

С.Р. ЧАЛОВ, М.К. ТАРАСОВ, А.С. ЧАЛОВА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия,
srchalov@geogr.msu.ru, mixail.tarasov@gmail.com, aleksandra-1984@mail.ru

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА НАНОСОВ В ПРЕДЕЛАХ РАЗВЕТВЛЕННОГО РУСЛА РЕКИ ЛЕНЫ

На основе моделирования мутности воды по данным коллекции снимков Landsat за 1992–2018 гг. дана высокодетальная (разрешение 30 м) характеристика стока взвешенных наносов для 200-километрового разветвленного русла р. Лены от г. Покровска до устья р. Алдан (выше Алданского разветвления). Показано, что крупные разветвленные участки соответствуют смене систем транзита и аккумуляции наносов, проявляющейся в преобладании случаев положительных (увеличение) или отрицательных (снижение) значений баланса мутности ΔS_0 . Условия продольного снижения мутности по длине разветвленных участков р. Лены характеризуются высокими ($>20\,000\text{ м}^3/\text{с}$) расходами воды и связаны с аккумуляцией наносов на перекатах и затапливаемых участках поймы. Установлено, что значительную роль в продольном снижении мутности воды играют боковые пойменные протоки, аккумулирующие часть поступающей взвеси и оказывающие разбавляющее воздействие ниже соединения с основным руслом на поток наносов. Случаи продольного увеличения мутности воды соответствуют пониженным ($<20\,000\text{ м}^3/\text{с}$) расходам воды и объясняются активизацией размывов берегов, в том числе за счет термоэрозии в летний период, а также размывом перекатных участков в межень. На основе совмещения сетки мутности воды, скоростей и глубин русла с разрешением $30 \times 30\text{ м}$ (более 20 000 ячеек) для меженных условий выявлена зависимость локальной мутности воды от транспортирующей способности потока, определенной для отдельных вертикалей. При этом прослеживается соответствие между режимом отдельных участков в разные фазы водного режима. Подобное соответствие свидетельствует о взаимовлиянии направленности массообмена и морфологии русла. Трансформацию систем распределения взвешенных наносов можно рассматривать как один из механизмов саморегулирования в русловой системе. Сложные системы распределения потоков наносов по длине русла крупной реки отражают противоположную направленность эрозионно-аккумулятивных процессов, вызванных перегибами продольного профиля.

Ключевые слова: мутность воды, баланс наносов, методы дистанционного зондирования, разветвленное русло, распределение стока по рукавам.

S.R. CHALOV, M.K. TARASOV, A.S. CHALOVA

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia,
srchalov@geogr.msu.ru, mixail.tarasov@gmail.com, aleksandra-1984@mail.ru

PATTERNS OF SUSPENDED SEDIMENT LOAD SEASONALITY ALONG THE LENA RIVER BRAIDED CHANNEL

Based on water sediment concentration modeling using the collection of Landsat images for the period 1992–2018, highly detailed (30-m resolution) features of suspended sediment load along the 200-km braided channel reach of the Lena river from Pokrovsk to the mouth of the Aldan river (upstream of the Aldan braiding) are described. It is shown that large anabranching river reaches correspond to changes of the system of sediment transport and accumulation manifesting themselves as a predominance of occurrences of positive (increase) or negative (decrease) ΔS_0 values (where ΔS_0 stands for suspended sediment concentration budget). The conditions of longitudinal decrease in suspended sediment concentration along the length of the braided reach of the Lena river are characterized by high water discharges ($>20\,000\text{ м}^3/\text{с}$) and are associated with sediment accumulation at riffles and floodplain areas. It is established that a significant role in the longitudinal decrease in water sediment concentration is played by lateral floodplain branches which accumulate a part of the incoming suspended sediments and have a dilution influence on the sediment flow downstream of the confluence with the main channel. Cases of a longitudinal increase in water suspended sediment concentration are typical for the lower water flow rates ($<20\,000\text{ м}^3/\text{с}$) and are connected increased bank erosion due to thermal erosion in summer as well as erosion of riffles during a low-water period. A combination of the grid of suspended sediment concentration, velocities and channel depths with a $30 \times 30\text{-m}$ resolution (more than 20 000 cells) for low-water conditions revealed a dependence of local suspended sediment concentration on the transporting capacity of the flow

which was determined for separate verticals. A correspondence between the regime of certain reaches in different phases of water regime is observed. Such a correspondence indicates the mutual influence of the directedness of mass exchange and channel morphology. The transformation of distribution systems of suspended sediments can be interpreted as one of the self-regulation mechanisms in the channel system. Complex systems of sediment flow distribution along the channel of a large river reflect the opposite directedness of erosion-accumulation processes caused by bends in the longitudinal profile.

