключевые слова:** русловые процессы, трансформация русла, параллельно-рукавные разветвления, мерзлота, деформации, размывы берегов, аккумуляция наносов, управление.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019683-96>

ВВЕДЕНИЕ

Покровско-Якутский водный узел — наиболее сложный в отношении русловых процессов и возможностей управления ими участок р. Лены протяженностью около 140 км. Он располагается в пределах наиболее населенного и экономически развитого района Республики Саха (Якутия): здесь находится столица — г. Якутск, г. Покровск, горнодобывающие предприятия в п. Мохсоголоох (цементный завод), п. Кангалассы (угольный разрез), п. Жатай (судоремонтно-судостроительный завод — СРСЗ), много населенных пунктов. Сама река — важнейшая транспортная магистраль Сибири.

Интенсивные деформации русла, размывы берегов, подвижные отмели создают сложную обстановку для функционирования транспортной, хозяйственной и коммунальной инфраструктуры. На это накладываются происходящие в XX в. изменения морфодинамического типа русла [16], которые затрудняют прогнозирование русловых деформаций и возможности управления русловыми процессами. Чрезвычайная ситуация сложилась в последние 15–20 лет в Якутском узле из-за обмеления водозабора, подходов к порту и Жатайскому СРСЗ, размывов правого берега, создавших угрозу разрушения участка магистральной автодороги, осложнения эксплуатации

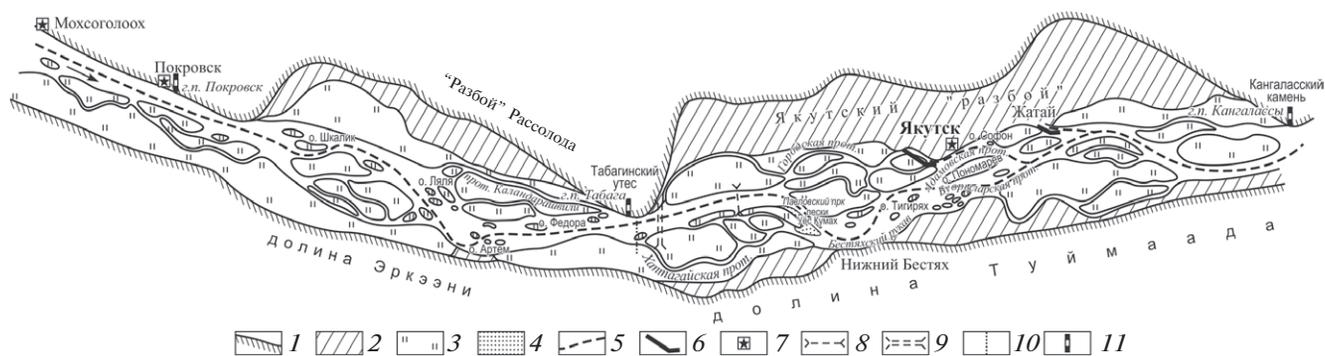


Рис. 1. Схема Покровско-Якутского водного узла на р. Лене.

1 – коренные борта долины; 2 – высокая пойма и низкая терраса; 3 – пойма; 4 – прирусловые отмели; 5 – судовой ход; 6 – дамбы, ограждающие акватории порта Якутск и Жатайского СРСЗ; 7 – водозаборы; 8 – переход газопровода; 9 – проектируемый мост; 10 – ЛЭП; 11 – гидрологические посты.

водного пути. В отношении последнего сложная ситуация сложилась также в Покровском узле, включая «разбой»<sup>1</sup> Рассолода.

Все это обусловило необходимость проведения специальных исследований русловых процессов, обоснования методов их регулирования для нормализации обстановки. Исследования были выполнены в 2015–2017 гг. Они стали продолжением работ, начатых еще в 1972 г. и неоднократно повторяющихся в последующие 45 лет по мере развития неблагоприятных переформирований русла. В начале 1980-х годов было высказано предположение о возможности возникновения опасной ситуации [13], которая затем неоднократно уточнялась по мере получения новых данных [4, 8, 16–18]. Однако принимаемые меры носили ведомственный характер и не могли изменить складывающуюся обстановку.

Меньше внимания уделялось Покровскому узлу («разбой» Покровский и Рассолода), где исследования 1972 и в 1990-е годы были связаны с проблемами судоходства и обмелением водозабора в п. Мохосоголоох [7]. Было установлено, что переформирования русла здесь сопряжены с развитием Якутского водного узла, и проблема управления русловыми процессами должна решаться комплексно.

*Настоящая статья* посвящена анализу происшедших за последние десятилетия естественных переформирований русла, современным русловым деформациям, их прогнозной оценке и подходам к управлению процессами при решении воднотранспортных и водохозяйственных задач на основе закономерностей руслового режима.

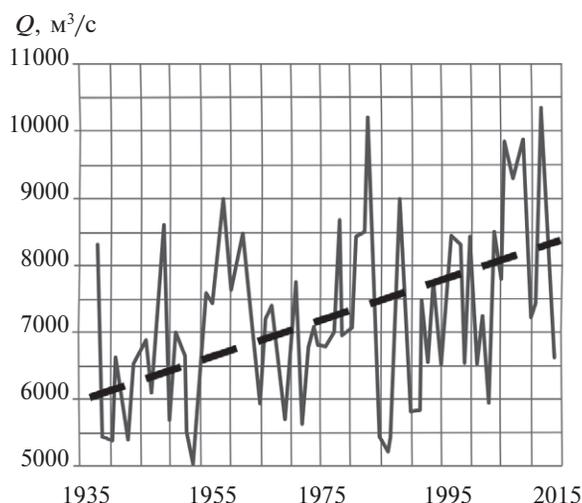
<sup>1</sup> «Разбой» – местное (на р. Лене) название участков реки со сложноразветвленным руслом.

### ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЛА

Начало Покровско-Якутского водного узла совпадает с выходом р. Лены в пределы Центрально-Якутской низменности; врезанное русло сменяется широкопойменным, ограниченные условия развития русловых деформаций – свободными (рис. 1). От п. Мохосоголоох до г. Покровска русло располагается вдоль уступа Покровской террасы высотой 60–80 м с цоколем, сложенным кембрийскими известняками, перекрытыми аллювиальными галечниками и песками, и имеет по правому берегу узкую пойму. Ниже г. Покровска пойма становится двусторонней. Табагинский утес и замыкающий участок Кангаласский камень образуют сужающие долину высокие (100 и около 120 м соответственно) мысы Приленского плато, сложенные устойчивыми к размыву песчаниками, глинами, алевролитами, конгломератами с пластами бурых углей.

Между г. Покровском и Табагинским мысом, Табагой и Кангаласским камнем располагаются расширения долины, в которых пойма, в основном двусторонняя, с преобладанием левобережной; лишь в центральных частях река подмывает по правобережью уступ низкой песчаной первой надпойменной террасы и 40-метровый обрыв песчаной Бестяхской террасы.

На русловые деформации существенное влияние оказывает мерзлота [3, 11]. Мерзлотой в 1970-х годах были сцементированы большинство прирусловых отмелей (побочней, осередков) и мелководья. Мерзлые грунты располагались на глубине до 1–1.5 м от меженного уровня при толщине талого слоя 1–2 м. На обсыхающих в межень отмелях они обнаруживались на отметках +1.8 м от проектного уровня, в подводных частях отмелей кровля мерзлоты колебалась



**Рис. 2.** Изменение среднегодовых расходов воды на р. Лене (г.п. Табага) с 1935 по 2015 гг.

от 0 до 3.5 м, ограничивая смещение в русле крупных песчаных гряд. Мерзлота широко распространена в маловодных рукавах, которые зимой промерзают до дна и сток в них прекращается.

