

УДК 551.482.6: 551.459 (571.54)
DOI: 10.18101/2542-0623-2019-2-95-107

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РУСЛОВОЙ СЕТИ ДЕЛЬТЫ СЕЛЕНГИ

Е. А. Ильичёва, М. В. Павлов, А. П. Рогачёв

© **Ильичёва Елена Анатольевна**
кандидат географических наук,
Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: lenail3663@mail.ru

© **Павлов Максим Валерьевич**
ведущий инженер,
Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: maksimpavlov_v@mail.ru

© **Рогачёв Аркадий Петрович**
магистрант,
Иркутский государственный университет,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 А
E-mail: arogachov25@gmail.com

В статье дана интегральная оценка объемов эрозии, аккумуляции и транспорта наносов в дельте реки Селенги на основе анализа гипсометрических моделей рельефа субэаральной поверхности. Комплексный подход к изучению дельтоформирования в условиях зарегулированного приемного водоема с применением цифровой обработки географических данных позволил оценить объемы аллювия, участвующего в эрозионно-аккумулятивной деятельности. Выявлены относительно устойчивые участки русел и межукавных пространств в сопоставлении с участками, подверженными активным русловым деформациям. Представлены расчетные показатели эрозионно-аккумулятивной деятельности проток в сравнении с наблюдаемыми величинами стока наносов. Дана характеристика скоростей береговой эрозии, смещения узлов бифуркации, плановых русловых деформаций в целом. Выявлены факторы переформирования русловой сети и роль источников поступления наносов для дельтоформирования.

Ключевые слова: модель рельефа; сток наносов; русловые деформации; дельта; Селенга; Байкал.

Для цитирования:

Ильичёва Е. А., Павлов М. В., Рогачёв А. П. Комплексная оценка эрозионно-аккумулятивной деятельности русловой сети дельты Селенги // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2019. № 2(11). С. 95–107. DOI: 10.18101/2542-0623-2019-2-95-107

Введение

Ведущим процессом рельефоформирования дельт выдвигания является флювиовививальный, обуславливающий эрозионно-аккумулятивную деятельность проток и транспорт наносов. Сток наносов в вершине дельты обеспечивает поступление материала с водосборного бассейна реки и затем существенно дополняется дельтовыми русловыми наносами. Важнейшую роль в формировании дельтовых наносов и междуречных пространств, по нашему мнению, играют локальные источники их поступления — продукты береговой эрозии и размыва речного русла. К локальным источникам поступления наносов мы относим в первую очередь узлы бифуркации проток дельты и сильно размываемые берега в вершинах излучин, где по эмпирическим данным резко увеличивается мутность потоков. Современный этап формирования дельты Селенги приурочен к техногенному подъему уровня Байкала и его установлению на фиксированных отметках. Повышение базиса эрозии привело к частичному затоплению и переформированию русловой сети дельты, выраженному появлением новых направлений стока и смене руслового процесса. Переформирование русловой сети дельты происходит постоянно, однако периоды экстремальной водности в бассейне приводят к кардинальным русловым деформациям и перестройке гидрографической сети в целом. За рассматриваемый период наблюдалось как минимум два значительных периода высокой водности. Сезонные колебания уровня Байкала приводят к врезанию или заполнению осадками приустьевых участков.

Таким образом, морфометрия субэдральной дельты непостоянна во времени за счет плановых изменений положения береговой линии озерного края и высотной динамики поверхности и непрерывной перестройки русловой сети. Под субэдральной дельтой нами понимается поверхность, заключенная между бровками позднелайстоценовых террас, главным узлом бифуркации в районе с. Малое Колесово и динамичной береговой линией озерного края дельты. Современное формирование дельты происходит внутри обозначенных границ.