Keywords: *suspended sediment concentration, sediment budget, remote sensing methods, braided channel, runoff distribution in branches.*

ВВЕДЕНИЕ

Водный режим — основной фактор русловых процессов, определяющий, в частности, динамику русел больших разветвленных рек. Тенденция к увеличению распространения разветвленных русел на крупнейших водотоках [1, 2] объясняется влиянием водности на особенности баланса наносов локальных участков рек. Роль ее сезонных изменений прослеживается в увеличении степени разветвленности при увеличении изменчивости расходов воды [3]. Сезонные изменения распределения стока воды и наносов в разветвлениях определяют развитие осередков и островов [4, 5], а повышения уровня воды из-за распространения подпора — формирование новых рукавов в разветвлениях [5]. Изменчивость характеристик потока в разветвленных руслах с изменением расходов воды происходит нелинейно: увеличение смоченного периметра русла, средних скоростей потока и касательных напряжений может наблюдаться лишь в периоды экстремально высоких половодий [6].

Сезонная динамика баланса наносов, связанная с его существенным изменением в период прохождения высоких паводков (половодий), лишь в последние годы стала предметом исследований в связи с развитием дистанционных методов анализа мутности воды [7]. Внедрение последних в практику исследований основано на эффекте зависимости мутности воды от отражающей способности снимков и связано с использованием различных спутниковых систем разного пространственного разрешения — от Landsat до MODIS. При дешифрировании неглубоких рек на снимке чаще всего применяется ближняя инфракрасная (БИК) или красная зоны спектра, которые отображают распространение приповерхностной взвеси [8, 9]. Выбор зоны БИК более удачен при дешифрировании отмелых участков рек и побережий, так как максимально устраняется эффект влияния дна. Однако в данной зоне возрастают эффекты влияния фитопланктона, если он содержится в воде. В этих случаях красная зона подходит лучше. Зеленая и голубая используются для дешифрирования взвеси в глубоких водоемах, поскольку данные зоны показывают распространение взвеси на глубине до 30 м в зависимости от прозрачности воды в водоеме [10].

В качестве объекта исследования выбрана р. Лена в районе Якутска, русловые процессы которой относительно хорошо изучены [11–13]. По длине Якутского разветвления были ранее выявлены сезонные особенности продольного изменения транспортирующей способности [14], характеризующие возникновение условий для аккумуляции наносов в период прохождения высоких вод и, наоборот, эрозии — в период межени. Эмпирическое подтверждение этих оценок данными о сезонных изменениях стока наносов отсутствовало, в то же время оно крайне важно для понимания переформирования русла и разработки рекомендаций по управлению русловыми процессами. В настоящей работе впервые на основе технологии дистанционного определения мутности проводится исследование сезонной трансформации стока наносов по данным снимков спутникового зондирования Landsat в разветвленном русле р. Лены, что и является целью работы. Были поставлены следующие задачи: адаптировать методику ретроспективной оценки баланса взвешенных наносов по спутниковым снимкам Landsat; определить системы продольного изменения стока взвешенных наносов; на основе многомерного ГИС-анализа выявить гидравлические факторы трансформации мутности воды.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Участок р. Лены от г. Покровска до устья р. Алдан (выше Алданского разветвления) (рис. 1) представляет собой широкопойменное песчаное русло, находящееся в свободных условиях развития русловых деформаций. Оно неустойчивое или слабоустойчивое, повсеместно разветвленное на рукава. Группы островов или отдельные острова вытянуты цепочкой вдоль реки, отделяя друг от друга основные рукава, проходящие возле берегов. пойменная многорукавность развита слабо, хотя узкие извилистые протоки расчленяют пойму на отдельные массивы. Ширина русла вместе с островами составляет от 2 до 10 км.