Буровые работы на побочнях и осередках основного русла в 2016–2017 гг., т. е. через 45 лет (с начала 1970-х годов), показали слабое распространение мерзлоты в русле. Основная причина – тепляющее воздействие потока, происходящее в результате увеличения теплового стока реки. Д.В. Магрицкий [9] оценил его для конца XX–начала XXI в. в 11.3% при увеличении продолжительности периода с температурой 0.2°C на 8 сут. Температура воды в половодье повысилась с 1930 г. в среднем на 2°C [6]. По-видимому, теплового и механического воздействия потока с расходом 20–45 тыс. м³/с и температурой от 4–8°C в мае до 15–17°C в июле достаточно для разрушения за 3–4 недели мерзлого слоя и образования в основном русле сплошного талика. С начала 1980-х годов идет рост средней температуры вечной мерзлоты в районе г. Якутска

на 1°C и увеличение мощности деятельного слоя [6]. При этом средние температуры воздуха с 1930-х годов повысились на 2°C, заметно – после 1980 г. (на 1.2°C). Это соответствует тренду температуры воздуха в Центральной Якутии среднегодовой > 0.6°/10 лет, в январе > 1°/10 лет, в июле > 0.4°/10 лет [5].

Изменения в состоянии мерзлоты в русле р. Лены отмечены многими исследователями [6, 22–25], обратившими внимание на активизацию термоэрозионного воздействия потока на берега реки, острова и отмели.

В районе г. Якутска (гидропост Табага) среднегодовой расход воды р. Лены равен 7230 м³/с, объем годового стока – 228 км³. Для водного режима характерна низкая зимняя межень (10% стока), весенне-летнее половодье (доля талого стока – 41%) и повышенная летне-осенняя межень, прерываемая дождевыми паводками (49%). Их водность сопоставима с половодьем, в отдельные годы превышает его. Средний максимальный расход воды в половодье – 36 500 м³/с, наивысший – 50 900 м³/с, низший – 20 900 м³/с, во время осенних паводков соответственно – 20 100, 38 500 и 6 530 м³/с.

Режим уровней воды характеризуется высокими резкими подъемами в весенний период при прохождении волны половодья, или является следствием ледовых заторов, образующих в 75% случаев их максимальные значения и наводнения в населенных пунктах. В пределах Покровско-Якутского участка находятся три гидрологических поста, из которых два (Табага и Кангалассы) расположены в сужениях долины, один (Якутск) в центре расширения – долине Туймаада. Это определяет различия в величинах подъема уровней и амплитуду их колебаний (табл. 1) по длине участка.

Среднегодовая водность р. Лены по г.п. Табага изменялась за последние 75 лет в диапазоне от 5180 до 10 300 м³/с. Отмечается рост среднегодовых расходов воды (рис. 2). Отмечено увеличение стока с 1985 г. на Нижней Лене во все

**Таблица 1.** Характеристика максимальных и минимальных летних уровней воды

Гидропост	Характеристика уровня	Максимальный летний уровень		Минимальный летний уровень		Годовая амплитуда
		$H_{\text{макс}}$	Дата	$H_{\text{мин}}$	Дата	
Табага	Средний	883	–	203	–	8.8
	Высший	1239	20.05.2010	367	10.10.1983	11.6
	Низший	654	12.06.1948	64	24.08.1985	6.7
Якутск	Средний	668	–	80	–	9.3
	Высший	917	22.05.2001	58	12.08.1949	12.7
	Низший	434	12.06.1948	229	24–25.08.1985	6.6
Кангалассы	Средний	925	–	171	–	9.2
	Высший	1337	22.05.2001	300	21–22.08.1997	13.3
	Низший	630	19.05.1939	37	26.08.1985	6.2

сезоны и в целом за год на  $43 \text{ км}^3$ , из которых 43% приходится на увеличение водности по г.п. Табага, остальное – на притоки [9]. Одной из причин этого называется деградация мерзлоты в русле [6, 25].

Ледовый режим характеризуется устойчивым ледоставом от 210 до 247 суток. Максимальная толщина льда (220 см) отмечена в 1958 г. на г.п. Табага при средней величине 147 см. Образование заторов практически ежегодно происходит в Покровском разветвлении, в начале “разбоя” Рассолода, в сужении русла у Табагинского утеса, в начале Якутского “разбоя”, на изгибе основного русла ниже п. Жатая и у Кангаласского камня.

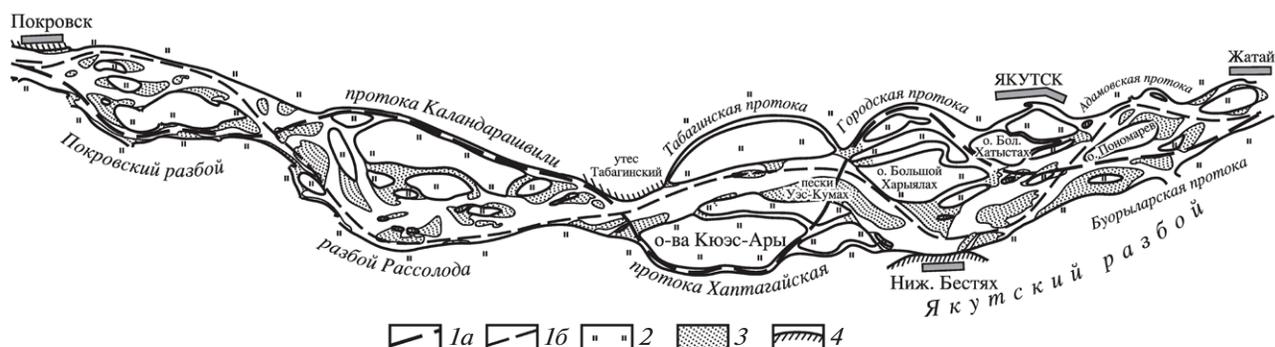
Сток взвешенных наносов по г.п. Табага равен 8.99 млн т в год, из которых 1.87 млн т приходится на меженный период и 8.99 млн т на половодье и паводки. Сток влекомых наносов рассчитан по методике Н.И. Алексеевского [1], основанной на данных о размерах и скоростях смещения гряд: его среднегодовая величина – 5.43 млн т, из них в межень – 0.85 млн т, в половодье и паводки – 4.58 млн т, что составляет 37.6% от общего стока наносов [19]. Натурные измерения параметров гряд-микроформ (гряды типа Г и Д, по Н.И. Алексеевскому) и наблюдения за их смещением во время паводка 31 июля–10 августа 2016 г. позволили определить расход влекомых наносов в 12.6 т/сут., что в 1.6 раза больше, чем в межень (7.65 т/сут.).

### ВРЕМЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РУСЛА

Табагинский утес разделяет участок русла на две части. Еще в XIX–начале XX в. оно представляло собой единую систему разветвлений (рис. 3), и створ мыса играл роль узла сопряжения рукавов разветвлений Рассолода и Табагинского. Лишь в начале участка оно было прямолинейным, с небольшими прибрежными островами [14]. Система состояла

из пяти звеньев, в каждом из которых развивались рукава, проходящие по отношению к современным, у противоположных берегов. Ныне это – маловодные пойменные протоки, пересыхающие летом и перемерзающие зимой (Каландарашвили, Хаптагайская, Городская и др.). Перераспределение стока между основными рукавами во всех звеньях системы и развития вторых основных рукавов началось еще в XIX в. и растянулось на длительный период, сопровождаясь трансформацией одного морфодинамического типа русла в другой. Последнее изменение произошло в Якутском “разбое”, в котором еще в 1920–1930-е годы левый рукав – Городская протока и правый Бестяхский были равноценными по водности и в обоих проходил судовой ход (рис. 4а). В настоящее время водность Городской протоки только в половодье может превышать 15%, а в летнюю межень колеблется от 1–2 до 7–8% в зависимости от водности года и расположения побочной перед заходом в нее. В зимнюю межень перемерзает, сток в ней прекращается (для определения зимнего режима в марте 2018 г. была выполнена георадарная съемка). Вероятно, более полувекковая продолжительность перераспределения стока между основными рукавами (обычно на реках с неустойчивым руслом, каковой является Лена, это происходит за нескольких лет [14]) связана с широким распространением в тот период в русле мерзлоты [4, 10, 11]. Для развития того или иного рукава нужно время для их протаивания, смещения ранее промерзших отмелей и выноса из них наносов.

