

Геоморфология и народное хозяйство

УДК 551.4.435.11(282.251.3)

© 2008 г. А.А. ЗАЙЦЕВ, Н.И. ТАНАНАЕВ

МНОГОЛЕТНИЕ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОЖНОРАЗВЕТВЛЕННОГО РУСЛА Р. ЛЕНЫ В РАЙОНЕ “ЯКУТСКОГО РАЗБОЯ” И ВЛИЯНИЕ НА НИХ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ¹

Участок долины р. Лены в районе г. Якутска является одной из наиболее освоенных территорий Центральной Якутии. Однако хозяйственная деятельность на реке и прибрежных территориях не всегда согласуется с естественным развитием русловых переформирований, которые проявляются в размыве берегов и постоянном изменении положения главного течения реки. Достаточно сказать, что сам Якутск, основанный в XVII в. на берегу реки, уже в начале XX в. оказался в стороне от нее, на берегу второстепенного маловодного рукава. В настоящее время размыв берегов угрожает разрушением заречного (находящегося на правом берегу реки) пос. Нижний Бестях, а отличающееся сложной разветвленностью русло является затруднительным для судоходства на всем участке реки в районе Якутска. Это привело к необходимости проведения специальных исследований русловых переформирований на этом участке Лены в районе Якутска, известным под названием “Якутский разбой”.

Первое описание русловых процессов на Лене в районе Якутска было выполнено в середине XX в. Г.Е. Чистяковым [1], обратившим внимание на их зависимость от промерзания грунтов дна в зимний период. Последующие исследования, проведенные русловой экспедицией МГУ, включали, помимо собственно русловых (промерно-съемочных и гидрологических), проведение буровых работ. Благодаря им было установлено значительное распространение мерзлых грунтов в широкопойменном песчаном русле средней Лены и выявлены его особенности, а также дана предварительная оценка воздействия мерзлых пород на ход эрозионно-аккумулятивных процессов в русле [2, 3]. Несмотря на это, роль сезонного и многолетнего промерзания слагающих русло грунтов в направленности и интенсивности переформирований русла остается исследованной недостаточно, что сказывается на качестве прогнозов переформирований, и без того достаточно сложных из-за разветвленности русла на многочисленные рукава и протоки. Использование компьютерных технологий как при выполнении натурных работ, так и при русловом анализе (моделирование кинематики потока и русловых деформаций) позволяет существенно повысить не только уровень исследований, но и эффективность решения практических задач. В частности, интерес к их результатам обусловлен, помимо необходимости их учета при планировании и проведении дноуглубительных работ по трассе водного пути и берегоукреплении, так и перспективами строительства мостового перехода Амуро-Якутской железнодорожной магистрали через Лену в районе Якутска.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-05-64293).

Русло средней Лены выше пос. Покровск (1730 км от устья, 90 км выше Якутска) является врезанным, расположено между коренными берегами в узкой долине со слаборазвитой поймой, часто подстилается скальными породами. Ниже по течению оно перестает испытывать ограничивающее влияние литологии коренных берегов, долина реки существенно расширяется, русло становится широкопойменным. Изменение формы долины и морфологии русла обусловлено выходом реки в пределы Центрально-якутской низменности, соответствующей Виллюйской синеклизе. Прочные кембрийские породы сменяются здесь более легкоразмываемыми юрскими и неогеновыми алевролитами, меловыми слаболитофицированными песчаниками с железисто-карбонатным цементом. Большей частью эти породы довольно малоустойчивы по отношению к эрозии. Поэтому здесь преобладают условия свободного развития русловых деформаций, пойма расширяется, русло становится сложноразветвленным. Кровля скального основания постепенно понижается, ее глубина залегания в районе Якутска колеблется от 8 до 13 м при мощности валунно-галечного базального слоя аллювия до 2 м, а само русло формируется в толще песчаных аллювиальных отложений.

Расширения долины на уровне поймы чередуются с сужениями, образованными вдающимися в ее пределы выступами левого коренного берега – Табагинским утесом и Кангаласским камнем. Ширина долины составляет от 5 км в сужении у Табагинского утеса до 12,3 км у пос. Жатай, расположенного в 15 км ниже Якутска. У Кангаласского камня долина вновь сужается до 4,7 км, что является самым значительным сужением на всем протяжении Лены от пос. Покровск до устья Алдана. В долине реки прослеживается комплекс песчаных надпойменных террас, наиболее распространенных вдоль правого берега (например, Бестяхская – рис. 1). Террасы сложены более мелким материалом, чем прирусловые отмели, обсыхающие в межень [4].

Пойма реки в основном левобережная, шириной не более 10 км. На правом берегу пойма часто отсутствует, ширина ее отдельных фрагментов не превышает 4–5 км (устье Алдана). Общее расширение поймы начинается у Покровска, но затем она местами сужается, прерывается надпойменными террасами и высокими мысами коренных склонов. Пойма реки имеет несколько выраженных ступеней, что отражает направленное многовековое медленное врезание реки [5]. Рельеф поверхности поймы преимущественно ложбинно-островной и выравнивается с увеличением высоты пойменных ступеней. Относительная ширина поймы, по сравнению с таковой русла, невелика. В половодье регулярно заливается только низкая пойма, средневысотная – по ложбинам; полностью пойма покрывается водой примерно один раз в 20–25 лет при подъемах уровней, вызванных заторными явлениями [6].