Материал и методика

В основу исследований положен морфометрический анализ субэдральной поверхности дельты Селенги, выполненный по топографическим картам с применением гис-технологий. К цифровой обработке подобраны топографические карты единого масштаба 1956 г. издания, характеризующие пространственную ситуацию по материалам 1952 г., когда дельта находилась при воздействии естественных факторов рельефообразования, и 1998 г. издания (ситуация 1995 г.), отображающая морфометрию при высоком уровне Байкала и результирующем состоянии рельефа после стрессовых состояний системы «река — озеро». С карт снимались контуры береговых линий дельты, соответствующей уровню Байкала на год съемки, и плановое положение проток, а также высотные отметки на междуречных пространствах и на урезах в Балтийской системе высот (БС). Внутренние границы современной дельты проведены по бровкам позднелайстоценовых и голоценовых террас.

Данные об абсолютных высотах обработаны в геоинформационной системе QGIS (Quantum GIS) с использованием метода интерполяции данных «Нерегулярные триангуляционные сети» (Triangular Irregular Networks — TIN) — одним из способов цифрового отображения структуры поверхности. Результатом построений стали гипсометрические модели рельефа, отображающие плановую и высотную морфо-

В процессе переформирования русловой сети происходит смещение узлов бифуркаций, сопровождающееся размывом берегов и островов и русла.

Результаты и обсуждения

Процессы распределения и перераспределения стока наносов по рукавам дельт более сложны, чем аналогичные процессы для стока воды. Обычно в узлах разветвления дельтовых рукавов сток взвешенных наносов распределяется приблизительно пропорционально стоку воды. Однако вдоль рукавов такая пропорциональность уже не соблюдается: в активизирующихся рукавах доля стока взвешенных наносов больше доли стока воды (причина — дополнительное поступление наносов в результате размыва), а в отмирающих рукавах в связи с отложением наносов наблюдается противоположная картина.

Распределение крупности русловых наносов по протокам дельты во многом совпадает с границами геоморфологических районов [Павлов и др., 2016] и зависит в первую очередь от источников поступления или участков размыва берегов и скоростей потока. Основным источником их поступления служат песчаные отложения позднеплейстоценовых террас и специфичные сцементированные галечно-гравийные отложения более древних свит, размываемых рекой в главном узле бифуркации и ниже до узлов разветвления 2–3 порядков (рис. 2). Часто узлы разветвлений находятся на границах геоморфологических зон, и здесь происходит постепенное изменение состава и крупности руслового аллювия. Границы изменения состава аллювия нечеткие и могут простираться на 1–2 км вниз по течению [Dong et. al., 2016; Эколого-географический..., 2019].

Выявлена закономерность пространственного распределения руслоформирующих наносов от «главного» разбоя в вершине дельты до устьев проток. В целом руслоформирующие наносы дельты представлены в вершине и центральной части гравийно-песчаным материалом, по составу схожим с отложениями манзурской свиты, вскрываемой рекой на левом берегу в привершинной части дельты, а в устьевых участках — мелкозернистыми песками и илами (рис. 3). Окатанность гравийно-галечного материала в основном средняя. В районе главного узла разбоя встречаются хорошо окатанные гальки и единично валуны. Образование илов в периферийной части связано с активным продуцированием фитомассы в вегетационный период.

Прослеживается взаимосвязь скоростей потоков и крупности аллювия. Скорости в вершине дельты 1–2 м/с, к устьям проток — до 0,3 м/с. Накопление толщ аллювиальных отложений происходит в периоды значительной водности. К примеру, в летний паводок 2012 г. подъем уровня воды составил более 1,5 м в сравнении с измерениями 2011, мощность накопленного аллювия в русле составила 1,2 м. Береговая эрозия в паводок достигала 2,5 м/сут. Подобная интенсивность отмечена в период паводков 2013 г. За 1 месяц в вершине дельты отмыто почти 10 метров левого берега, и положение фарватера реки непостоянно даже в течение короткого временного промежутка.

Сток наносов реки, его временная изменчивость и распределение по рукавам оказывают огромное влияние на формирование русловой сети дельты, ее озерного края и устьевых баров, заиление дельтовых озер и другие процессы. Обильное отложение речных наносов в дельтовой области вызывает значительную изменчи-

Средний сток наносов, рассчитанный К. К. Вотинцевым, составлял 2,39 млн т, максимальный объем стока наносов (1947–1967 гг.) отмечался в 1961 г. и составил 2,9 млн т [Ресурсы поверхностных..., 1973].