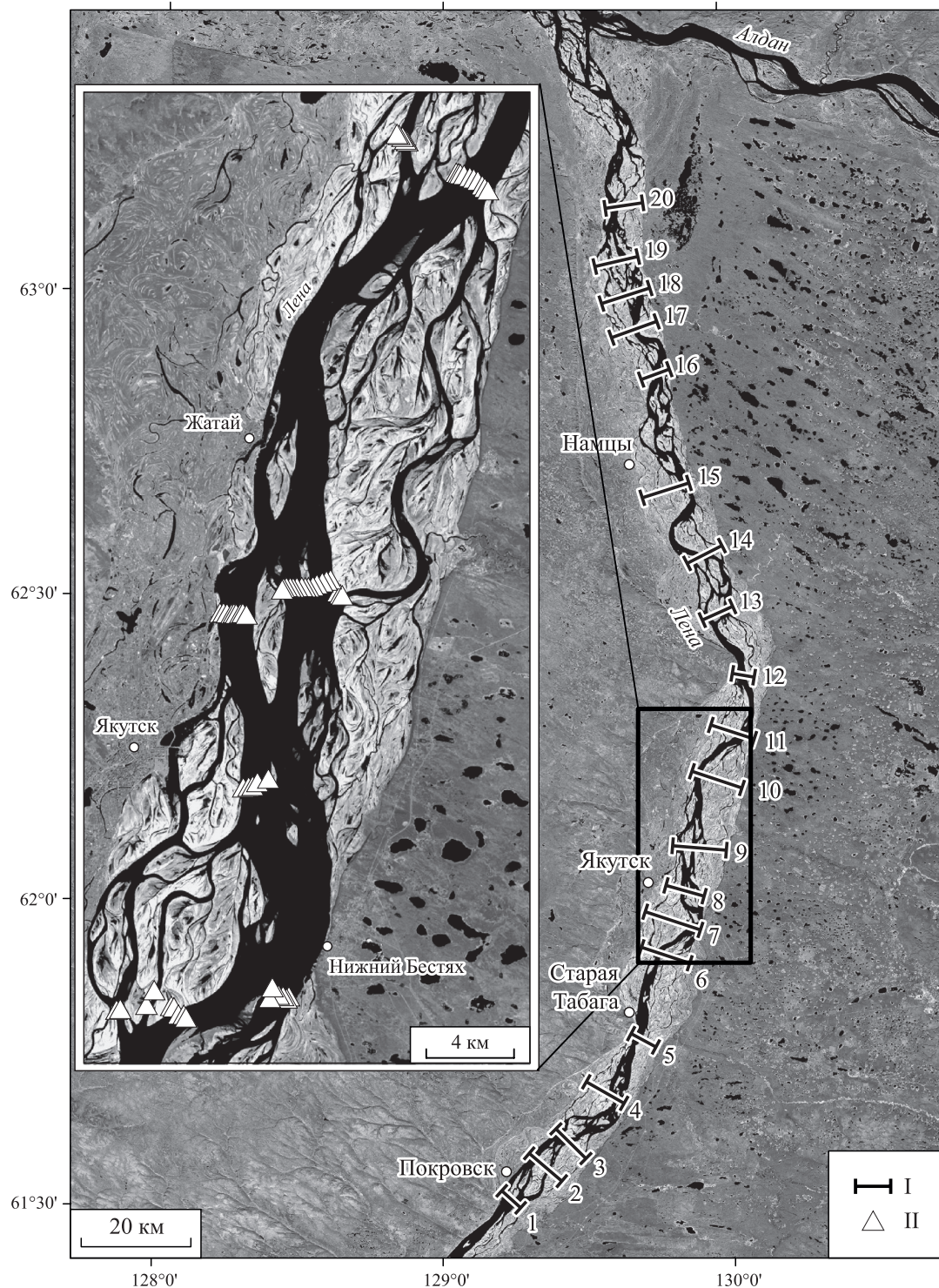


Рис. 1. Положение поперечных профилей мутности р. Лены на участке от г. Покровска до устья р. Алдан. I — поперечные профили; II — точки измерения мутности воды, использованные для построения зависимости (1).

В качестве эталонного снимка для расчета зависимости яркости пикселей на снимке от мутности воды был выбран красный канал Landsat 8/OLI от 9 июля 2016 г. На основе этого снимка проведена калибровка значений отражающей способности пикселей спутникового изображения по данным об измеренной мутности воды в пределах Якутского узла р. Лены (21 измерение мутности в диапазоне от 5 до 25 мг/л, выполненное также 9 июля 2016 г.). Это позволило создать модель с высокой точностью определения концентрации взвеси. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,91$, что говорит о высокой связи параметров, среднее отклонение смоделированных значений от полевых составило 1 мг/л. Формула расчета мутности воды:

$$S = 540,27\rho - 2,611, \quad (1)$$

где S — мутность воды, мг/л; ρ — коэффициент отражения на снимке.

Распределение мутности воды рассчитано для 62 ситуаций (дней), полученных на основе снимков спутников Landsat 5, 7, 8 (62 снимка за период 1989–2018 гг.) с разрешением 30 м при расходах воды р. Лены (г.п. Табага) в интервале от 4760 м³/с (09.09.2015) до 36 300 м³/с. В анализе участвовали снимки только безледного периода с июня по сентябрь включительно. На первом, предварительном, этапе были подготовлены снимки. Целиком территория изучения попадает только на два смежных кадра спутника. Для тех ситуаций, когда два кадра за одну дату были доступны, составлены мозаики. После этого проведена радиометрическая и атмосферная коррекция снимков методом QUAC (Quick Atmospheric Correction), чтобы значения яркости для серии снимков стали сопоставимы. Для большей точности проведена дополнительная атмосферная коррекция каждого снимка методом темных объектов. После этого все снимки были пересчитаны в значения концентрации взвешенных частиц, согласно формуле, представленной выше. Для всех 62 снимков получены картографические отображения распределения мутности воды.