По величине коэффициента стабильности русла Н.И. Маккавеева K_c русло Лены в районе Якутска относится к слабоустойчивому или неустойчивому. По длине реки наблюдается чередование участков с большей или меньшей устойчивостью: K_c от 1,40 до 7,38. Максимальные значения показателей отмечаются в сужениях русла, где происходит местное относительное увеличение крупности наносов, что связано как с гидравлическими характеристиками потока (его стеснением), так и с активизацией обвально-осыпных процессов на склонах коренных мысов, обуславливающих сами сужения и выходы в прибрежной части русла скальных пород. Для участков с минимальной устойчивостью русла характерно преобладание более мелких песчаных наносов, формирующих здесь обширные отмели, сложенные в основном среднезернистыми песками со средним диаметром частиц примерно 0,3–0,4 мм [5].

Среднегодовой расход воды в Лене в районе Якутска составляет 7140 м³/с (по данным гидрологического поста (г.п.) Табага). Большая часть стока проходит по реке в теплый период года (от 75 до 90%). По типу водного режима Лена относится к рекам с восточно-сибирским типом водного режима (по классификации Б.Д. Зайкова). По источникам питания Лена относится к рекам с преобладающим снеговым питанием, талые воды составляют 50–70% в суммарном годовом стоке. Дождевое питание играет

существенную роль в теплый период года, когда проходят дождевые паводки, формирующиеся на притоках Лены – Витиме и Олекме (реках с преимущественно дождевым питанием).

Сток реки неравномерен в течение года: в половодье расходы приближаются к $35000 \text{ м}^3/\text{с}$ (максимальный, по данным г.п. Табага, – $51700 \text{ м}^3/\text{с}$ – наблюдался 23 мая 1966 г.), а в длительную зимнюю межень (с ноября по май) они могут быть менее $800 \text{ м}^3/\text{с}$. Зимой на реке формируется мощный ледовый покров, толщина которого местами превышает 2 м. Вскрытие реки происходит на подъеме быстро формирующейся волны половодья. В течение нескольких дней половодье распространяется вниз по течению, образуя череду ледовых заторов, которые являются причиной аномально высоких уровней. Однако в целом заторный подъем уровня воды не так высок, как на вышележащем участке реки с более узкой долиной, и редко превышает 9 м над уровнем летней межи.

Мутность в реке в период летней межи сравнительно небольшая (до 50 мг/л) и только в периоды высокой водности достигает $200\text{--}400 \text{ мг/л}$ и более. В отдельные годы мутность воды во время летних паводков превышает мутность вод половодья. Такой режим стока взвешенных наносов характерен для рек северо-востока России и определяется тем, что паводочный период приходится на максимум летнего протаивания многолетнемерзлых грунтов в бассейне, в долине реки и в самом русле. Промерзание грунтов на водосборах и обширных площадях в руслах арктических рек (в том числе на средней и нижней Лене) приводит к снижению эрозионной активности в период снеготаяния и прохождения волны половодья. В летнее время происходит постепенное прогревание и протаивание мерзлых грунтов. Протаявшие грунты размываются в паводки при выпадении дождевых осадков, чему способствует их полное влагонасыщение из-за наличия водоупора – кровли многолетнемерзлых пород. Таким образом, в теплый период года расходы наносов в паводки даже при более низких расходах воды могут значительно превышать их половодные значения [7].

Ядра многолетнемерзлых грунтов существуют в толще всех крупных песчаных отмелей в русле средней Лены. Следствием этого является малая подвижность отмелей, поскольку движение гряд по их поверхности в половодье практически не происходит из-за отсутствия оттаявшего слоя аллювия; в течение паводочного периода перемещаются только мелкие гряды (микроформы), формирующиеся транзитным потоком наносов, что ограничивает скорость смещения побочней. Следствием закрепления положения отмелей является чрезвычайная извилистость динамической оси потока, вынужденного в межень огибать отмели, являющиеся слаберазмываемыми (из-за мерзлого ядра) границами потока.

“Якутский разбой” расположен между двумя левобережными коренными мысами – Табагинским утесом и Кангаласским камнем (рис. 2). У Табагинского мыса основной поток Лены отходит от высокого коренного берега, концентрируя в основном рукаве около 90% стока (10% стока рассредоточены по правобережным пойменным протокам) и формируя плесовый участок реки длиной около 20 км. В нижней части этого плеса, откуда начинается собственно “Якутский разбой”, от основного рукава отходит