По официальным данным, за последние годы [Государственный доклад..., 2015] сток взвешенных веществ в оз. Байкал с водами р. Селенги носит неравномерный характер, изменяясь в широких пределах от 0,3 до 1,3 млн т. Рассчитанные объемы стока за период экспериментальных наблюдений в дельте коррелируют с данными сети наблюдений Росгидромета.

По бассейну р. Селенги отмечается снижение стока наносов ввиду затишья эрозионных процессов в последние 50 лет, что связано с консервацией сельскохозяйственных земель [Ильичева Е. А., 2008; Vazhenova O. I., 2009].

Диапазон значений измеренной мутности за период исследований меняется по пространству дельты в различные годы и сезоны от 220 до 4,5 г/м³. Мутность селенгинских вод при входе в дельту составляет от 16 до 95 г/м³. Максимальный сток взвешенных наносов отмечался в паводок 2012 г. и составил 2,5 млн т, минимальные объемы поступили в 2007 г. и 2011 г.

В июле 2013 г. проведена съемка наносов по всем протокам дельты с периодичностью отбора проб на фильтрование 2–3 км. Результат проведенного анализа представлен на карте-схеме распределения мутности по основным протокам дельты (рис. 4).

В сравнении с ежегодно получаемыми данными о мутности выявлена общая закономерность концентраций взвешенных веществ в дельте. Значения из года в год могут отличаться в 2–3 раза в зависимости от водности в вершине дельты, и относительные изменения имеют определенную связь с гидроморфологическими элементами русла [Dongatal, 2019].

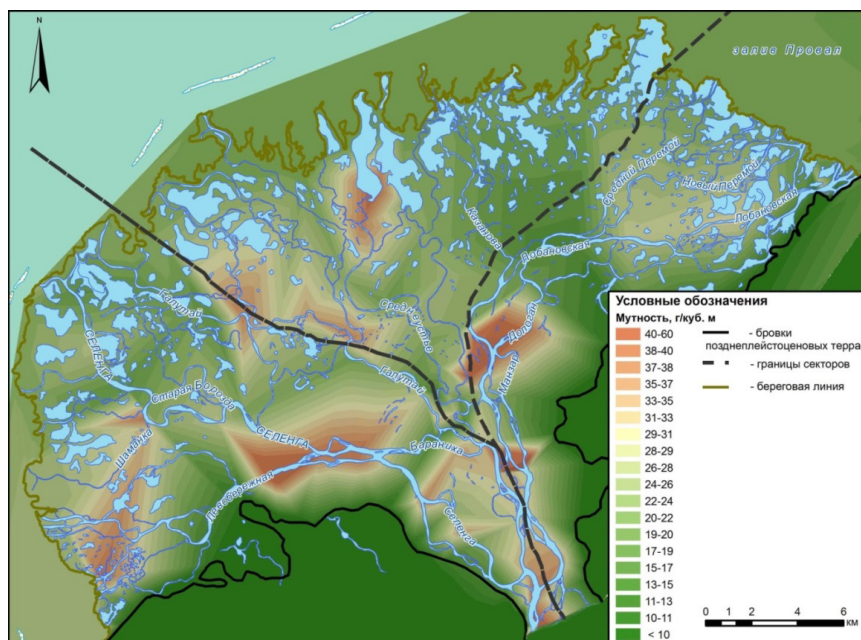


Рис. 4. Мутность речных вод в дельте р. Селенги (съемка в июле, 2013 г.)

В июле 2013 г. значения мутности менялись от 48 г/м³ в вершине дельты до 14 г/м³ в устье протоки Лобановская. В придельтовой части заливов Провал и Черкалов Сор, где глубины не превышают 1,5 м, в штиль мутность составляла 18–22 г/м³. После штормов на этих участках мутность достигала 30–40 г/м³. В протоках дельты от основного узла бифуркации к устьям изменение значений мутности происходит неравномерно, однако наблюдается общее уменьшение. Шлейфы мутности иногда распространяются до 5 км в Байкал [Лабутина, Тарасов, 2018].