Для расчета баланса взвешенных наносов в пределах участков рассредоточения стока наносов выделено четыре модельных участка (рис. 2) — Рассолодское у г. Покровска (1) и Якутское (2) разветвления, участок между Кангаласским мысом и Песчаной горой (3) и Хайтылаакское разветвление (4). В пределах каждого из них установлено 4–6 поперечных профилей, расположенных примерно через каждые 10 км на разных уровнях рассредоточения стока (всего 20 профилей). Каждый профиль состоял из набора точек, построенных по сетке 100 × 100 м, в пределах полосы 400 м поперечного



Рис. 2. Продольное изменение баланса мутности воды (диапазон без выбросов, среднее, стандартная ошибка (STD) и доверительный интервал 25–75 %) по длине р. Лены от г. Покровска до устья р. Алдан (створы см. рис. 1) (62 ситуации в период с 1992 по 2018 г.).

сечения речной долины и включал в себя, в зависимости от ширины русла, от 200 до 400 точек (см. рис. 1). Для поперечных профилей рассчитывались характеристики мутности воды. Баланс мутности воды вычислялся как отношение мутности каждого последующего створа n к предыдущему $n - 1$ (ΔS_0):

$$\Delta S_0 = (S_n - S_{n-1})/S_{n-1}. \quad (2)$$

Определялась статистика величины ΔS_0 из всей выборки 62 ситуаций, а также индекс интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов ΔS_1 , рассчитанный по модулю значения баланса мутности:

$$\Delta S_{01} = \Sigma|\Delta S_0|/n, \quad (3)$$

где n — число ситуаций в выборке. Для построения продольных профилей распределения мутности использовался модуль 3DAnalyst и инструмент Interpolate line и Profile Graph. Полученные значения профилей мутности экспортировались в Microsoft EXCEL.

Для оценки факторов изменений мутности воды выполнялось сопоставление расчетного поля значений мутности 11.09.2016 и измеренных экспедицией Московского государственного университета скоростей течения (придонной V_{bot} и поверхностной V_{surf} , м/с) по регулярной сетке (50×50 м) с извлечением значений мутности и скорости течения в них на 5-километровом участке в районе г. Якутска. Для каждой ячейки растра проводилось определение транспортирующей способности потока по формуле, соответствующей насыщению потока русловыми фракциями [15]:

$$R_{тр} = k \frac{v^3}{hu}, \quad (4)$$

где $k = 0,024$; v — скорость потока, м/с; h — глубина, м; u — гидравлическая крупность, м/с. По смыслу величина $R_{тр}$ равна мутности S_p , которая обеспечена наличием в воде частиц условного генезиса, участвующих в обмене между потоком и русловыми отложениями. В каждом узле сетки были получены данные о скорости течения. Учитывая большой массив информации (более 20 000 значений), исходные данные о скорости объединены в 16 классов (полигонов) с шагом 0,1 м/с (0–0,1 м/с; 0,1–0,2 м/с и т. д.). Для каждого соответствующего полигона реки (класса скоростей) определены средние значения мутности и глубин русла. Все расчеты выполнялись в среде ARCGIS.

Также анализировался фактор изменения площади водной поверхности для сегментов русла между расчетными створами мутности воды в пределах пояса руслоформирования (границ поймы) на основе классификации снимков Landsat. Классификация осуществлялась путем отделения водной поверхности от поверхности суши по граничному значению на снимке Landsat в ближнем инфракрасном канале. Определялись площадные характеристики распределения разных условий затопления: площадь водной поверхности основного русла и проток F_1 ; площадь водных объектов на пойме F_2 , не имеющих связи с основным течением реки; площадь водных объектов на островах F_3 , не имеющих связи с основным течением реки; площадь поймы F_4 ; площадь островов F_5 , а также различные отношения этих величин. Характеристики затопления выявлялись для разных ситуаций (1 июля 2007 г. при расходе 24 700 м³/с, 15 июня 2007 г. при расходе 36 300 м³/с и 9 сентября 2015 г. при расходе воды 4760 м³/с).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменение мутности воды по длине р. Лены демонстрирует сезонную ритмику: в период повышенного стока наблюдается тенденция к продольному снижению содержания взвешенных веществ, в межень — к их увеличению. Анализ сезонных изменений мутности воды выполнялся для смежных профилей по длине исследуемого участка реки. В его пределах прослеживаются четыре сменяющиеся системы участков транзита и аккумуляции (см. рис. 2), проявляющихся в преобладании случаев положительных (увеличение) или отрицательных (снижение) значений ΔS_0 . Каждый из них соответствует крупным системам разветвленного русла (см. рис. 1).

На фоне сезонной изменчивости баланса мутности воды самые сильные ее градиенты характерны для Якутского разветвления р. Лены. Если в верхней части участка в узле рассредоточения стока и формирования комплекса пойменных Городских проток отмечаются самые высокие темпы продольного увеличения стока взвешенных наносов ($\Delta S_0 = 6$ мг/л), то в районе параллельно-рукавного разветвления у о. Пономарев наблюдается снижение средней мутности воды (среднее для 62 ситуаций) с градиентом между соседними профилями (8–9) до $\Delta S_0 = -3$ мг/л.