Обмеление бывших основными рукавов по всей системе сопряженных разветвлений сопровождалась их превращением в пойменные протоки. Однако полного их отмирания не происходило, так как по ним во время заторов сосредотачиваются потоки половодья, обходящие ледовые плотины. Практически все активно функционирующие пойменные ответвления на участке нахо-



**Рис. 3.** Сопряженные разветвления р. Лены от г. Покровска до п. Жатая, существовавшие в XIX–начале XX в. 1 – оси основных рукавов сопряженных разветвлений (а, б); 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – коренные берега.

дятся выше мест регулярного заторообразования.

Исключения представляет разветвление русла о. Пономаревым в Якутском “разбое”, сохранившееся при всех трансформациях русла. В нем к началу 1970-х годов бóльшая часть расхода воды сосредоточилась в левом рукаве – Адамовской протоке (до 70%), водность бывшей судоходной до 1940–1950-х годов правой Буорыларской протоке составляла около 30% (табл. 2). Ниже по течению либо происходит смена морфодинамического типа русла, либо вновь возрастают параметры разветвлений [12]. Подобная закономерность отчетливо проявляется на Лене: значения  $r_{\text{рук}}$  и  $L_{\text{разв}}$  составляли последовательно 14,5 и 18, 11 и 23, 8 и 15, 5 и 16, 4,5 и 10 км (у о. Пономарева), после чего

сопряженные разветвления сменялись чередующимися односторонними с  $r_{\text{рук}}$  и  $L_{\text{разв}}$  соответственно 6 и 13, 7 и 14 км [4].

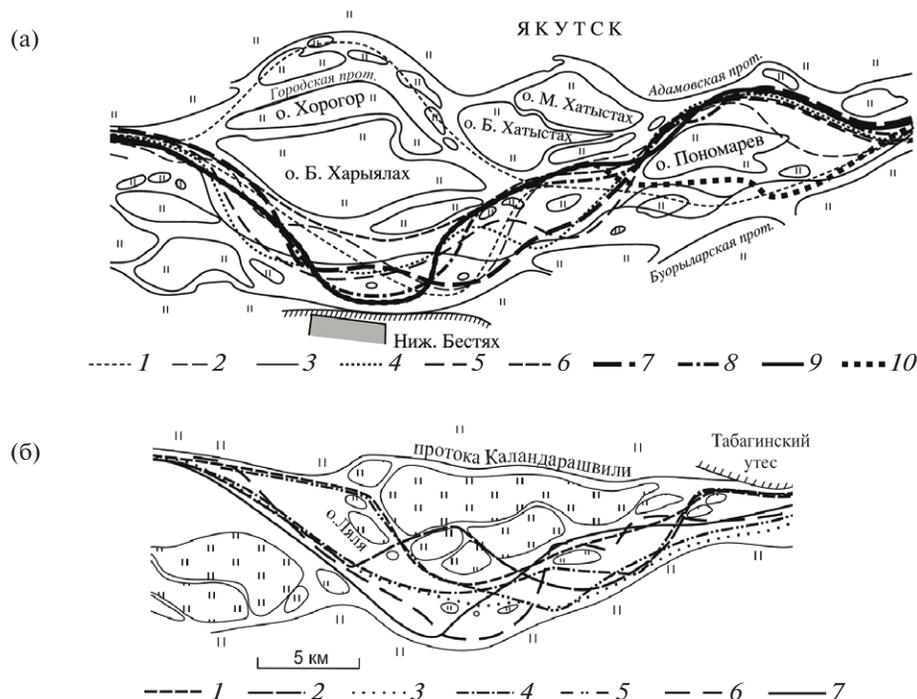
Также не произошло полного превращения в пойменное ответвление правого, бывшего основным, рукава в Покровском “разбое”. Его относительная водность сохраняется около 20% от среднегодового расхода воды в реке. В левом рукаве образовалось сложное одиночное трехрукавное разветвление, распределение расходов в котором меняется в зависимости от фазы водного режима, чередования лет с повышенной и пониженной водностью, смещения отмелей и пр.

Таким образом, переформирование сопряженных разветвлений на Покровско-Якутском участке р. Лены в XX в. заключалось не

**Таблица 2.** Изменение относительной водности рукавов в межень в разветвлении русла о. Пономаревым (Якутский “разбой”) в 1964–2018 гг.

Рукав (протока)		Годы				
		1964*	1972	1989	2002	2011–2018
Левый (Адамовская)	Половодье	–	–	50	58	48
	Межень	55	70	–	–	45
Правый (Буорыларская)	Половодье	–	–	50	42	52
	Межень	45	30	–	–	55

\*1964 г. – по данным Новосибирского отделения института “Гипроречтранс”, остальные годы – по измерениям экспедиции МГУ им. М.В. Ломоносова.

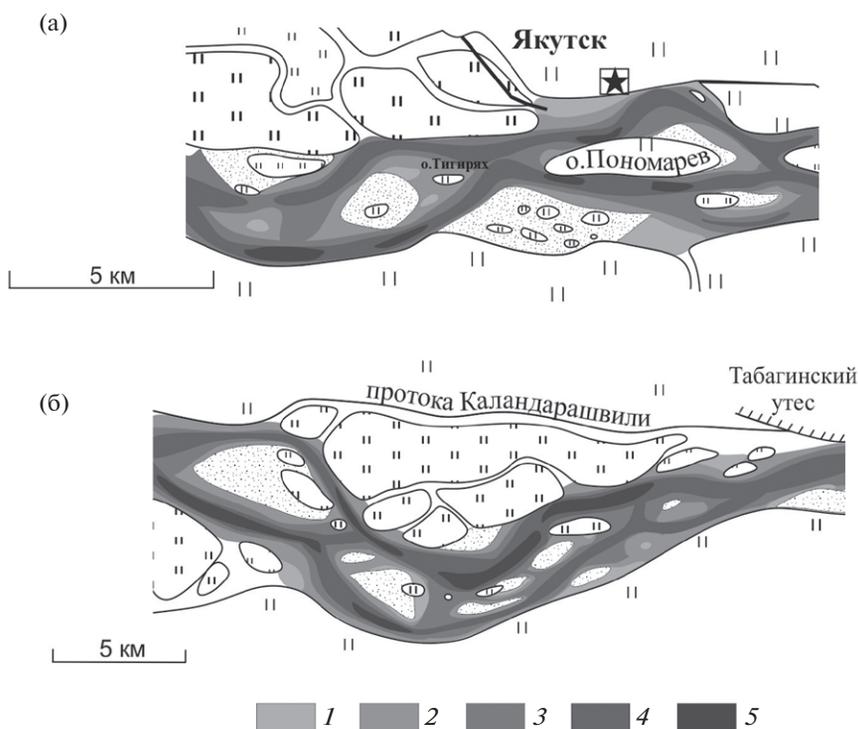


**Рис. 4.** Изменения положения судового хода в разветвлениях Якутском (а: 1 – 1929 г.; 2 – 1947 г.; 3 – 1958 г.; 4 – 1963 г.; 5 – 1972 г.; 6 – 1982 г.; 7 – 1989 г.; 8 – 1999 г.; 9 – 2010 г.; 10 – 2015 г.) и Рассолода (б: 1 – 1934 г.; 2 – 1951 г.; 3 – 1972 г.; 4 – 1982 г.; 5 – 2000 г.; 6 – 2010 г.; 7 – 2017 г.).