Увеличение концентраций в устьевых участках проток Левобережная, Харауз, Галутай, Среднеустье, Колпинная и в мелководных заливах обусловлено волновой деятельностью Байкала и нагонными явлениями, вызывающими перемешивание текущих вод и взмучивание руслоформирующих наносов.

Отмечено значительное увеличение мутности на внутريدельтовых узлах бифуркации (рис. 2, 4). Ниже основного узла разбоя (с. Малое Колесово) по протокам Лобановского сектора мутность резко увеличивается в Красноярском узле — с 28 до 59 г/м³, в разбое Лобановская — Дологан — Манзар — с 26 до 52 г/м³. Увеличение мутности отмечается в узле Селенга — Левобережная, в приустьевой части протоки Левобережная, где происходит разбиение на мелкие протоки, на крутых меандрах и малых разбоях проток Галутай, Среднеустье, Колпинная. Отмечено увеличение мутности на участках подмываемых берегов и размываемых островов и осередков. Увеличение мутности зависит и от глубин проток на перекатах в районах разбоев. Шлейфы повышенной мутности прослеживаются от 500 до 1000 м от источников поступления материала.

Анализ объемов накопления или выноса наносов в дельте, возможно, провести достаточно точно в пределах среднего течения проток, на расстоянии 12–20 км от главного узла разбоя вниз по течению. Наибольший объем накопления наносов отмечен в 2012 г. при прохождении летнего паводка (табл. 1).

Таблица 1

Объемы стока наносов (тыс.т/год)

	2005	2006	2007	2011	2012	2013	2014	2015
Вершина дельты	913	1853	364	264	2450	669	539	369
Лобановский сектор	662	656	143	235	714	309	150	22
Среднеустьевский сектор	265	536	51	71	278	82	54	51
Селенгинский сектор	873	812	123	89	215	392	241	61
Сумма по секторам	1801	2004	317	395	1207	784	445	133
Объем эрозии/аккумуляции*	-888	-151	+47	-132	+1244	-115	+94	+236

* Со знаком «-» — эрозия; «+» — аккумуляция

Пойменное осадконакопление имеет значительный вес в формировании современного облика дельты. Представленные гипсометрические модели рельефа (рис. 1) показывают плановые очертания и высоты субазаральной поверхности дельты на два временных среза. Модель 1956 г. является своеобразной точкой отсчета наших исследований и описывает морфометрию дельты до заполнения Иркутского водохранилища, что повлекло затопление значительных территорий и переформирование побережий [Динамика берегов..., 1977]. Субазаральная дельта представляет собой полого наклонную, расчлененную современными протоками

озерно-аллювиальную равнину с высокими, до 1,5 м, межукавными пространствами и островами со средней высотой поверхности 457 м БС.

Модель 1998 г. имеет ряд морфометрических отличий от предыдущей, выраженных в новых очертаниях дельты: береговой линии, и резкий характер рельефа. Гипсометрические профили проведены по наиболее широкой части дельты и через участки, которые затронули видимые изменения, и охватывают все основные протоки ниже основного узла разбоя (рис. 5).

Средняя высота поверхности дельты увеличилась до 457,8 м БС, причем максимальные высоты (до 459 метров) наблюдаются в Селенгинском и Лобановском секторах [Ильичёва и др., 2014., Павлов, Ильичёва, 2017]. Увеличение высоты дельты в этот период связано с выходом селенгинских вод на пойму при подпоре водами Байкала и отложением пойменной и русловой фаций на межукавных пространствах, вершинная часть дельты не затоплялась. Исследование береговых разрезов показывает чередование почвенных горизонтов с флювиальными отложениями [Павлов и др., 2016]. Особенно активно аккумулируются осадки в половодья и паводки, когда в некоторые годы речные воды выходят из русел на пойменные и надпойменные террасы.