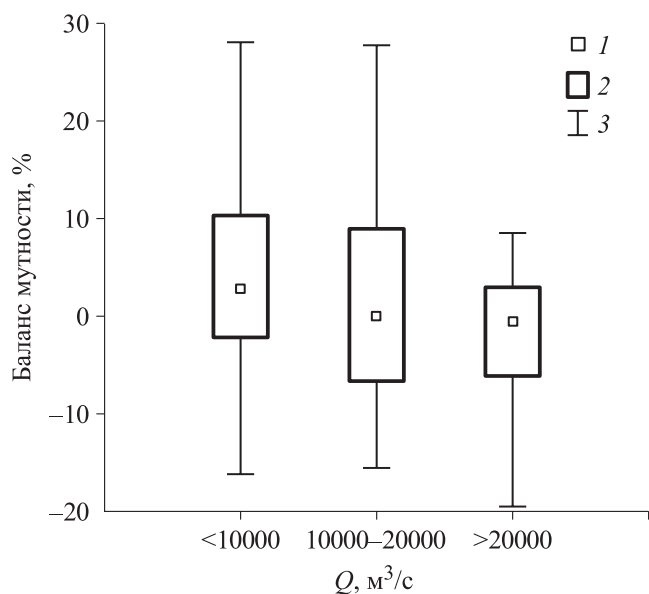


Рис. 3. Баланс мутности воды ΔS_n по длине участков рассредоточения стока воды р. Лены при разных расходах воды по г.п. Табага (62 ситуации в период с 1992 по 2018 г.).

Для анализа влияния рассредоточения стока на трансформацию мутности воды проведен расчет ее баланса для разных интервалов расходов воды (рис. 3). Сопоставлялись значения мутности на верхнем створе (выше участка рассредоточения стока) и на нижнем уровне рассредоточения стока. Были посчитаны балансы мутности ΔS_n для следующих пар профилей: в пределах разветвленного участка 1 у г. Покровска — между створами 1 и 3; на разветвленном участке у г. Якутска — между створами 6 и 9, а также 6 и 10; в пределах Хайтыаалахского разветвления — между створами 16 и 19. При про-

хождении высоких расходов воды (более 20 000 м³/с) преобладают аккумулятивные процессы, когда величина ΔS_n снижается до -4 %, в доверительном интервале 25–75 % изменяется в интервале от +1 до -9 %.

Анализ 62 карт распределения мутности воды за период с 1992 по 2018 г. позволил выделить три типовые системы распределения мутности по длине реки: продольного уменьшения (1), продольного увеличения (2) и поперечной неоднородности (3), связанной с формированием повышенной мутности под одним из берегов.

При первом типе распределения снижение мутности воды по длине 200-километрового участка наблюдается при разных расходах воды, однако всегда $\Delta S_0 < 0$ при максимальных расходах воды ($Q > 20\,000$ м³/с). Выявляются участки резкого снижения содержания взвешенных частиц на фоне общего тренда. В частности, указанный выше участок параллельно-рукавного разветвления у о. Пономарев представляет собой пример снижения мутности с 15–16 до 13–14 (длина участка около 20 км), т. е. существенно влияет на изменение мутности на всем 200-километровом участке Лены.

При втором типе распределения последовательное увеличение стока взвешенных наносов выявляется в ряде случаев при низких расходах воды (<20 000 м³/с). Анализ снимков показал, что при отсутствии выраженного поступления наносов с притоками основной фактор продольного изменения мутности — это русловые источники взвешенных наносов, вероятно, определяемые интенсификацией размывов берегов, а также подъемом взвеси в приповерхностные слои из придонных горизонтов на перекатных участках реки.

Поперечная неоднородность распределения мутности воды встречается более чем в 10 % случаев. Она связана с поступлением мутных вод (>100 мг/л) из притоков в период прохождения коротких паводков. Характерно, что протяженность выраженных поперечных перекосов мутности в условиях пойменно-русловых разветвлений русла распространяется более чем на 100 км.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сезонная изменчивость продольного баланса мутности может быть связана с влиянием особенностей затопления островов, сезонной динамикой перекатных участков и плановых переформирований русла. При расходах воды более 20 000 м³/с многократно увеличиваются площади затопления. При расходе воды 24 700 м³/с затопленными оказываются около 27 км² отдельных островов или групп островов, а при расходе 36 300 м³/с — 52,6 км². Существенных статистически достоверных связей между осредненными за весь период и определенными для разных ситуаций значениями баланса мутности ΔS_0 и площадными характеристиками условий затопления не прослеживается. Исключение составляют зависимости (коэффициенты корреляции $\text{cor} > 0,6$) площади водной поверхности в пределах пояса руслоформирования $F_1 + F_2 + F_3$ (км²) при ситуациях прохождения максимальных расходов

воды (01.06.2007 при расходе 24 700 м³/с, 15.06.2007 при расходе 36 300 м³/с) и максимальных значений баланса мутности профилей $\Delta S_{0\text{макс}}$ (в %) среди всех 62 ситуаций. Учитывая, что величина $\Delta S_{0\text{макс}}$ характеризует предельные значения продольного увеличения мутности, наблюдаемые только при пониженных расходах воды, очевидна связь между балансом наносов в половодье и в межень. Она объясняется тем, что максимальные площади водной поверхности в половодье $F_1 + F_2 + F_3$ (км²) соответствуют наиболее неустойчивым перекатным участкам, где в половодье происходит затопление обсыхающих в межень побочней, из-за этого — увеличение площади живого сечения, снижение уклонов и транспортирующей способности и последующая аккумуляция наносов [2]. На перекатных участках усиливается эффект гашения энергии при взаимодействии русловых и пойменных потоков (так называемый кинематический эффект Железнякова) [14].