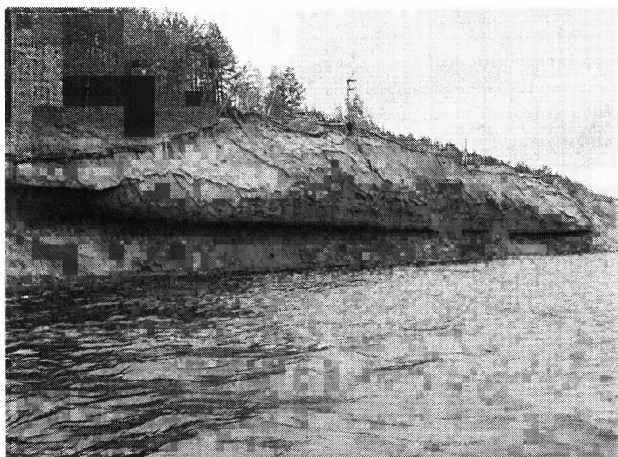


Рис. 1. Низкая песчаная терраса у пос. Нижний Бестях

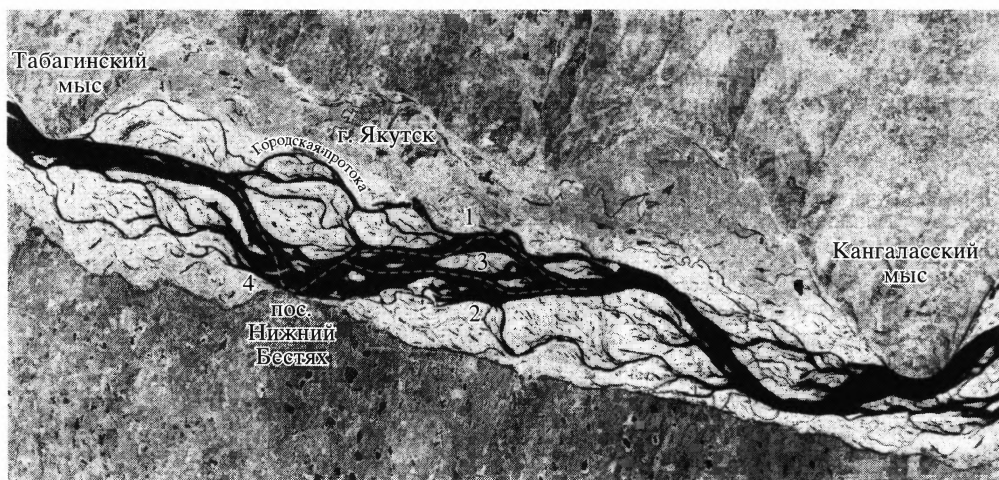


Рис. 2. Общая схема долины р. Лены в районе “Якутского разбоя” (космический снимок выполнен аппаратом Landsat-7)

Цифрами на рисунке обозначены: 1 – Адамовская протока, 2 – Буорыларская протока, 3 – о-в Пономарев, 4 – гребень Павловского переката.

Пунктиром показано положение динамической оси потока

система левобережных Городских протоков. В настоящее время эта система является второстепенной, некоторые протоки были перекрыты дамбами при строительстве Якутского речного порта в 1960-е годы, тогда как еще в 20–30-е годы XX в. эти протоки были судоходными и вместе с современным основным рукавом образовывали систему двукавного сложного разветвления.

Начиная от истока Городской протоки основной поток реки переваливает к правому борту долины и, минуя Павловский перекат, подходит к нему у пос. Нижний Бестях. При этом поток разделяется на две почти самостоятельные ветви течения. Правая ветвь следует вдоль террасового берега, минуя невысокий, но обширный массив песков. Левая ветвь течения резко отклоняется к островам и следует вдоль них. Обе ветви разделены массивными осередками и пойменными островками. Большая часть стока левой ветви течения направляется у нижележащего о-ва Пономарев в левый рукав – Адамовскую протоку, правая ветвь течения здесь же следует по правому рукаву – Буорыларской протоке. Относительная водность Адамовской протоки в среднем составляет 58%, Буорыларской – 42% [8], что обеспечивает удовлетворительное состояние судоходной трассы на подходе к Якутскому речному порту и затону Якутского района водных путей (РВП). В целом вплоть до устья о-ва Пономарев обе ветви создают параллельно-рукавное разветвление, сформировавшееся после сосредоточения основного течения реки в правом рукаве у пос. Нижний Бестях и отмирания Городских протоков.

Ретроспективный анализ является наиболее распространенным инструментом выявления многолетних тенденций переформирования русла, изменения его контуров и основных черт руслового рельефа. Первые точные инструментальные съемки исследуемого участка Лены были проведены в начале 50-х годов XX в. Происшедшие за этот период переформирования русла отражены на планах 1955 и 2002 гг. (рис. 3). Сам же ретроспективный анализ выполнялся по съемкам русла с интервалом от 10 до 20 лет, что позволяет более детально характеризовать руслоформирующую деятельность реки [5, 9].

На плане русла по съемке 1955 г. (рис. 3А) основной поток в самом начале участка огибает прирусловые отмели, вытянутые вдоль правобережных островов. Песчаная