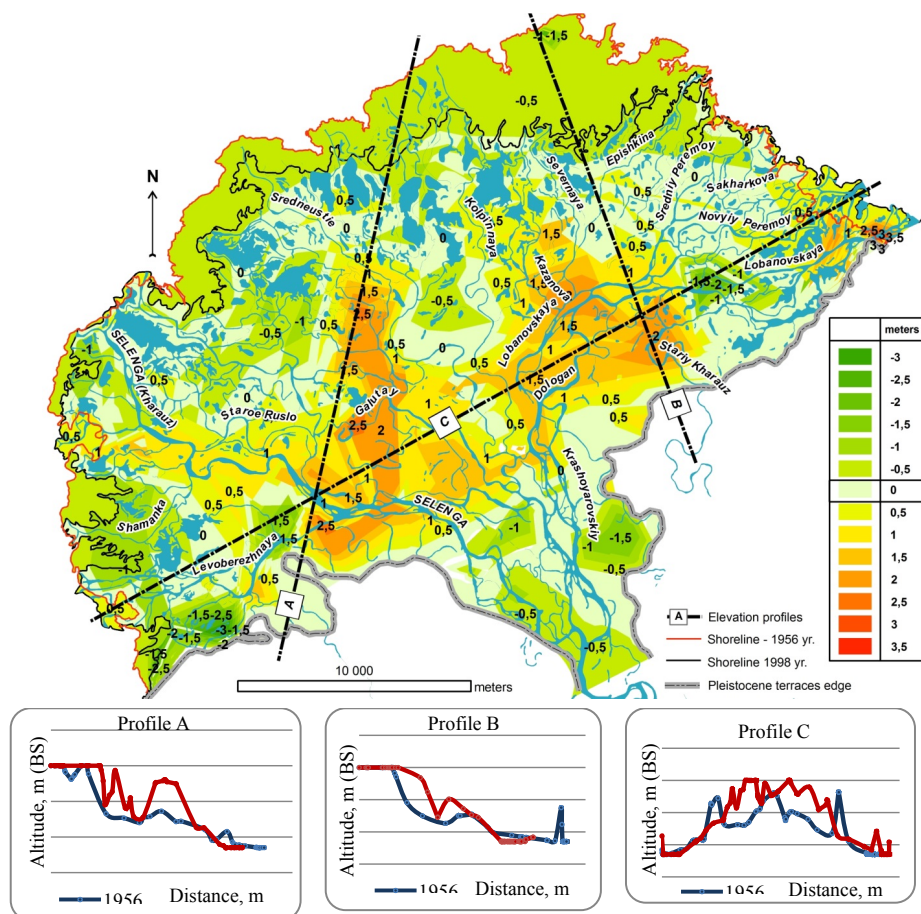


Рис. 5. Модель развития эрозионно-аккумулятивных процессов к 1998 г., рисунок с профилями на два временных среза

Развитие эрозионно-аккумулятивных процессов, в частности русловых деформаций, подвержено влиянию колебаний уровня воды в озере. В период с 1956 по 1998 г. произошло повышение уровня воды в озере и, следовательно, обновление гидрологического режима дельты, во время которого речные системы были подвержены значительному воздействию эрозионно-аккумулятивных процессов. Данные изменений площади русловой сети представлены в таблице 2.

Таблица 2

Рассчитанные площади русел в дельте реки Селенги в 1956 и 1998 гг.

Протоки	Площадь, км ²	
	1956 г.	1998 г.
Галутай	1,216	1,586
Дологан	4,809	4,634
Колпинная	1,146	0,931
Лобановская	6,361	4,888
Среднеустье	1,593	1,086
Епишкина	0,748	0,739
Левобережная	-	2,642
р. Селенга — основное русло	6,385	5,012

Сравнительный анализ разновременных геоданных позволяет оценить скорости и направленность русловых деформаций, а в целом динамику площади, занятой русловой сетью (рис. 6).