в периодическом изменении относительной водности и развитости рукавов, а в сосредоточении стока в каждом звене системы в одном из них и превращении в пойменные протоки бывших судходных (кроме разветвления о. Пономаревым) рукавов. Единая система сопряженных разветвлений трансформировалась: (1) в правых рукавах разбоев Рассолода и Якутский (Бестяхский) рукав и разветвление о. Пономаревым), возникли более сложные по морфологии и режиму деформаций параллельно-рукавные разветвления; (2) Покровский “разбой” превратился в сложное по режиму трехрукавное одиночное разветвление; (3) между Табагинским утесом и Якутским “разбоем” сформировалось прямолинейное неразветвленное русло. По-видимому, образование параллельно-рукавных и сложного трехрукавного одиночного разветвлений связано с отмеченным выше общим увеличением стока р. Лены [15], исчезновением в русле мерзлоты из-за повышения теплового стока и с низкой устойчивостью русел рукавов, в которые переместился основной поток. Левый рукав в Покровском разбое, правый в разбое Рассолода, Бестяхский правый рукав и рукава у о. Пономарева в Якутском “разбое” характеризуются значениями показателей устойчивости русла (“число Лохтина” —  $L$ , “коэффициент стабильности” Н.И. Маккавеева —  $K_c$ , “морфометрический показатель” Н.И. Маккавеева—С.Г. Шатаевой —  $A$ ), соответствующими не-

устойчивому руслу ( $L < 9.5$ ,  $K_c < 5$ ,  $A < 1.4$ ) [4] при их ширине в 1.5–2 раза большей, чем на смежных участках с другими типами русла. Увеличение водности при одновременном сокращении мерзлоты в русле, очевидно, способствовало росту стока наносов и подвижности гряд в русле, т. е. общей его дестабилизации. Произошла также активизация размывов берегов: будучи сложенными мерзлыми грунтами они отступали со скоростью до 7–10 м/год, после их оттаивания — до 30–40 м/год.

Сосредоточение стока в правом Бестяхском рукаве Якутского “разбоя” произошло к 1950-м годам. Однако образование в нем двух ветвей течения, разделенных образовавшимися островами (существовавшим ранее о. Тигрях и обсыхающими в межень отмелями), и включение в единую параллельно-рукавную систему разветвления о. Пономаревым произошло лишь в конце XX—первые годы XXI в. Почти полувековой этап ее формирования (современное скоростное поле потока в Якутском разбое показано на рис. 5а) связан с широким распространением мерзлых грунтов, слагающих побочни, осередки и мелководья в Бестяхском рукаве, между которыми, благодаря росту кос при частичном оттаивании мерзлоты в теплое время года, стрелевая зона потока и фарватер постоянно меняли свое положение (рис. 4а). В это время большой побочень с мерзлым ядром отклонял поток от уступа Бестяхской террасы, предохраняя его от



**Рис. 5.** Скоростное поле потока в параллельно-рукавных разветвлениях Якутском (а — по измерениям 2017 г.) и Рассолода (б — по измерениям 2018 г.). Скорости течения: 1 — 0.1–0.4; 2 — 0.4–0.7; 3 — 0.7–1.0; 4 — 1.0–1.3; 5 — 1.3–1.6.

размыва. По этой же причине фарватер был извилистым и под влиянием отмелей и вогнутости правого берега направлялся в левый рукав у о. Пономарева – в Адамовскую протоку. По мере оттаивания мерзлоты в русле произошло отторжение побочня и образование в широком русле двухпотоковой системы течений. Правая ее ветвь расположилась вдоль уступа коренного берега, вызывая его размыв и угрожая разрушением поселка и автомобильной магистрали, и затем направилась в Бурыларскую протоку – правый рукав у о. Пономарева. Левая ветвь проходит вдоль островов между Бестяхской и Городской, теперь пойменной, протоками и затем устремляется в Адамовскую протоку – левый рукав у о. Пономарева. Распределение расходов воды между ветвями течения равноценное, с небольшим преобладанием водности в правой ветви (табл. 3).

Аналогичная трансформация произошла в разбое Рассолода. Здесь сосредоточение основного стока реки в правом рукаве с неустойчивым руслом, подпор от сужения днища долины и русла и регулярно возникающих в створе Табагинского мыса заторов льда обусловили формирование параллельно-рукавного разветвления (рис. 5б) с относительно близким распределением расходов воды по ветвям течения, разделенными небольшими островами и осередками. Окончательное оформление разветвления этого типа растянулось также более чем на 50 лет и сопровождалось постоянными изменениями фарватера (рис. 4б), что создавало серьезные затруднения для эксплуатации водного пути.

Сужение днища долины и русла у Табагинского мыса обуславливает подпор потока в половодье выше по течению и местное увели-

чение уклонов из-за растекания потока по широкой пойме и протокам ниже сужения: разница в подъеме уровней на г.п. Табага и г.п. Якутск составляет около 2 м; соответственно добавочное падение достигает 5 см/км. Следствием этого является формирование глубокого прямолинейного русла, продукты размыва которого и транзитные наносы выносятся вниз по течению в пределы Якутского “разбоя”. Кроме того, перераспределение стока в “разбое” Рассолода в правый рукав и рост кос привели к ослаблению воздействия мыса на поток. Если в XIX в., проходя по протоке Каландарашвили, он мысом направлялся в правый рукав Покровского “разбоя”, то теперь занимает нейтральное по отношению к нему положение, касаясь его в створе сужения. Направляющее воздействие мыса проявляется во время высоких половодий и паводков, когда в русло сливаются воды с левобережной поймы, из протоки Каландарашвили и с пойменно-островного массива.

Подпор потока выше Табагинского мыса – одна из причин формирования параллельно-рукавного русла в “разбое” Рассолода. В то же время подпор выше Кангаласского мыса сказывается только в режиме переката, не проявляясь в морфологии русла.

Существование трехрукавного одиночного разветвления (Покровский “разбой”), по-видимому, можно связать с меньшим расширением днища долины (соответственно, меньшей выраженностью кривой спада уровней) и переходом от врезанного, относительно суженного русла к широкопойменному, вследствие чего снижается транспортирующая способность потока, формируются осередки, острова, перекаты.

**Таблица 3.** Распределение расходов воды в параллельно-рукавных разветвлениях Рассолода и Якутском (по измерениям 2016–2017 гг.)

Дата измерения (уровень по г.п. Табага)	Створ, от устья (по судовому ходу), км	Рукав (протока)		Расход воды	
				м <sup>3</sup> /с	%
<b>“Разбой” Рассолода</b>					
12.08.2017 (91.03)	1694	Левый (у о. Артема)		4816	64
		Правый (у о. Артема)		2843	38
13.08.2017 (91.02)	1686	Левый (у о. Федора)		5500	72
		Правый (у о. Федора)		1970	26
<b>Якутский “разбой”</b>					
30.07.2017 (87.68)	1640	Городская		1239	8
	1648	Бестяхский	левая	6673	42
			центральная	1094	7
			правая	6712	43
	1645	Левый (у о. Тигерях) Правый (у о. Тигерях)		7568 6908	48 44
1637	Левый (Адамовская) Правый (Буорыларская)		7612 8090	48 52	

Таким образом, трансформация сопряженных разветвлений в Покровско-Якутском водном узле с конца XIX в. привела к чередованию участков русла с различными морфодинамическими типами, из которой первый и последний сохранились практически неизменными: 1) прямолинейные неразветвленные русла (п. Мохсоголоох – г. Покровск); 2) сложное трехрукавное одиночное разветвление – Покровский “разбой”; 3) параллельно-рукавное разветвление – “разбой” Рассолода; 4) прямолинейное неразветвленное русло (Табагинский мыс – заход в Городскую протоку); 5) параллельно-рукавное разветвление – Якутский “разбой” (Бестяхский рукав и разветвление о. Пономаревым); 6) чередующиеся односторонние разветвления (п. Жатай – Кангаласский камень).

### СОВРЕМЕННЫЕ РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

Все деформации русла в пределах Покровско-Якутского узла сопровождаются: 1) интенсивными размывами берегов, являющихся мощным источником поступления наносов; 2) трансгрессивными смещениями пойменно-островных массивов – размывами их оголовков и формированием обширных отмелей и кос в ухвостях; 3) формированием и отторжением побочней, образованием и зарастанием осередков, их смещением вдоль русла; 4) развитием плесовых ложин вдоль подмываемых берегов.