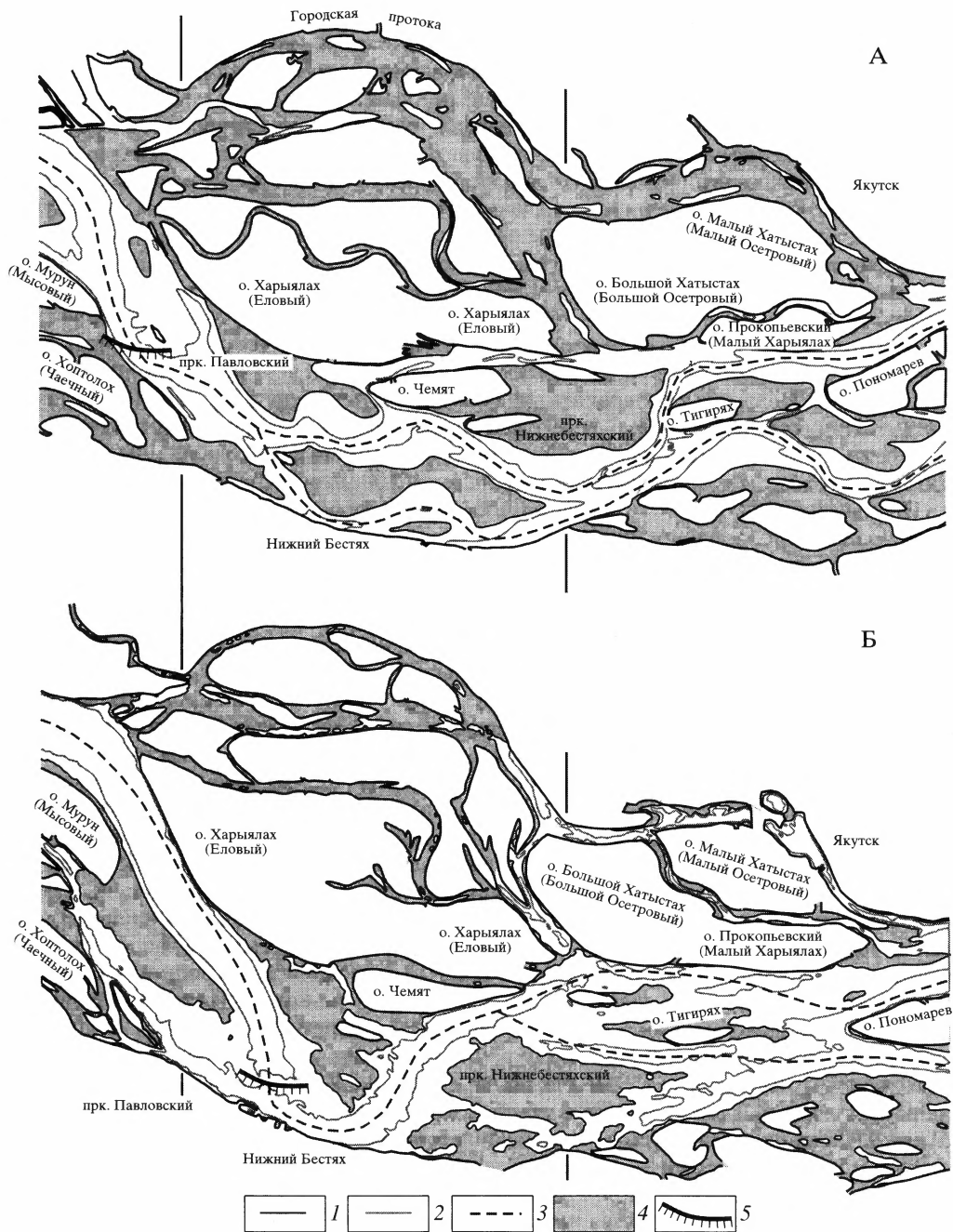


Рис. 3. Сопоставленные планы русла р. Лены в районе пос. Нижний Вестях (А – по данным 1953 г., Б – по данным 2002 г.)

Изобата: 1 – нулевая, 2 – 4 м; 3 – динамическая ось потока; 4 – песчаные отмели; 5 – гребень Павловского переката

коса (пески Уэс-Кумах) в их ухвостье находилась выше о-ва Мурун. У левого берега находился побочень, причлененный к оголовку о-ва Харыялах. На перевале главного течения к правому берегу располагался Павловский перекат. Гребень переката, по

мере смещения кос, также смещался вслед за ними и в 2002 г. занял положение в 5 км ниже по течению. Скорость смещения переката составила около 100 м/год.

Между правым террасовым берегом в районе Нижнего Бестяха и основным потоком реки располагался обширный песчаный осередок с небольшим островком, отделенный от правого берега широкой, но в основном мелководной протокой, в нижней части глубокой и образующей затонскую часть Нижнебестяхского переката. Вследствие такой морфологии русла размыв берега высокой Бестяхской террасы в то время мог происходить лишь при прохождении максимальных расходов воды, когда увеличивалась водность правого рукава за осередком.

На схеме русла Лены в районе Якутска, составленной по съемке 2002 г. (рис. 3Б), поток от истока Городских проток у оголовка о-ва Харыялах переваливает к правому высокому берегу, где в 2 км выше гребня Павловского переката ширина русла увеличивается почти в 2.5 раза. При этом стрежень потока сместился непосредственно к яру о-ва Харыялах, вызвав размыв располагавшейся здесь верхней части левобережного побочня Павловского переката. Максимальная величина смещения (отступления приверха побочня) – 4.5 км, т. е. 90 м/год. Ухвостье песков Уэс-Кумах сместилось вниз по течению более чем на 7 км, скорость смещения составила в среднем 150 м/год, в то время как гребень переката сместился на 4.5 км (~100 м/год). Нижняя плесовая лощина Павловского переката оказалась расположенной вдоль правого берега, а гребень переката расположился под прямым углом к оси потока. Сужение нижней плесовой лощины Павловского переката привело к росту транспортирующей способности потока и активизации его работы под правым берегом, вызывая интенсивный размыв последнего.

Основной поток, отходя от высокого берега Бестяхской террасы, круто изгибается и направляется к ухвостью о-ва Чемят, примыкающему к нижней части о-ва Харыялах, т. е. в широком русле образуется крутой изгиб динамической оси потока. В этих условиях происходит дальнейший рост левобережного побочня, составившего выпуклый берег излучины динамической оси потока (меженного русла правого основного рукава). Верхняя часть левобережного побочня незначительно сместилась вдоль о-ва Харыялах, однако резко возросла его длина и высота; поток на перевале течения к ухвостью о-ва Чемят постоянно размывает его нижние косы.