В дальнейшем в межень по мере увеличения уклонов русла из-за формирования подпорного эффекта от переката начинается его размыв, что приводит к общему увеличению мутности воды. Аккумуляционный материал при снижении расходов воды и концентрировании потока в бровках поймы становится доступным и повторно взмучивается. Особую роль в продольном увеличении мутности воды в межень может играть взмучивание наносов, поступающих с боковыми притоками в период коротких паводков и перетлающихся на дне большого русла Лены. Паводки, сгенерировавшие их поступление, быстро распластываются в пределах русла реки, что в конечном счете приводит к перенасыщению потока наносами и переходу частиц мелких фракций из взвеси в донные наносы, в первую очередь как раз на участках максимальных значений затопления $F_1 + F_2 + F_3$. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение среднего диаметра донных частиц. После прохождения волны концентрация мелких частиц в составе взвешенных наносов снижается, в результате чего происходит повторное взмучивание мелкодисперсных частиц из донных наносов в состав взвешенных, фиксируемое в системах продольного изменения мутности воды. Такие эффекты ранее описывались для других крупных рек [16].

Также прослеживается влияние относительной площади изолированных водных объектов (пойменных озер) $(F_2 + F_3)/F_1$ на интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов ΔS_1 (среднее значений модулей баланса мутности) ($\text{сog} > 0,5$). Увеличение индекса $(F_2 + F_3)/F_1$ наблюдается в период пониженного стока за счет отчленения элементов гидрографической сети. Отмеченная тенденция увеличения ΔS_1 с ростом величины $(F_2 + F_3)/F_1$ объясняется интенсификацией массообмена именно в период пониженного стока за счет концентрирования потока в русловом сегменте и взмучиванием донных отложений. Сходные системы продольного снижения мутности в период повышенного стока ранее были отмечены в нижнем течении р. Амазонки [17], где большую роль играет поступление наносов из основного русла в пойменные озера. При прохождении максимальных расходов воды обнаруживаются максимальное количество перетоков из русла в пойму и значительные снижения концентрации взвешенных наносов из-за очень сильного увеличения расхода воды. Порядка 80 % общего притока воды в отдельные пойменные озера переносится основным потоком, а сток наносов из основного русла составляет порядка 50 % от годового стока наносов на пойму. Характерны случаи, когда в период повышенного стока значения мутности воды в них снижаются на 20–30 мг/л по сравнению с таковыми для основного русла. При этом в долине Амазонки в период низкого стока мутность воды оказывается выше в озерах по сравнению с основным руслом из-за взмыва ранее отложившихся частиц под действием ветровой эрозии [17]. Для крупных пойменных озер долины Амазонки зафиксированы потоки, формирующиеся в результате ветровых штормов, со значениями содержания взвешенных частиц до 1600 мг/л.

Определенную роль в увеличении мутности воды в межень может играть и эрозия, в том числе термоэрозия, характерная для исследуемого участка р. Лены и активизирующаяся в меженный период [18]. Важное место размыва берегов в формировании полей мутности соответствует современным представлениям о стоке наносов на участке среднего течения Лены. Так, согласно расчетам А.С. Завадского и Д. Большакова (неопубликованные данные), за счет береговой эрозии в водный поток на участке от г. Покровска до устья р. Алдан поступает порядка 2,8 млн т/год наносов, что соответствует 20 % от суммарного стока.

Таким образом, важнейшая роль в объяснении пространственно-временных систем распределения мутности в пределах русловых систем принадлежит гидравлическим факторам. Отдельно анализировался 5-километровый участок в районе г. Якутска для периода средней водности (12 400 м³/с, 09.07.2016 г.), который соответствует ситуации продольного увеличения мутности воды. Выявлены статистически достоверные связи между скоростью потока (придонной и поверхностной), транспор-