От п. Мохсоголоох до г. Покровска наличие левого коренного трудноразмываемого берега определяет динамическую устойчивость прямолинейного русла. На этом фоне происходит смещение побочней, осередков, кос со скоростями до 500–700 м/год, особенно в многоводные годы, вследствие чего постоянно меняется положение стрежневых зон потока, периодически заносятся водозаборы и причалы. Большая ширина русла (2–3 км) обуславливает формирование двух ветвей течения в лево- и правобережной частях русла. Однако высокая подвижность разделяющих их осередков и образующихся возле берегов побочней не позволяет им закрепиться растительностью, способствует образованию поперечных протоков и изменению водности обеих ветвей.

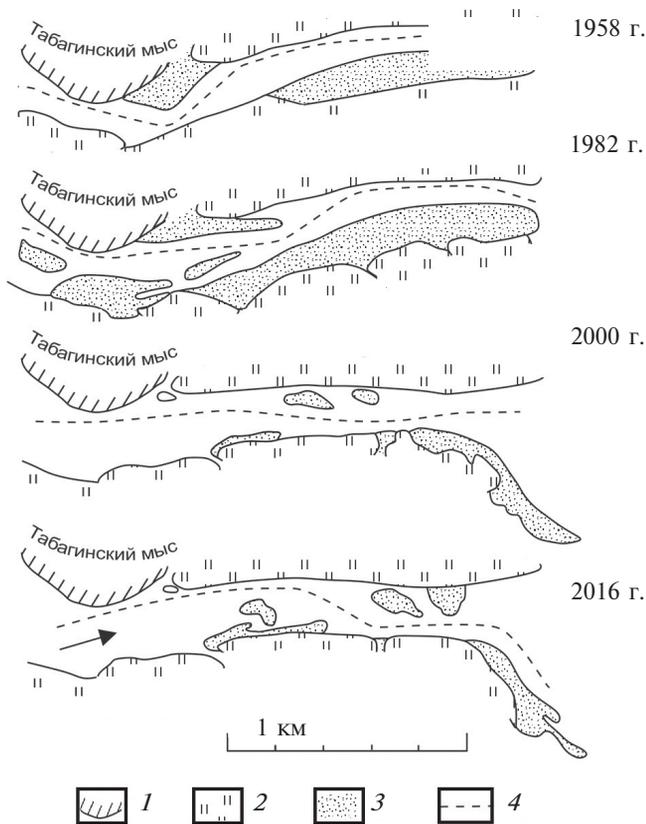
Покровский “разбой” расположен в начале “долины” Эркээни, за плечом левого коренного берега, заполняя почти двукратное расширение русла. Развитие рукавов в нем зависит от смещения осередков и побочней с вышерасположенного прямолинейного участка русла. Кроме того, за плечом берега периодически формируется побочень, перекрывающий заход в левый рукав и способствующий увеличению водности правых рукавов. В настоящее время, как и до 1960 г.,

судоходным является правый рукав. Однако его водность составляет всего около 35%. Левый рукав забирает 32% общего расхода воды, но на заходе в него находится пережат с левобережным побочнем (в 1972 г. он был судоходным, водность его составляла 62%, в 1999 г. – 38%). Центральный рукав сейчас маловодный, но в отдельные годы в него уходило до 30% расхода воды. Одновременно происходят размывы островов и береговой поймы. За 18 лет оголовков о. Шкалик отступил на 750 м, правый берег – на 600 м, левый пойменный – на 300 м.

В “разбое” Рассолода поток делится на две ветви – левую, проходящую вдоль пойменно-островного массива, и правую, тяготеющую к береговой высокой пойме. Обе ветви разделены цепочкой молодых островов и подвижных отмелей, образуя параллельно-рукавное разветвление. По поперечным протокам среди них осуществляется постоянная гидравлическая связь между обеими ветвями течения параллельно-рукавного разветвления. На рис. 4б показано изменение положения фарватера на протяжении второй половины XX–начале XXI в. Поток вызывает трансгрессивное смещение частей островов, выдвигание кос, рост кривизны изгиба русла и становится причиной развития спрямляющей его протоки между о. Ляля и остальной частью левобережного островного массива. Это привело к смещению вверх узла разделения потока в разбое и периодическому изменению водности рукавов у о. Ляля. В то же время ниже по течению в правой ветви потока сформировался крупный побочень, обсыхающий при низких уровнях.

В нижней части “разбоя” Рассолода смещение отмелей и размывы берегов обуславливают подход потока к Табагинскому ложу под разными углами. Мыс оказывает на поток неодинаковое направляющее воздействие, определяя развитие русла ниже по течению. На это накладывается подпор от сужения во время половодья и высокой межени: по данным измерений скоростного поля потока (2017 г.) в стрежневой зоне скорость меньше, чем в разветвлении выше по течению.

Надвигание на сужение русла Табагинским мысом отмелей было отмечено еще Г.Е. Чистяковым [20, 21], обнаружившим периодическое смещение кривой расходов воды  $Q = f(H)$  на г.п. Табага вверх и при последующем размыве – вниз. Образующиеся наносы формируют ниже мыса побочень пережата, который, смешаясь со временем вниз по течению со скоростью до 300 м/год, перекрывает заход в Городскую протоку (рис. 6). При увеличении водности правой ветви течения выше мыса вогнутость размываемого (2–3 м/год) пойменного берега направляет поток к мысу. Наоборот, большая водность



**Рис. 6.** Смещение побочней перекатов в прямолинейном русле ниже Табагинского утеса.  
 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – судовой ход.

левой ветви течения способствует нейтрализации направляющего воздействия мыса, побочень ниже его не формируется. Усиливается размыв левого пойменного берега (средняя скорость 4–5 м/год), создавая аварийную ситуацию на переходе газопровода через Лену, место заглубления которого от берега сократилось до 50 м.

Одновременно происходит аккумуляция наносов у противоположного берега, рост песков Уёс-Кумах, их смещение вниз по течению и зарастание, тогда как вдоль левого пойменного берега формируется плесовая ложина.

Деформации русла в Якутском “разбое” детально освещены в литературе [2, 4, 8, 13, 16, 18, 19]. Поэтому здесь обратим внимание на следующие обстоятельства. Отмеченный рост и смещение песков Уёс-Кумах способствуют интенсивному размыву оголовка пойменно-островного массива между Городской протокой и Бестяхским рукавом, в котором сформировались две ветви течения, составившие параллельно-рукавное разветвление. При средней скорости размыва (9–18 м/год) и удлинении ухвостья песков Уёс-Кумах на десятки-сотни метров в год это приводит к искривлению русла на перевале потока от левого пойменного берега к правому коренному,

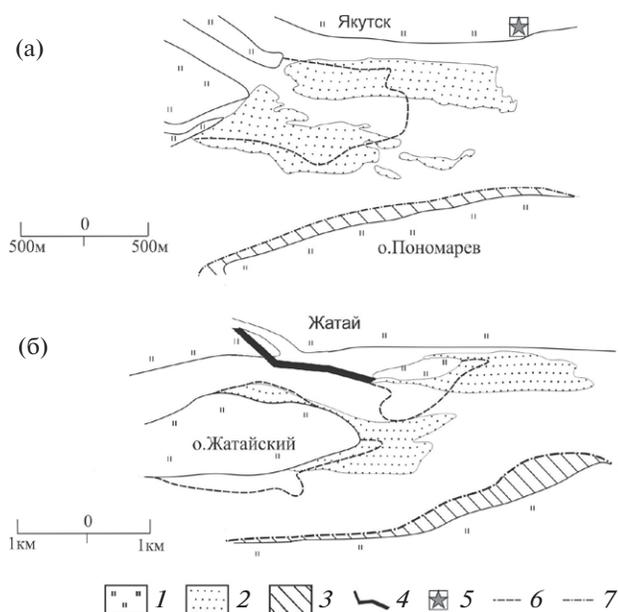
где образовалась крутая вынужденная излучина. Так как степень развитости излучины  $l/L$  ( $l$  – ее длина,  $L$  – шаг) составила к 2010 г. 1.75, что превышает критическое значение (1.6) [12, 14], в массивном побочне Павловского переката на заходе в Бестяхский рукав стал развиваться спрямляющий побочневый проток. Это может привести к его частичному отторжению и смещению узла разветвления русла в рукаве вверх по течению (подобно тому, что произошло в “разбое” Рассолода при развитии рукава за о. Ляля). Смещение песков Уёс-Кумах и кос в их ухвостьях привело к возникновению длинной и глубокой затонской части переката. При экстремально высоком половодье (паводке) из-за большого перепада уровней между ней и потоком может произойти их отторжение.