По-видимому, смещение песков Уэс-Кумах и стрежня потока на Павловском перекае вниз привели к развитию у пос. Ниж. Бестях правобережной протоки за осередком. Но ее углублению на всем протяжении препятствовал расположенный в средней части побочень с мерзлым ядром. Огибая его, поток размыл узкую часть осередка, который разделился на две части. Верхняя часть осередка вошла в состав левобережного побочня Павловского переката, вызвав увеличение его размеров, а нижняя сохранилась и сильно увеличилась в размерах; протока за ней обмелела.

В целом за 50 лет положение основных островов, которые определяют морфологический облик “Якутского разбоя”, не изменилось, однако их конфигурация и размеры (впрочем, как и песчаных массивов) существенно различаются. На устойчивость последних к размыву существенно повлияли особенности их промерзания. Так, были размывы и перестали существовать более низкие побочни, мало подверженные промерзанию с поверхности и не имеющие вследствие этого в своей толще ядер многолетнемерзлых грунтов – верхняя часть левобережного побочня Павловского переката, пониженная часть осередка, располагавшегося у бестяхского берега и др. В толщах высоких побочней ядро многолетнемерзлых пород формируется вследствие неравенства коэффициентов теплопроводности грунтов в талом и мерзлом состоянии, и если побочень имеет достаточную высоту, большая часть его площади промерзает с поверхности или подо льдом [10]. Поэтому сохранили свое положение нижняя часть левобережного побочня Павловского переката выше оголовка о-ва Чемят, а также причленившаяся к нему отторгнутая верхняя часть правобережного осередка. Разделение этих песков (осередка) произошло в их самой узкой и наименее высокой части, где промерзание было не столь существенно; в настоящее время по этой части быв-

шей отмели проходит динамическая ось потока. Формирование крутой излучины меженного потока связано также с увеличением устойчивости русла вследствие наличия как ядер мерзлоты в русле реки, так и сезонного промерзания прирусловых отмелей. Соотношение l/L (где l – длина излучины по руслу, L – шаг излучины) для нее составляет 1.6, т.е. ее форма соответствует критической величине гидравлической выгоды излучины. Однако спрямление ее не происходит, несмотря на смещение стрежня потока в половодье в тыловую часть побочня из-за наличия в последнем мерзлого ядра.

В результате этих переформирований русла в настоящее время под непосредственное воздействие потока попадает большая часть берега у пос. Нижний Бестях. Поток размывает берег как в половодье, так и в межень; по наблюдениям, проведенным в 1991–93 гг., высокая терраса отступает благодаря размыву на 7–12 м ежегодно, что соизмеримо с размывом поймы [9].

Аналогичные переформирования (отторжение песчаных массивов в пониженных их частях и изменение положения ветвей потока) происходили и между о-вами Чемят и Пономарев, а также на заходе в правую Буорыларскую протоку. В результате произошло смещение вниз по течению узла разветвления параллельно-рукавного русла, который сместился за 50 лет вниз на 8.2 км. В нижней части “Якутского разбоя” (у о-ва Пономарев) происходили местные переформирования [5, 9], не повлекшие за собой существенных изменений в морфологии русла.

Расчеты русловых переформирований

Для расчета русловых деформаций были использованы результаты промеров русла, проведенных Ленской партией Русловой экспедиции МГУ в 2001–04 гг. Промеры были выполнены с применением программно-аппаратного комплекса с использованием приборов спутникового позиционирования. По данным промеров за каждый год в программе Golden Software Surfer 8.0 был построен ряд идентичных регулярных сеток. Затем вычитанием значений одной сетки из других были получены сетки разности, в которых положительные значения соответствуют повышению отметок дна (аккумуляции), отрицательные – их понижению (эрозии).

На основе сеток разности построены планы деформаций русла р. Лены в районе Нижнего Бестяха за периоды 2001–02, 2002–03, 2003–04 гг. и в целом за 2001–04 гг. В пределах участка выделяются две основные зоны размыва дна и две зоны аккумуляции наносов, для которых характерно значительное изменение отметок дна (табл. 1). Первая зона размыва расположена в верхней части участка; она приурочена к верхней плесовой ложине Павловского переката и отчасти – к приверху левобережного побочня. Вторая зона размыва наблюдается в нижней плесовой ложине возле правого коренного берега. Аккумуляция наносов происходит в подвалье Павловского переката, а также в ухвостье песчаного массива Уэс-Кумах (верхнего побочня Павловского переката). Смещение песков Уэс-Кумах в период 2001–04 гг. составило от 100 до 500 м. Зоны размыва расположены на участках с глубинами от 2 до 5 м от проектного уровня (по промерам 2001 г.), зоны аккумуляции – от 5 до 8 м. Верхняя граница левобережного побочня относительно стабильна, но происходит активная аккумуляция в его нижней части. Это привело к смещению подвалья гряды переката и линии наибольших глубин на 300–500 м вниз по течению.

Для выявления преобладающего направления вертикальных деформаций (размывов дна) был использован математический аппарат программы Surfer. Были вычислены объемы рассчитанных ранее деформационных сеток, ограниченные плоскостью, соответствующей поверхности проектного уровня.

В целом по объему перемещенного материала преобладающим процессом на описываемом участке является аккумуляция, суммарный баланс наносов на участке русла составил +8.22 млн. м³ при общем объеме аккумуляции 20.92 млн. м³, эрозии – 12.69 млн. м³. Такая направленность, как и значительные величины деформаций за период 2001–04 гг., не могут быть объяснены исключительно сезонным режимом перекаточного участка.