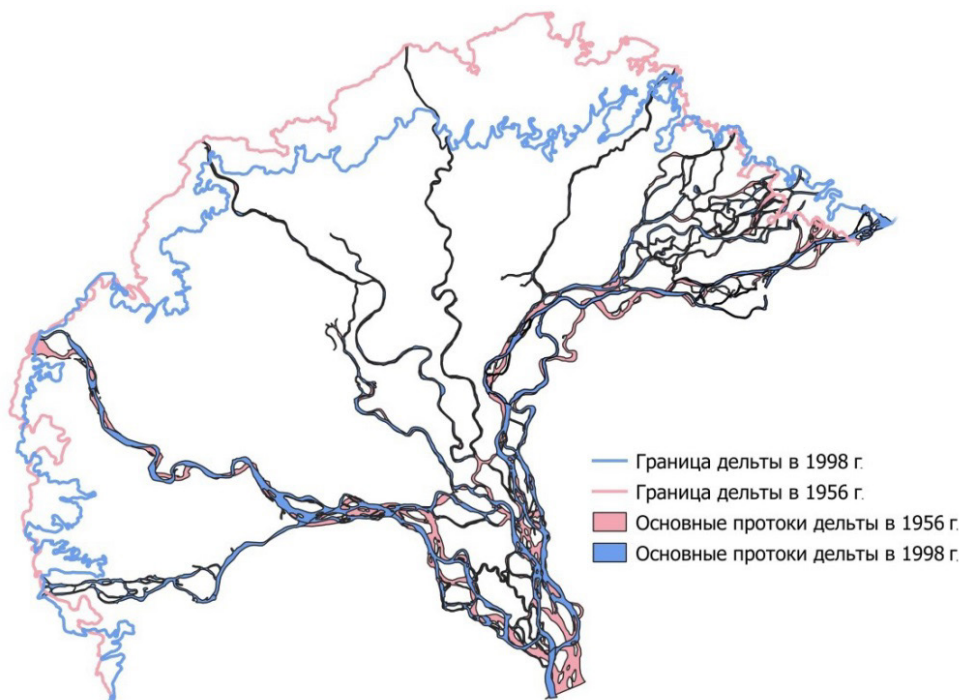


Рис. 6. Совмещенная русловая сеть дельты Селенги

Предложенная интегральная модель позволяет вычислить и визуально оценить площади эрозии, аккумуляции и относительно устойчивых участков русловой сети (рис. 7).

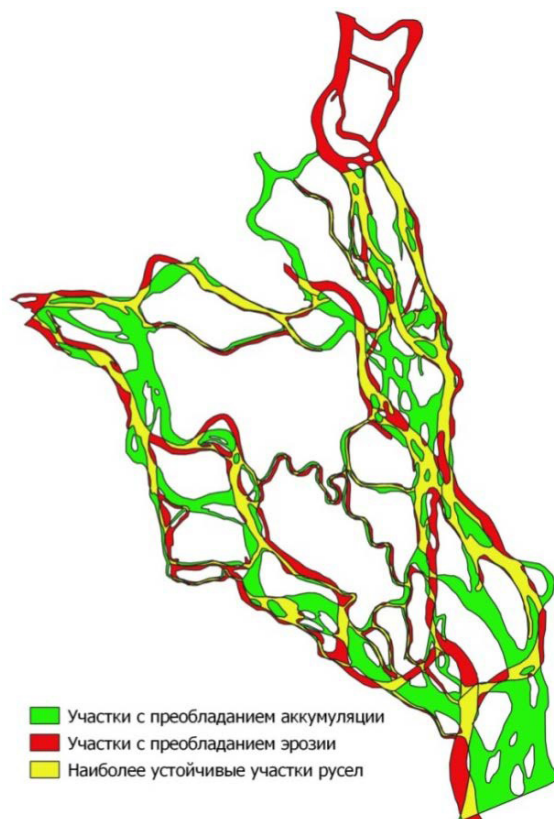


Рис. 7. Интегральная модель русловых деформаций с 1956 по 1998 г. в привершинной части дельты

Участки проток с преобладанием аккумуляции показывают, что внутри рассматриваемого периода времени произошло накопление руслового материала. Участки с преобладанием эрозии фиксируют процессы русловой эрозии, их следствием являются расширение или горизонтальные деформации русел (плановая миграция). Относительно устойчивые участки русел отображают стабильные участки русла реки, где процессы эрозии и аккумуляции либо не проявлялись, либо взаимно компенсировали друг друга. Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

С учетом высот берегов, полученных по гипсометрическим моделям (рис. 1), вычислены объемы твердого материала, задействованного в эрозионно-аккумулятивной деятельности за 40-летний период (табл. 4). Отрицательные значения в таблице 4 свидетельствуют о том, что аккумулятивные процессы преобладали над эрозионными в рассматриваемый временной интервал.