В правой ветви Бестяхского рукава произошло отторжение правобережного побочня, что, вместе с увеличением его водности, явилось причиной размывов правого песчаного берега, надпойменной террасы и высокой поймы. Было разрушено много жилых домов в п. Нижний Бестях, под угрозой оказалась федеральная автодорога.

Размывы левого берега ниже Табагинского мыса и оголовков островной системы ниже захода в Городскую протоку приводят к поступлению в реку огромного количества наносов (более 3 млн м<sup>3</sup> в год). Они аккумулируются и на левобережном побочне Павловского переката, но в основном вместе с продуктами размыва – в верхней части Адамовской протоки, вызывая образование в ухвостье пойменно-островного массива вытянутой вдоль нее отмели (рис. 7а).

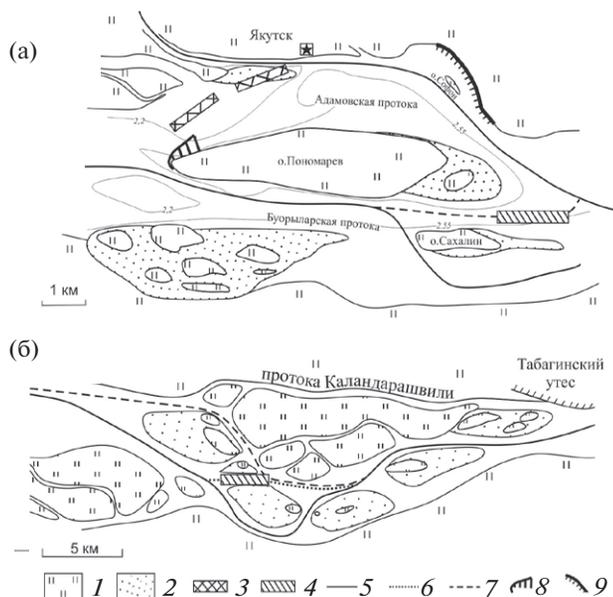
За 15 лет (2001–2016 гг.) ее объем составил 15 700 тыс. м<sup>3</sup>, что соответствует аккумуляции наносов более 1 млн м<sup>3</sup> в год. При этом ухвостье отмели удлинялось со скоростями от 35 до 260 м/год, выдвинувшись в Адамовскую протоку почти на половину ее длины, перекрыв городскую водозабор и удлинив подходной канал к порту Якутск. Одновременно происходили размыв оголовка о. Пономарева (9–20 м/год), рост косы в его ухвостье, развитие плесовой ложины в правой части Адамовской протоки вдоль острова и активизация размывов левого берега в ее нижней части, где был практически смыт прибрежный о. Софон. При этом водность протоки сократилась до 45% (в 1972 г. – 70%), причем 8% поступает из впадающей в нее Хатыстахской пойменной протоки.

Перераспределение стока по рукавам в разветвлении русла о. Пономаревым вызвало размыв и образование плесовой ложины в Буорьларской протоке, в которую в 2016 г. была переведена трасса судовой хода. Ниже слияния Адамовской и Буорьларской проток поток прижимается



**Рис. 7.** Развитие прирусловых отмелей и размывы берегов в верхней части Адамовской протоки (а) и в районе п. Жатай.

1 – пойма; 2 – прирусловые отмели (2017–2018 гг.); 3 – размываемая часть берега (2002–2017 гг.); 4 – дамба, ограждающая затон Жатайского СРСЗ; 5 – водозабор; контуры отмели (б) и берега (7) в 2002 г.



**Рис. 8.** Рекомендуемые мероприятия по нормализации водохозяйственной и водотранспортной обстановки: а) в Якутском водном узле, б) в разветвлении Рассолода.

1 – пойма; 2 – прирусловые отмели; 3 – прорези в русле для подачи воды к водозабору; 4 – дноуглубительные прорезы по трассе судового хода. Положения судового хода: 5 – современное (2017–2018 гг.); 6 – промежуточное; 7 – перспективное. Сооружения: 8 – для стабилизации захода в Адамовскую протоку и направления потока к водозабору; 9 – берегоукрепления.

к правому пойменно-островному массиву: с 1962 по 2016 гг. правый берег против п. Жатай отступил на 1200 м (24–25 м/год). В левобережной части русла возникла обширная область аккумуляции наносов – сместившаяся по ухвосту за тот же срок более чем на 3 км (рис. 7б). Соответственно удлинились и стали затруднительными подходы к Жатайскому СРСЗ, и для их нормализации потребовалось строительство ограждающей дамбы.

Ниже п. Жатай сохранилась тенденция смещения пойменно-островных массивов вниз по течению. Однако вследствие задержки наносов в Якутском “разбое” даже подпорное воздействие от сужения русла Кангаласским мысом сказывается только в режиме находящегося перед ним переката.

### ПРОГНОЗ И УПРАВЛЕНИЕ РУСЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Подходы к комплексному управлению русловыми процессами основываются на выявленных тенденциях развития русла и его прогнозных оценках. Они реализованы с применением методов гидродинамического моделирования для естественного состояния русла и в условиях искусственного воздействия на него на основе последней версии сертифицированной численной модели “Stream\_2D”, разработанной В.В. Беликовым.

От п. Мохсоголооха до г. Покровска оптимальным является положение трассы судового хода вдоль правого берега, где она меньше подвержена воздействию смещающихся кос и находится вне пересечений зоны аккумуляции наносов. Возможно лишь влияние эпизодических дноуглубительных работ на работу водозаборов и причалов, расположенных на левом берегу населенных пунктов. Кроме того, оно способствует закреплению фарватера и большей водности правого рукава в Покровском “разбое”, находящегося вне зоны формирования надвигающихся побочней.

В “разбое” Рассолода в перспективе должно произойти развитие левой ветви потока, начиная с левого рукава у о. Ляля и до подходов к Табагинскому камню. Это будет способствовать переформированию и определять состав регуляционных мероприятий в Покровском “разбое”. Однако перевод трассы фарватера в это положение должен осуществляться поэтапно (рис. 8а) по мере развития левой ветви разветвления. Это позволит в нижней части “разбоя” не допустить усиления влияния Табагинского мыса, которое способствует формированию ниже его побочней и неустойчивости положения фарватера. Здесь остается проблема перехода газопровода через Лену: надо или его реконструировать с переносом

сом места заглупления под реку вглубь поймы, либо выполнить крупномасштабное берегоукрепление.

В районе Павловского переката предпочтительным является отторжение нижней части песков Уёс-Кумах вдоль правого коренного берега. Это приведет к более пологому подходу потока к нему и снизит его размыв; отторгнутые пески сместятся к оголовку пойменно-островной системы, полностью или частично защитив его от размыва. В результате уменьшится поступление в поток наносов и, как следствие, снизятся темпы аккумуляции в Адамовской протоке. Возможен другой вариант деформаций – отторжение большей части левобережного побочня Павловского переката, что приведет к смещению вверх начала разветвления, повышению водности левой ветви, в том числе Адамовской протоки. Однако это может осложнить условия судоходства и подходы к причалам паромной переправы на правом берегу. В то же время сохранится аккумуляция наносов в Адамовской протоке и высокая заносимость городского водозабора. Моделирование обоих вариантов показало их малую эффективность, что дало основание воздержаться от рекомендаций их реализации.