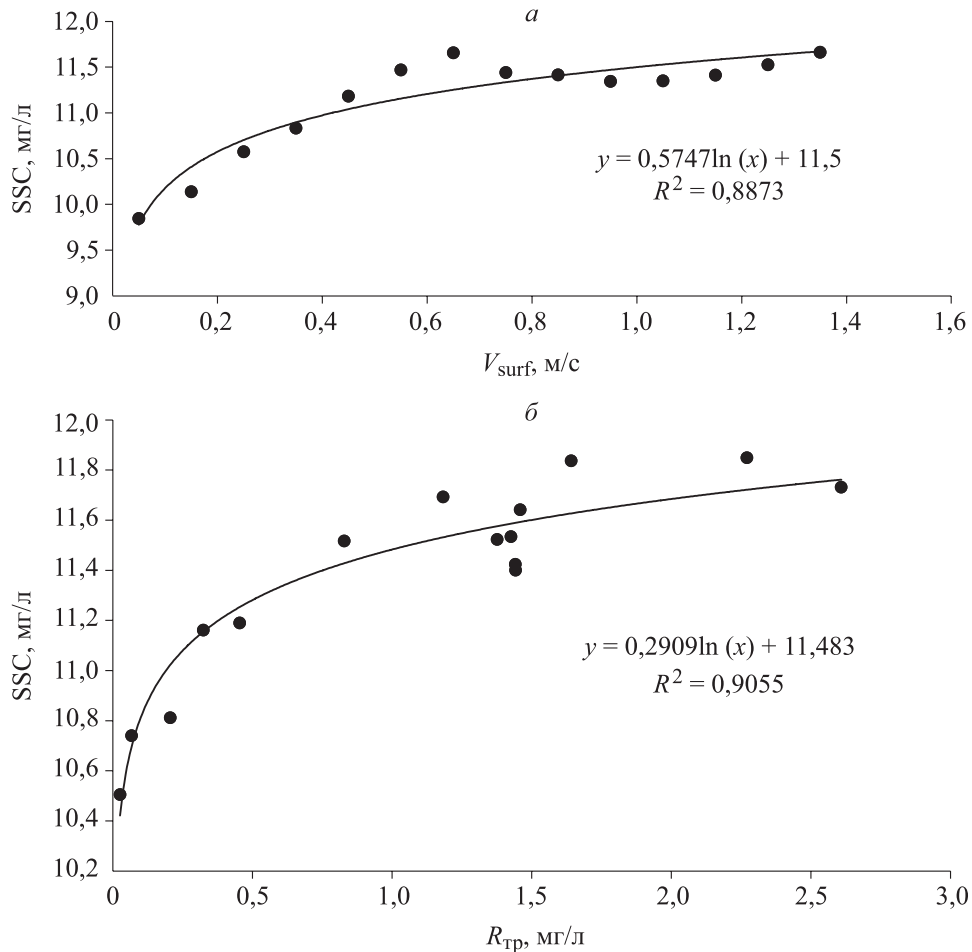


Рис. 4. Зависимости концентрации взвешенных частиц в воде, осредненной для разных скоростных сегментов русла (с шагом 0,1 м/с), от поверхностной скорости течения (а) и транспортирующей способности (б) по съемке 09.07.2016.

тирующей способностью потока R_{tr} и величиной мутности воды (S), осредненных для 16 классов скоростей с интервалом 0,1 м/с (рис. 4). Логарифмический вид зависимости характеризует существование предельных условий транспорта наносов во взвешенном состоянии. Увеличение скоростей (придонной и поверхностной) до 0,5 м/с сопровождается быстрым ростом значений мутности воды. При больших значениях скоростей показатели мутности остаются постоянными. В системах распределения мутности это проявляется в осветлении мелких боковых пойменных проток с замедленным течением, в которых мутность на 15–20 % ниже, чем в основном русле. Исходя из этого подтверждаются наносорегулирующие функции разветвленного русла [19], связанные как с трансформацией суммарного стока наносов в условиях рассредоточения потока по рукавам, так и с зависимостью распределений расходов наносов от режима рукавов [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционные методы определения мутности воды основаны на региональных калибровочных зависимостях между коэффициентом спектральной яркости и мутностью воды. Алгоритм работы со спутниковыми данными предполагает создание региональных зависимостей, связанных с отличиями состава взвеси. В работе впервые реализована методика дистанционного определения мутности воды протяженного (200-километрового) участка р. Лены за продолжительный период с 1992 по 2018 г. Полученные данные о транспорте взвешенных наносов крупной равнинной реки характеризуют его сезонные особенности.

1. По длине широкопойменных рек сток наносов характеризуется внутригодовым механизмом накопления-выноса материала, работающим как своеобразный маятник: продукты эрозии преимущественно переотлагаются в пойменно-русловом комплексе в периоды повышенного стока, что приводит к продольному снижению стока наносов на бесприточных участках рек.

2. Значительную роль в продольном снижении мутности воды играют боковые пойменные протоки, аккумулирующие часть поступающей взвеси и оказывающие разбавляющее воздействие ниже соединения с основным руслом на поток наносов. В межень достоверно прослеживается увеличение мутности воды на перекатных участках, что связано с их размывом.