Таблица 3

Площади участков русел проток с преобладанием эрозии, аккумуляции и наиболее устойчивые к размыву

Протоки	Площадь, км ²		
	эрозионных участков	участков аккумуляции	устойчивых участков
Галутай	1,14	0,56	0,67
Дологан	3,56	3,73	1,09
Колпинная	0,45	0,67	0,48
Лобановская	3,28	5,01	1,38
Среднеустье	0,48	0,99	0,61
Епишкина	0,34	0,35	0,41
Левобережная	2,64	-	-
р. Селенга (пр. Харауз)	3,38	2,00	3,03
Вершина дельты	4,89	-	-

Таблица 4

Интегральные значения объемов материала, участвовавшего в эрозионно-аккумулятивных процессах

Протоки	Эрозия, км ³ /год	Аккумуляция, км ³ /год	км ³ /год
Галутай	101	49	51
Дологан	372	390	-18
Колпинная	40	59	-19
Лобановская	315	482	-166
Среднеустье	43	87	-45
Епишкина	30	30	0
Левобережная	243	-	243
р. Селенга (пр. Харауз)	260	154	106
Вершина дельты	450	740	-291

Наибольший по модулю объем накопленного материала приходится на вершину дельты — 291 км³/год. Это связано со сменой руслового процесса от островной многорукавности в 1952 г. к меандрированию, начавшемуся в 1980-х гг., и формированию сегментной адаптированной (врезанной) излучины.

Следующей по значению объемов накопленного аллювия является протока Лобановская, которая подвержена значительным русловым деформациям и перестройке гидросети. За рассматриваемый период произошло слияние проток Дологан и Лобановская. Часть русла Лобановской занеслась наносами, большая доля стока перераспределилась в Дологан.

Основное русло дельты Селенги постепенно уменьшается и замывается. Большая часть стока из года в год уходит в новообразованную протоку Левобережную.

Протока Галутай в Среднеустьевском секторе дельты имеет положительное соотношение эрозионно-аккумулятивных процессов (51 км³/год). Рукав Среднеустье же, наоборот, отрицательное соотношение (-45 км³/год). Полученные значения близки друг другу по значению модуля, что может свидетельствовать о взаимной

компенсации эрозионно-аккумулятивных процессов в центральном секторе дельты. Протока Колпинная более подвержена эрозии и теряет 19 км³/год. Такие потери материала могут быть приурочены в первую очередь к сокращению площади дельты и центрального сектора в частности.

Заключение

Комплексный подход к изучению дельтоформирования в условиях зарегулированного приемного водоема с применением цифровой обработки географических данных позволил оценить объемы аллювия, участвующего в эрозионно-аккумулятивной деятельности. В целом площадь дельты за рассматриваемый период сократилась более чем на 60 км² за счет затопления части территории Среднеустьевского сектора. Высота субэкральной поверхности дельты в целом увеличилась на 0,8 м в результате отложения пойменного и руслового аллювия на островах и междуречных пространствах, в основном на абсолютных отметках ниже 458 м БС. Выявлены относительно устойчивые участки русел и междуречных пространств в сравнении с участками, подверженными активным русловым деформациям. Осредненные данные по динамике объемов перемещаемого аллювия в дельте показали, что среднегодовые величины эрозии и аккумуляции различны на 140 км³/год, что составляет порядка 2,7 млн т в год. За рассмотренный период в дельте накопилось более 5 500 км³, что коррелирует с наблюдаемыми нами величинами стока наносов в настоящее время.