В Якутском “разбое” управление русловыми процессами должно обеспечить: 1) устойчивость судоходной трассы и бесперебойную работу порта Якутск и паромной переправы; 2) устойчивое функционирование городского водозабора; 3) улучшение водного подхода к затону Жатайского СРСЗ; 4) предотвращение размыва правого берега в районе автомобильной дороги, причем защитные сооружения должны оказывать на поток направляющее воздействие, ориентируя его на заход в Адамовскую протоку.

При современном состоянии русла и согласно прогнозным оценкам переформирования оптимальным является положение трассы судового хода в Буорыларской протоке и подход к порту Якутск по Адамовской протоке.

Защита водозабора требует разработки таких мер, которые могли бы обеспечить свободный доступ к нему речной воды. Это в условиях параллельно-рукавного разветвления русла и наличия области аккумуляции наносов в районе его расположения – задача, решение которой идет вразрез с естественным развитием русла. Предлагаемые ранее в порядке обсуждения [16] варианты регулирования, ориентированные на восстановление водности Адамовской протоки посредством направления в нее потока из правой ветви Бестяхского рукава, как показали результаты моделирования, оказались неприемлимыми: минувя дамбу, перекрывающую правую часть Буорыларской протоки и выдвигающаяся в русло до траверса оголовка о. Пономарева,

поток сохранялся в ней, а ее водность уменьшалась всего на несколько процентов. В связи с этим рассмотрен проект стабилизации оголовка о. Пономарева сооружениями, направляющими поток, входящий в Адамовскую протоку, в прорезь через основание отмелей в устье пойменно-островного массива (рис. 8б). Выполненное моделирование показало жизнеспособность такого комплекса мероприятий. Его реализация позволит использовать прорезь также для захода судов в акваторию порта. Это, однако, не исключает эксплуатационных подчисток водоподводящей прорези.

Улучшение водного подхода к затону Жатайского завода также связано с крупными гидротехническими мероприятиями: берегозащитой, призванной прекратить дальнейший размыв правого пойменного берега, и сооружением полузапруд, стесняющих поток и направляющих его к левому берегу, создавая условия для размыва устья косы и ограничивая ее смещение. Это не исключает удлинения дамбы, ограждающей походной канал к заводу. Эффективность работ также подтверждена результатами моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили:

- 1) выявить закономерности трансформации сопряженных разветвлений русла р. Лены в параллельно-рукавные под влиянием увеличения ее водности, повышения теплового стока, оттаивания мерзлых грунтов мелководий и сосредоточения потока в рукавах с неустойчивым руслом;
- 2) установить, что переходный период от одного типа разветвлений к другому растягивается на многие десятки лет и характеризуется сложным режимом русловых деформаций;
- 3) определить местные условия, благодаря которым сформировались участки прямолинейного неразветвленного русла и чередующихся односторонних разветвлений;
- 4) выявить на основании гидродинамического моделирования закономерности русловых деформаций, происходящих в естественном состоянии после завершения трансформаций русла;
- 5) разработать подходы к управлению русловыми процессами для комплексного регулирования динамики русла с учетом потребностей водопользователей (на основе гидродинамического моделирования).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ им. М.В. Ломоносова, проектам РФ

(18-17-00086 – натурные исследования и анализ разветвлений, 14-17-00155 – оценка экологических последствий) и РФФИ (18-05-00487 – прогнозирование катастрофических проявлений), госконтрактам и договорам с Академией наук Республики Саха (Якутия), Росморречфлотом и Администрацией “Ленводпути”.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

В исследовании участвовали, помимо авторов статьи, А.А. Камышев, О.М. Кирик, И.В. Крыленко, Е.В. Промахова, С.Н. Рулева, моделировании русловых деформаций – В.В. Беликов (ИВП РАН) и И.Н. Крыленко.

#### FUNDING

The study was carried out according to the scientific research plan of the Department of Land Hydrology and Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, within the projects of the Russian Science Foundation (field observations and analysis of branching, no. 18-17-00086; environmental impact assessment, no. 14-17-00155) and the Russian Foundation for Basic Research (prediction of catastrophic manifestations, no. 18-05-00487), as well as within the framework of state contracts and contracts with the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Federal Agency for Maritime and River Transport and Lena River basin inland waterways administration.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

A.A. Kamyshev, A.M. Kirik, I.V. Krylenko, E.V. Promahova, S.N. Ruleva also assisted in the study. V.V. Belikov (Institute for Water Problems RAS) and I.N. Krylenko participated in modeling of channel deformations.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 203 с.
2. *Алексеевский Н.И., Зайцев А.А., Чалов Р.С.* Баланс наносов, деформации и возможности регулирования сложноразветвленного русла крупнейшей реки (на примере р. Лены в районе г. Якутска) // Тр. АВН. Вып. 3. М., 1996. С. 90–107.
3. *Беркович К.М., Борсук О.А., Гаррисон Л.М., Кирик О.М., Лодина Р.В., Рулёва С.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Русловой режим и регулирование русла Средней и Нижней Лены // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 8. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. С. 125–156.
4. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.

5. *Горохов А.И., Фёдоров А.Н.* Современные тенденции изменений климата в Якутии // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 153–161.
6. *Готье Э., Фёдоров А., Костер Ф., Брюнстайн Д.* Влияние изменений климата на динамику крупной реки российской Арктической зоны // Изменение климата: Европа, Северная Азия, Северная Америка. 4-е Европейские диалоги в Эвисане / под ред. М. Тибо, А. Кислова. Eurcasia: Cory-Melia, 2011. С. 73–82.
7. *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 // Водные ресурсы. 1991. № 6. С. 22–30.
8. *Зайцев А.А., Чалов Р.С.* Русловые процессы и регулирование русла р. Лены в районе г. Якутска // Водные ресурсы. 1989. № 5. С. 75–81.
9. *Магрицкий Д.В.* Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 85–95.
10. *Тананаев Н.И.* Гидрометеорологические условия формирования мерзлых грунтов в русле Средней Лены // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2005. № 6. С. 60–64.
11. *Тананаев Н.И.* Сток наносов и русловые процессы на реках криолитозоны. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 27 с.
12. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
13. *Чалов Р.С.* Эффективность прогноза переформирований сложноразветвленного русла и его практическое значение // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1981. № 4. С. 36–40.
14. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
15. *Чалов Р.С.* Временная трансформация морфодинамических типов русел больших равнинных рек // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 3. С. 3–13.
16. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулёва С.Н., Кирик О.М., Прокопьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И.* Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22–35.
17. *Чалов Р.С., Кирик О.М.* Ленские “разбои”: ретроспективный анализ переформирований, прогнозные оценки и регулирование русла // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2015. С. 294–338.
18. *Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В.* Якутский водный узел на реке Лене – проблемы русловых процессов: история, современность, перспективы, возможности управления // Водное хозяйство России. 2012. № 3. С. 44–56.
19. *Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И.* Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая (Северная Двина, Обь,