3. Сделанные выводы подтверждают гипотезу о гидравлических факторах снижения мутности воды в пределах разветвленных участков рек при прохождении высоких расходов воды [14] за счет снижения уклонов русла и возникновения дополнительных сопротивлений в связи с затоплением пойменных массивов. Обнаружено существование статистически достоверных связей измеренной скорости потока V и транспортирующей способности потока $R_{тр}$ с величиной мутности воды, определенных для конкретных вертикалей. Полученные наработки значительно расширяют фундаментальное представление о закономерностях транспорта взвешенных наносов больших равнинных рек.

Расчеты баланса наносов, обработка космических снимков и анализ морфодинамики русла выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (21-17-00181, 18-17-00086), полевые работы — при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-05-60219 Арктика).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Latrubesse E.M.** Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of megarivers // *Geomorphology*. — 2008. — Vol. 101, Iss. 1–2. — P. 130–145.
2. **Чалов Р.С.** Русловедение: теория, география, практика. Т. I: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — 608 с.
3. **Egozi R., Ashmore P.** Experimental Analysis of Braided Channel Pattern Response to Increased Discharge. [Электронный ресурс]. — <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2008JF001099> (дата обращения 4.03.2020).
4. **Nicholas A.P.** Modelling the continuum of river channel patterns // *Earth Surf. Process. Landforms*. — 2013. — Vol. 38, Iss. 10. — P. 1187–1196.
5. **Schuurman F., Kleinhans M.G.** Bar dynamics and bifurcation evolution in a modelled braided sand-bed river // *Earth Surf. Process Landforms*. — 2015. — Vol. 40, Iss. 10. — P. 1318–1333.
6. **Ashmore P., Sauks E.** Prediction of discharge from water surface width in a braided river with implications for at-station hydraulic geometry // *Water Resources Research*. — 2006. — Vol. 42, Iss. 3. — P. W03406.
7. **Чалов С.Р., Базилова В.О., Тарасов М.К.** Баланс взвешенных наносов в дельте Селенги в конце XX — начале XXI века: моделирование по данным снимков Landsat // *Водные ресурсы*. — 2017. — № 44 (3). — С. 332–339.
8. **Froidefond J., Lahet F., Hu C., Doxaran D., Guiral D., Prost M., Ternon J.F.** Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana // *Marine Geology*. — 2004. — Vol. 208, Iss. 2–4. — P. 153–168.
9. **Pavelsky T.M., Smith L.C.** Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada // *Water Resources Research*. — 2009. — Vol. 45, Iss. 11. — P. W11417.
10. **Лабуткина И.А., Сафьянов Г.А.** Исследования распространения твердого стока рек по аэрокосмическим снимкам на примере Кодора и Селенги // *Космическая съемка и тематическое картографирование*. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. — С. 118–225.
11. **Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлёв П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В.** Покровско-Якутский водный узел на р. Лене: современные деформации и управление русловыми процессами // *Изв. РАН. Сер. геогр.* — 2019. — № 6. — С. 83–96.
12. **Кузьмина Е.М., Чалова А.С., Чалов Р.С., Сахаров А.И.** Ранжирование участков реки Лены по сложности русловых процессов и управления // *География и природ. ресурсы*. — 2020. — № 1. — С. 138–146.
13. **Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлёв П.П., Сахаров А.И.** «Разбой» Рассолода на р. Лена: русловой режим и управление им с целью улучшения водного пути // *Речной транспорт (XXI век)*. — 2020. — № 2. — С. 25–31.
14. **Алексеевский Н.И., Чалов С.Р.** Гидрологические функции разветвленного русла. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. — 240 с.
15. **Россинский К.И., Кузьмин И.А.** Балансовый метод расчета деформаций дна потока // *Труды Гидропроекта*. — 1964. — Сб. 12. — С. 265–271.

16. **Dean D.J., Topping D.J., Schmidt J.C., Griffiths R.E., Sabo T.A.** Sediment supply versus local hydraulic controls on sediment transport and storage in a river with large sediment loads // Journ. of Geophysical Research, Earth Surface. — 2016. — Vol. 121, Iss. 1. — P. 82–110.
17. **Park E., Latrubesse E.M.** Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data // Remote Sensing of Environment. — 2014. — Vol. 147. — P. 232–242.
18. **Дебольский В.К., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Масликова О.Я.** Размытие мерзлых берегов северных рек в зависимости от направления берегового уклона // Вестн. Моск. строит. ун-та. — 2018. — Т. 13/9. — С. 1112–1124.
19. **Chalov S.R., Alexeevsky N.I.** Braided rivers: structure, types and hydrological effects // Hydrology Research. — 2015. — Vol. 46, N 2. — P. 258–275.
20. **Meunier P., Metivier F., Lajeunesse E., Meriaux A.S., Joel F.** Flow pattern and sediment transport in a braided river: the “torrent de St Pierre” (French Alps) // Journ. of Hydrology. — 2006. — Vol. 330. — P. 496–505.

Поступила в редакцию 12.05.2020

После доработки 09.12.2020

Принята к публикации 24.06.2021