Исследования проводятся при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17–29–05052 офи_м «Экоморфолитогенез устьев Байкальских притоков на современном этапе гидроклиматического цикла: моделирование и прогноз»

Литература

- Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета / под ред. В. А. Семенова и Б. Мягмаржава. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 237 с.
- О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2014 году: гос. доклад. Иркутск, 2015. 436 с.
- Динамика берегов озера Байкал при новом уровне режиме. М.: Наука, 1976. 88 с.
- Ильичёва Е. А., Корытный Л. М., Павлов М. В. Руслвая сеть дельты р. Селенги на современном этапе // Вестник Томского университета. 2014. № 380. С. 190–194.
- Ильичёва Е. А. Динамика структуры речной сети Селенги и ее дельты // География и природные ресурсы. 2008. № 4. С. 57–63.
- Лабутина И. А., Тарасов М. К. Изучение распространения твердого стока реки Селенги по космическим снимкам // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 66–72.
- Павлов М. В., Ильичева Е. А. Морфогенез Сарминского и Селенгинского побережий озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2017. № 4. С. 116–132.
- Павлов М. В., Ильичёва Е. А., Савельева Л. А. Динамика субэкральной поверхности дельты реки Селенги // География и природные ресурсы. 2016. № S5. С. 128–136.
- Ресурсы поверхностных вод. Ангаро-Енисейский район. Бассейн оз. Байкал. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т 16, вып. 3. 368 с.
- Эколого-географический атлас-монография «Селенга — Байкал» / под ред. Н. С. Касимова. М.: Изд-во МГУ, 2018. 288 с.

Bazhenova O. I. The Ecologo-Geomorphological Consequences of Conservation of Agricultural Lands within the Lake Baikal Watershed Basin // *Geography and Natural Resources*. 2009. V. 30, No. 3. P. 253–257.

Tian Y. Dong, Jeffrey A. Nittrouer, Elena Ilicheva, Maksim Pavlov, Brandon McElroy, Matthew J. Czapiga, Hongbo Ma, and Gary Parker. Controls on gravel termination in seven distributary channels of the Selenga River Delta, Baikal Rift basin, Russia // *Geological Society of America Bulletin*. 2016. Vol. 128, № 7. P. 1297–1312.

Tian Y. Dong, Jeffrey A. Nittrouer, Matthew J. Czapiga, Hongbo Ma, Brandon McElroy, Elena Ilicheva, Maksim Pavlov, Sergey Chalov, Gary Parker. Roles of Bank Material in Setting Bankfull Hydraulic Geometry as Informed by the Selenga River Delta, Russia // *Water Resources Research*. 2019. Vol. 55, No. 1. P. 827–846.

INTEGRATED ASSESSMENT OF EROSION-ACCUMULATIVE ACTIVITY OF CHANNEL NETWORK AT THE SELENGA DELTA

E. A. Ilyicheva, M. V. Pavlov, A. P. Rogachev

Elena A. Ilyicheva

Cand. Sci. (Geogr.),
Sochava Institute of Geography SB RAS
1 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia
E-mail: lenail3663@mail.ru

Maksim V. Pavlov

Leading Engineer,
Sochava Institute of Geography SB RAS
1 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia
E-mail: maksimpavlov_v@mail.ru

Arkadiy P. Rogachev

Master's Degree Student,
Irkutsk State University
126a Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia
Email: arogachov25@gmail.com

The article provides an integrated assessment of erosion, accumulation and sediment transport in the Selenga River Delta based on the analysis of hypsometric terrain models of the subaerial surface. An integrated approach to the study of deltafication under the conditions of a regulated receiving water body using digital processing of geographic data made it possible to estimate the volumes of alluvium involved in erosion-accumulative activity. Relatively stable reaches of channels and spaces between distributary channels were revealed in comparison with the reaches subject to active channel deformations. We have presented the calculated indicators of erosion-accumulative activity of anabranches alongside the observed values of sediment runoff, as well as the characteristics of coastal erosion rates, displacements of bifurcation nodes, and planned channel deformations as a whole. The article also reveals the factors of channel network reorganization and the role of sediment sources for deltafication.

Keywords: digital terrain model; sediment runoff; channel deformations delta; Selenga; Baikal.