- Лена, Хуанхэ, Янцзы). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 212 с.
20. Чистяков Г.Е. Водные ресурсы рек Якутии. М.: Наука, 1964. 256 с.
  21. Чистяков Г.Е. Условные процессы на реке Лене в районе г. Якутска // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. Вып. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 213–225.
  22. Cotard F., Dupeyrat L., Gautier E., Careg-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigation along a rapidly eroding river bank: application to the Lena river (Central Siberia) // Earth Surface and Landforms. 2003. V. 28. № 12. P. 1349–1359.
  23. Cotard F., Gautier E., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D., Dupeyrat L. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena river in Central Siberia // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. № 14.
  24. Gautier E., Brunstein D., Cotard F., Lodina R. Fluvial dynamics in a deep permafrost zone – the case of the middle Lena river (Central Siberia) // Proceeding of the 8<sup>th</sup> Intern. conf. on permafrost. Zurich, Switzerland. 2003. P. 271–275.
  25. Yang D., Kane D., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena river hydrologic and recent change // J. of Geophys. Res. 2002. V. 107 (D 23). P. 4694–4703.
  7. Zaitsev A.A., Kirik O.M., Lodina R.V., Sidorchuk A.Yu., Chalov R.S. Channel changes on the Lena River in the transition of confined channel to wide floodplain. *Vodn. Resur.*, 1991, no. 6, pp. 22–30. (In Russ.).
  8. Zaitsev A.A., Chalov R.S. Channel changes and regulation of the channel of the Lena River near Yakutsk. *Vodn. Resur.*, 1989, no. 5, pp. 75–81. (In Russ.).
  9. Magritsky D.V. 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. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2015, no. 6, pp. 85–95. (In Russ.).
  10. Tananaev N.I. Hydrometeorological conditions of permafrost formation in the channel of the Middle Lena River. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2005, no. 6, pp. 60–64. (In Russ.).
  11. Tananaev N.I. Sediment load and channel processes on the rivers of the cryolithozone. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 1997. 27 p.
  12. Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov* [Geographical Studies of Channel Changes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1979. 232 p.
  13. Chalov R.S. The efficiency of the forecast of transformations complex braided channel and its practical significance. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1981, no. 4, pp. 36–40. (In Russ.).
  14. Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika* [Ruslovedenie: Theory, Geography, Practice]. Vol. 2: *Morfodinamika rechnykh rusel* [Morphodynamics of River Channels]. Moscow: KRASAND Publ., 2011. 960 p.
  15. Chalov R.S. Temporal transformation of morphodynamic types of channels of the large lowland rivers. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 3, pp. 3–13. (In Russ.).
  16. Chalov R.S., Zavadsky A.S., Ruleva S.N., Kirik O.M., Prokop'yev V.P., Androsova I.M., Sakharov A.I. Morphology, deformations and temporary modifications of the Lena River channel and its influence on the Yakutsk economic infrastructure. *Geomorfologiya*, 2016, no. 3, pp. 22–35. (In Russ.).
  17. Chalov R.S., Kirik O.M. Lena river “razboi”: retrospective analysis of transformations, forecast estimates and regulation of the channel. In *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil Erosion and Channel Changes]. Moscow: Geogr. F-t Mosk. Gos. Univ., 2015, vol. 19, pp. 294–338. (In Russ.).
  18. Chalov R.S., Kirik O.M., Il'yasov A.K., Botavin D.V. Yakutsk water node on the Lena River – the problem of channel changes: history, contemporaneity, prospects, management capabilities. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii*, 2012, no. 3, pp. 44–56. (In Russ.).
  19. Chalov R.S., Liu Shuguang, Alekseevskii N.I. *Stok nanosov i ruslovye protsessy na bol'shikh rekakh Rossii i Kitaya (Severnaya Dvina, Ob', Lena, Huanheh, Yantszy)* [Sediment Load and Channel Processes of Large Rivers of Russia and China (Northern Dvina, Ob', Lena, Huang He, Yangtze)]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2000. 212 p.
  20. Chistyakov G.E. *Vodnye resursy rek Yakutii* [Water Resources of the Rivers of Yakutia]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 256 p.

REFERENCES

1. Alekseevskii N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Formation and Movement of River Sediments]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998. 203 p.
2. Alekseevskii N.I., Zaitsev A.A., Chalov R.S. Sediment budget, channel changes and management of braided channel of the largest river (case study of the Lena River in the Yakutsk Region). In *Tr. Akademii vodokhozyaistvennykh problem* [Proc. of the Acad. of Water Management Probl.]. Vol. 3: *Vodnye puti i ruslovye protsessy* [Waterways and Channel Processes]. Moscow, 1996, pp. 90–108. (In Russ.).
3. Berkovich K.M., Borsuk O.A., Garrison L.M., Kirik O.M., Lodina R.V., Ruleva S.N., Chalov R.S., Chernov A.V. Regime and regulation of channel of the Middle and Lower reaches of the Lena River. In *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil Erosion and Channel Changes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1981, vol. 8, pp. 125–156. (In Russ.).
4. *Vodnye puti basseina Leny* [Waterways of the Lena Basin]. Moscow: MIKIS Publ., 1995. 600 p.
5. Gorokhov A.N., Fedorov A.N. Current trends in climate change in Yakutia. *Geogr. Nat. Resour.*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 153–161.
6. Gautier E., Fedorov A., Costard F., Brunstein D. The impact of climate change on the dynamics of a large river in the Russian Arctic. In *Izmenenie klimata: Evropa, Severnaya Aziya, Severnaya Amerika. 4-e Evropeiskie dialogi v Evisane* [Climate Change: Europe, North Asia, North America. 4 European Dialogues in Evisan]. 2019, pp. 73–82. (In Russ.).

21. Chistyakov G.E. Channel changes on the River Lena in the Yakutsk reach. In *Issledovanie vechnoi merzloty v Yakutskoi respublike* [Study of Permafrost in the Yakutsk Republic]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1952, vol. 3, pp. 213–225. (In Russ.).
22. Cotard F., Dupeyrat L., Gautier E., Careg-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigation along a rapidly eroding river bank: application to the Lena river (Central Siberia). *Earth Surf. Process. Landf.*, 2003, vol. 28, no. 12, pp. 1349–1359.
23. Costard F., Gautier E., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D., Dupeyrat L. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, no. 14. doi 10.1029/2007GL030212
24. Gautier E., Brunstein D., Cotard F., Lodina R. Fluvial dynamics in a deep permafrost zone—the case of the middle Lena River (Central Siberia). In *Permafrost*. Phillips M., Springman S.M., Arenson L.U., Eds. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 271–275.
25. Yang D., Kane D., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *J. Geophys. Res: Atmos.*, 2002, vol. 107, no. D23, pp. 4694–4703.

## Pokrovsko-Yakutsky Reach of the Lena River: Transformation of Complex Conjugated Channel, Recent Deformations and Management of Channel Changes

**R. S. Chalov\***, **A. S. Zavadsky\*\***, **D. V. Botavin\*\*\***, **P. P. Golovlev\*\*\*\***,  
**E. A. Morozova\*\*\*\*\***, and **V. V. Surkov\*\*\*\*\***

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

\*e-mail: rschalov@mail.ru

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

\*\*\*e-mail: dmitry\_botarin@mail.ru

\*\*\*\*e-mail: pavel\_golovlev@list.ru

\*\*\*\*\*e-mail: nam49@mail.ru

\*\*\*\*\*e-mail: vita.surkov@yandex.ru

Received July 31, 2018; revised February 1, 2019; accepted July 19, 2019

The article considers the conditions of conjugate branches' system transformation into parallel-branched channel, which are the most complex morphologically (by the mode of deformations and management) on the example of the Pokrovsko-Yakutsky section of the middle Lena River basin in the 21st century. It may arise from the general increase in the Lena River's water content and thawing frozen soils (composing shallow waters and near-shore shallows), as well as from the development of sleeves with unstable channel. At the same time, local conditions encouraged to the formation of a complex single (three-arm) branching at the beginning of the expansion of the valley bottom and the channel below city of Pokrovsk, the preservation of a straight unbranched channel upstream, the channel of the same type below the Tabaga Cape and alternating one-side branching at the end of the site. The modern riverbed reformation after the changes occurred consists in the transgressive displacement of floodplain-island massifs, intensive banks' erosion, and the sediment accumulation zones' formation. This has led to the significant complications in the river water usage (including water intake and port water areas' sedimentation, creation an unfavorable environment in the port approaches area, berths and industrial infrastructure) and to creation of an emergency situation at the coastal infrastructure facilities. The revealed channel deformations' regularities on the basis of long-term and modern researches and hydrodynamic modeling allowed to develop and justify the complex scheme of channel processes' management, which implementation will allow to reduce or neutralize their adverse or dangerous manifestations.

**Keywords:** channel processes, channel transformation, parallel-sleeve branching, permafrost, deformation, erosion of banks, accumulation of sediments, control.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019683-96>