Изменение отметок дна в районе Павловского переката у пос. Ниж. Бестях, м

Преобладающий процесс	Форма рельефа русла	Годы			
		2001–02	2002–03	2003–04	2001–04
Эрозия	верхняя плесовая ложина	1–2	1–2	0–1	1–3
	нижняя плесовая ложина	1–6	1–3	1–4	1–8
Аккумуляция	гребень Павловского переката	1–5	1–6	1–4	1–7
	ухвостье песков Уэс-Кумах	1–3	н/д*	н/д*	1–3

* н/д – нет данных (промеры на данном участке не проводились).

Одним из объяснений современной аккумуляции является специфика мерзлотных условий, гидрометеорологические условия формирования сезонной мерзлоты [11].

Степень цементации промерзающих прирусловых отмелей зависит от суммы осадков, выпавших в двухнедельный срок до перехода температур через 0°C, а также величины конденсации влаги на поверхности и в толще отмелей. В низких, наименее повышенных частях отмелей на влажность песков (а, соответственно, степень цементации грунтов) влияют капиллярные воды. Высота капиллярного поднятия в типичных для рассматриваемого участка условиях (пористость, гранулометрический состав песков) составляет 0.5 м и может приниматься константой при сходных гидрогеологических условиях. В результате с началом промерзания наиболее сильно промерзают именно те участки, где капиллярные воды выходят на поверхность – на этих участках песок находится в состоянии влагонасыщения. В среднем через месяц после начала промерзания наблюдается предположительный подъем уровней. Насыщение влагой поверхности отмели происходит только в том случае, если вода непосредственно затопила уже промерзшую на первые сантиметры отмель; в остальных случаях увлажняется только толща отмели.

Очевидно, что после предположительного подъема уровней полностью насыщены влагой окажутся отмели, высота которых над уровнем за день до начала ледостава составляет менее 1 м. Если же их высота больше 1 м, то отмель либо будет слабо сцементирована (следствием чего станет активный ее размыв в последующие половодье), либо между двумя сцементированными слоями будет находиться непромерзший или слабо сцементированный слой песка, размыв которого начнется сразу после протаивания поверхности отмели (в этом случае размыв активизируется в период летних паводков).

После подъема уровня начинается его зимнее падение, и к началу апреля достигаются минимальные значения уровней. В это же время максимальных значений достигает толщина льда. В течение зимы, таким образом, мерзлота может образоваться на участках, либо осушенных в результате падения уровня, либо контактирующих со льдом.

К началу половодья промерзшие участки русла не успевают оттаять, поэтому во время половодья размывы преобладают на непромерзающих участках русла и там, где глубина промерзания невелика и пески успевают протаять на подъеме половодья. Оттаявший в этот период грунт полностью удаляется потоком. Размытый материал поступает на нижележащий гребень переката, где и аккумулируется. Осветленный поток активно размывает нижележащую плесовую ложину, при этом гребень переката играет роль водослива с широким порогом, еще больше усиливая эрозию. В то же время на промерзшей поверхности высоких песков (на Лене в районе Якутска промерзанием может быть охвачено до 60% от общей площади русла), как и на гребне переката, происходит аккумуляция наносов.

Расчетные параметры компьютерной модели

Расход, м ³ /с	Уровень, м			Коэффициент шероховатости, n	
	фактический		рассчитанный для Табаги	в русле	на пойме
	в Табаге	в Якутске			
42 000	94.05	91.94	93.82	0.026	0.07
7000	87.50	84.90	87.36	0.030	0.07
900 (без тол- щины льда)	84.10	81.00	84.12	0.055	–

Недостатком данных промерных работ является то, что они проводятся в основном на спаде половодья и не охватывают мелководных и обсохших к этому моменту участков русла. Очевидно, что это приводит к неучету эрозионно-аккумулятивных процессов на определенной части русла, и полученные данные баланса наносов характеризуют только фазу спада уровней и пониженной водности, а не весь период руслоформирования. Для исследования динамической структуры потока при большом расходе воды были использованы возможности компьютерного моделирования. Компьютерное численное моделирование проводилось путем целостного решения задачи на большом по протяжению участке реки. Течения на участке рассчитывались на основе двумерных уравнений мелкой воды (уравнений Сен-Венана).

Для проведения расчетов на рассматриваемый участок русла была построена сетка, состоящая из треугольных ячеек общим количеством около 70000. За основу построения сетки приняты оцифрованные топографические карты и рассчитанная по ним цифровая модель рельефа поймы. Расчетная сетка задана примерно 500000 точек, расположение и размер ячеек были выбраны так, чтобы оптимальным образом аппроксимировать рельеф поймы. При этом длины сторон треугольников составили в среднем около 40 м. Использование в расчетах по двумерной модели ячеек меньшего размера неправомерно, т. к. размер ячейки становится соизмерим с глубиной потока при большом расходе воды. Размеры ячеек вполне достаточны для адекватного описания всех особенностей течения, включая водоворотные (циркуляционные) зоны. В центры ячеек сетки был произведен пересчет отметок дна по промерным поперечникам и отметок поверхности поймы, полученных с карт и проектных материалов. При этом для правильного воспроизведения рельефа дна между поперечниками (расстояние между которыми местами достигало 200–300 м) применялась специальная интерполяция, учитывающая характерные особенности речного русла.

В каждой ячейке сетки задавался коэффициент шероховатости n , который для русла принимался равным от 0.026 (в половодье) до 0.055 (при ледоставе), а для поймы (для участков выше абс. отметки 89 м) – равным 0.055. Граничные условия и рассчитанные коэффициенты шероховатости, при которых проведено моделирование, представлены в таблице 2.

Расчеты течений производились при трех характерных уровнях воды и соответствующих им расходах (табл. 2). Высокий уровень 94.05 м на г.п. Табага наблюдается приблизительно два года из трех, продолжительность стояния такого уровня может достигать 15 суток, и, следовательно, его надо учитывать при расчете течений и деформаций дна. Полный расход, соответствующий этому уровню, равен 42000 м³/с, расход по Табагинскому плесу, в соответствии с данными измерений, принят равным 37400 м³/с, или 89% полного расхода.

Следующий уровень, принятый в расчетах, равен 87.50 м и соответствует среднегодовому расходу 7000 м³/с. Обычно этот уровень наблюдается в летнюю межень и перед ледоставом. Расход 900 м³/с является для Лены в районе г. Якутска обычным для

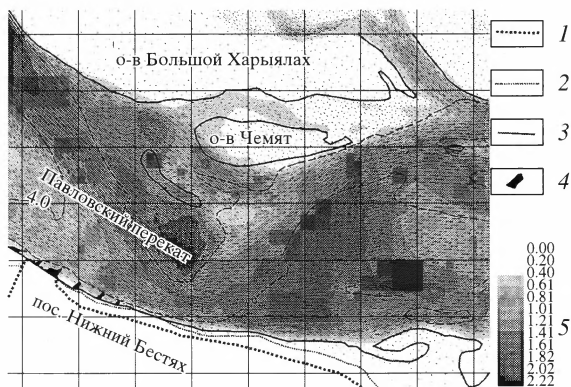


Рис. 4. Фрагмент расчета кинематики потока на участке р. Лены в районе пос. Нижний Бестях, выполненного путем компьютерного моделирования для условий половодья
Террасы: 1 – высокая, 2 – низкая; 3 – бровка поймы; 4 – берегоукрепительные сооружения; 5 – шкала значений модуля скорости течения, м/с

на поверхность поймы. Это приводит к формированию выраженных прирусловых валов вдоль бровок поймы.

При изменении уровней поле скоростей течения коренным образом меняется. В половодье при затоплении пойменных поверхностей поток менее активен. Наиболее существенные переформирования русла происходят в моменты, когда поток не выходит за бровки пойменных яров, а также во второй половине лета при прохождении летних паводков. В этот период оттаивают насыщенные водой и промерзшие за зиму слои песчаных отмелей, заметно растет объем транспортируемых потоком руслообразующих наносов.

Половодный поток существенно сглаживает изгибы динамической оси потока (меженного русла). Большую роль в его положении играет направление линии ведущего берега. Фрагмент расчета кинематики потока, выполненного путем компьютерного моделирования для условий половодья представлены на рис. 4. Перед подходом к гребню Павловского пережата скорость течения реки существенно снижается – с 1.8 до 1.1 м/с. Поток высоких вод частично спрямляет “излучину”, формируя побочный проток в тыловой части левобережного побочня перед о-вом Чемят. Однако условия для отторжения побочня отсутствуют: во-первых, более высокие скорости течения приурочены к зонам сравнительно небольших глубин; во-вторых, этому препятствует наличие многолетнемерзлого ядра в теле побочня. Необходимо учитывать и то, что спрямляющая протока имеет небольшие глубины (до 2.5 м от проектного уровня) и на всем своем протяжении промерзает в период зимней межени, что значительно затормаживает процесс ее развития.

Выводы

Ретроспективный анализ русловых переформирований на участке русла Лены в районе пос. Нижний Бестях показал, что основным направлением развития русла в верхней части “Якутского разбоя” стало сосредоточение потока между островами и смещающимися вниз по течению косами, являющимися в условиях криолитозоны твердыми границами потока, при сохранении параллельно-рукавного разветвления русла ниже по течению. В настоящее время преобладающим процессом является аккумуляция наносов, обусловленная как смещением на этом участке русла вниз по течению косы песков Уэс-Кумах, так и мерзлотной стабилизацией поверхности отмелей

в зонах замедления течения. Промерзание русла на значительных площадях обсыхающих отмелей способствовало закреплению в плане гипертрофированной “излучины”, в вершине которой последние 20 лет происходит активный размыв Бестяхской террасы.

Устойчивость положения вершины “излучины” поддерживается стабильностью крупных русловых форм, которые, промерзая на значительную глубину, являются твердыми границами потока, стесняющими его в период половодья. Несмотря на то, что течение вдоль правого берега слабее, чем по более пологому направлению, поток не может спрямить излучину из-за наличия в образовавшем ее побочное мерзлого ядра.

Со временем вершина излучины, следуя тенденции смещения максимума скорости потока, должна постепенно сдвигаться вниз по течению, если к этому времени не разрабатывается спрямляющая протока либо в тыловой части песков Уэс-Кумах, либо вдоль о-вов Харыялах и Чемят. При сохранении крутого изгиба основного потока у пос. Нижний Бестях активный размыв террасы будет продолжаться. Ожидается постепенное смещение крупных песчаных массивов вниз по течению; скорость этого смещения ограничивается высокой стабильностью промерзающих надводных частей прирусловых отмелей и ядер мерзлоты в их толщах, что приводит к закреплению в плане наиболее высоких частей отмелей и размыв более низких частей. Существование Павловского переката на его нынешнем месте предположительно будет поддерживаться подпором, возникающим при набегании потока на правый террасовый берег, а ниже изгиба стрежня потока – смещением вниз левобережного побочня.

Сходные переформирования русла, ограниченного подмываемыми берегами и слаборазмываемыми отмелями, характерны для многих рек криолитозоны, хотя и при другом его морфодинамическом типе. Так, деформации русла с формированием гипертрофированного изгиба динамической оси потока возле отмели привели к катастрофическому размыву берега в районе пос. Зырянка на Колыме (до 20–30 м/год), нанесшему значительный ущерб строениям данного населенного пункта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистяков Г.Е. Русловые процессы на реке Лене в районе города Якутска // Исслед. вечной мерзлоты в ЯАССР. М.: Изд-во АН СССР, 1952. Вып. 3. С. 213–225.
2. Беркович К.М. Влияние мерзлых грунтов на русловые деформации р. Лены // I Всес. конф. по пробл. “Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях”. М.: Изд-во МГУ, 1972.
3. Русловой режим средней и нижней Лены. М.: ВИНТИ, 1976. Деп. № 2227–76. 185 с.
4. Зайцев А.А., Кирик О.М., Лодина Р.В. и др. Русловые процессы на р. Лене в условиях перехода от врезанного русла к широкопойменному // Водные ресурсы. 1991. № 6. С. 22–30.
5. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
6. Зайцев А.А. Роль ледовых явлений в формировании ложа и берегов русел крупных рек бассейна Лены // Безопасность энергетических сооружений. М.: НИИ ЭС, 2003. Вып. 11. С. 211–223.
7. Тананаев Н.И. Влияние многолетнемерзлых грунтов на сток взвешенных наносов и русловые процессы // Динамика овражно-балочных форм и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2002. С. 107–111.
8. Зайцев А.А. Баланс наносов, деформации и возможности регулирования разветвленного русла крупнейшей реки (на примере р. Лены в районе г. Якутска) // Тр. АВН. 1996. Вып. 47. С. 90–107.
9. Зайцев А.А., Чалов Р.С. Русловые процессы и регулирование русла р. Лены в районе г. Якутска // Водные ресурсы. 1989. № 5. С. 75–81.
10. Тананаев Н.И. Сезонное и многолетнее промерзание русел рек криолитозоны и его влияние на русловые деформации (на примере средней Лены) // Эрозионно-русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 195–201.
11. Тананаев Н.И. Гидрометеорологические условия формирования мерзлых грунтов в русле средней Лены // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2005. № 6. С. 60–64.

MULTIANNUAL DYNAMICS OF THE LENA RIVER MOUTH NEAR THE “YAKUT ROBBERY” AND THE GROUND FREEZING IMPACT

A.A. ZAITSEV, N.I. TANANAYEV

Summary

Retrospective analysis of channel alterations revealed durable tendencies of channel processes in the heavy branchy riverbed area known as “Yakut Robbery”. The rates and volumes of channel deformations as well as the effect of seasonal freezing and perennial frozen upon these processes were estimated. Together with flow cinematic calculations for affluent phase of water regime it helped developing the prognostic assessment of channel processes and their impact on engineering facilities and navigation conditions.

УДК 551.435.8(282.251.2)

© 2008 г. Е.А. КОЗЫРЕВА, Ю.Б. ТРЖЦИНСКИЙ, О.А. МАЗАЕВА

КАРСТОВО-ОПОЛЗНЕВЫЕ И КАРСТОВО-ЭРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛОКАЛЬНЫХ ГЕОСИСТЕМАХ БЕРЕГОВЫХ ЗОН БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Береговые массивы искусственных водоемов находятся в особых инженерно-геологических условиях, определяющихся общим состоянием геологической среды, развитием унаследованных и вновь сформировавшихся экзогенных процессов, а также режимом эксплуатации искусственного водоема, контролируемым человеком. Состояние локальной природно-техногенной геосистемы является следствием сочетания природного потенциала данной территории (другими словами “запасом прочности”), с одной стороны, и техногенных нагрузок, с другой. При освоении и использовании береговых зон искусственных водоемов важно оценить и правильно распоряжаться природным потенциалом того или иного участка побережья, учитывая динамику его развития, и осуществлять продуманное вмешательство человека в природную среду, направленное на стабильное развитие системы в целом, а также комфортное проживание людей.

В связи с созданием Ангарского каскада ГЭС в зону влияния водохранилищ вовлечены громадные территории. Береговые геосистемы отличаются геолого-геоморфологическими условиями, набором процессформирующих факторов, величиной воздействия техногенной нагрузки и, следовательно, по-разному реагируют на таковую, демонстрируя различную динамику и активность проявления экзогенных геологических процессов.

Братское водохранилище является самым крупным искусственным водоемом в Ангарском каскаде ГЭС. В мировом списке крупных водохранилищ оно находится на втором месте по объему водной массы (169.3 км^3) и на четвертом по площади акватории (около 5500 км^2). Величина подпора у створа ГЭС в районе города Братска составляет 105 м. Его максимальная ширина в озеровидных расширениях достигает 10–12 км, а общая протяженность берегов составляет 6000 км [1]. По характеру стока водохранилище является регулятором многолетнего вида с полной величиной понижения уровня до 10 м при ежегодном колебании в пределах 2–3 м.

Береговые массивы в южной части водоема сложены породами красноцветной терригенно-карбонатной формации (доломиты, доломитизированные известняки, аргиллиты, алевролиты), а в северной – терригенной и карбонатно-терригенной формациями (песчаники, доломиты, алевролиты), а также сверхпрочными траппами. Субаэральное флювиогляциальные рыхлые отложения представлены делювиальными суглинками и